



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΑΝΤΩΝΙΟΣ Δ. ΤΣΙΓΓΟΥΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωπόνος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
'ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022





ΑΝΤΩΝΙΟΣ Δ. ΤΣΙΓΓΟΥΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωπόνος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 7/7/2022

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ελένη Κατράγκου, Αναπλ. Καθηγήτρια, *Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. (Επιβλέπουσα)*

Ιωάννης Πυθαρούλης, Αναπλ. Καθηγητής, *Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.*

Θωμάς Αλεξανδρίδης, Αναπλ. Καθηγητής, *Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.*



© Αντώνιος Δ. Τσιγγούδης, Γεωπόνος, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Antonios D. Tsingoudis, Agriculturist, 2022

All rights reserved.

INVESTIGATING DROUGHTS OVER SOUTH AFRICA – *Master Thesis*

Citation:

Τσιγγούδης Α. Δ., 2022. – Μελέτη της ξηρασίας για την Νότια Αφρική. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 189 σελ.

Tsingoudis A. D., 2022. – Investigating droughts over South Africa. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 189 pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ.....	VI
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ	1
1.1.1. Γεωγραφικά Στοιχεία	1
1.1.2. Κλιματολογία και Συνοπτική Κατάσταση	4
1.1.3. Βιοκλιματικές Ζώνες και Ο Πρωτογενής Τομέας	25
1.2 ΞΗΡΑΣΙΑ.....	32
1.2.1. Ορισμοί, Τύποι και Χαρακτηριστικά της Ξηρασίας.....	32
1.2.2. Δείκτες Ξηρασίας.....	38
1.2.3. AfriCultuReS	48
1.2.4. Ν. Αφρική και Μελλοντικά Hot-spots Ξηρασίας.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	57
2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	57
2.2. ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ - SPEI	58
2.3. ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ - SWCI.....	61
2.4. ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ - VCI.....	62
2.5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	64
2.6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ – ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	67
3.1. 1^η ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΞΗΡΑΣΙΑ 2017 - «ZERO DAY», CAPE TOWN	67
3.1.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση του «ZERO DAY»	67
3.1.2. Ανάλυση των Δεικτών Ξηρασίας της 1 ^{ης} Μελέτης Περίπτωσης.....	71
3.2. 2^η ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΞΗΡΑΣΙΑ ΙΟΥΛΙΟΥ - ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2018	81
3.2.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την Ξηρασία Ιουλίου - Δεκεμβρίου 2018	81
3.2.2. Ανάλυση των Δεικτών Ξηρασίας της 2 ^{ης} Μελέτης Περίπτωσης.....	83
3.3. 3^η ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΞΗΡΑΣΙΑ 2019	104
3.3.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την Ξηρασία του 2019.....	104
3.3.2. Ανάλυση των Δεικτών Ξηρασίας της 3 ^{ης} Μελέτης Περίπτωσης.....	108
3.4 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ.....	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	143
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	151
ABSTRACT	153
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	170

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ανάλυση των επεισοδίων ξηρασίας, ως προς τα χαρακτηριστικά της έντασης διάρκειας και της χωρικής τους κατανομής, την περίοδο 2017 - 2020 στην χώρα της Νότιας Αφρικής μέσω τριών δεικτών ξηρασίας (SPEI, SWCI, VCI) συγκρινόμενους με τις βιβλιογραφικές αναφορές για την περίοδο αυτή, εξετάζοντας ταυτόχρονα τα κλιματολογικά στοιχεία της χώρας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται ανασκόπηση στην βιβλιογραφία όσον αφορά τα γεωγραφικά και κλιματολογικά στοιχεία της Νότιας Αφρικής καθώς και των βιοκλιματικών ζωνών και του πρωτογενή της τομέα. Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται οι ορισμοί, οι τύποι και τα χαρακτηριστικά που διέπουν την ξηρασία, αναλύονται οι δείκτες ξηρασίας και εξετάζεται η Νότια Αφρική σαν μελλοντικό hot-spot ξηρασίας για τον 21^ο αιώνα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης και αναλύονται οι δείκτες ξηρασίας που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των τριών επεισοδίων ξηρασίας που εντοπίστηκαν βάσει των δεικτών, αλλά και των βιβλιογραφικών αναφορών που περιγράφονται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο. Ταυτόχρονα, μέσω της ανάλυσης, στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζονται οι δείκτες ως προς την χρονική και χωρική τους συμφωνία στην αποτύπωση των κύριων χαρακτηριστικών της ξηρασίας (ένταση, έναρξη και λήξη, διάρκεια, χωρική κατανομή) για κάθε μια από τις μελέτες περίπτωσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της. Τέλος, το τέταρτο κεφάλαιο αποτελείται από τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τους εξεταζόμενους δείκτες ξηρασίας βάσει της μελέτης της παρούσας εργασίας, καθώς και από τα κυριότερα στοιχεία που σχετίζονται με το φαινόμενο της ξηρασίας στην Νότια Αφρική.

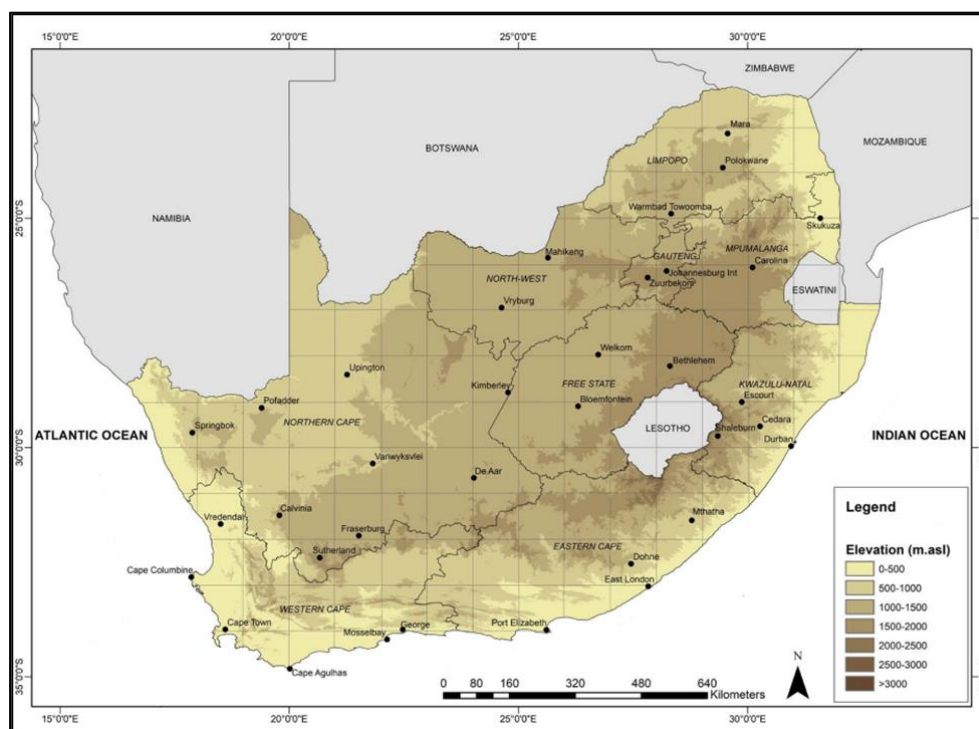
Τα δεδομένα της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας Ειδίκευσης έχουν αντληθεί από την πλατφόρμα του προγράμματος AfriCultuReS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ

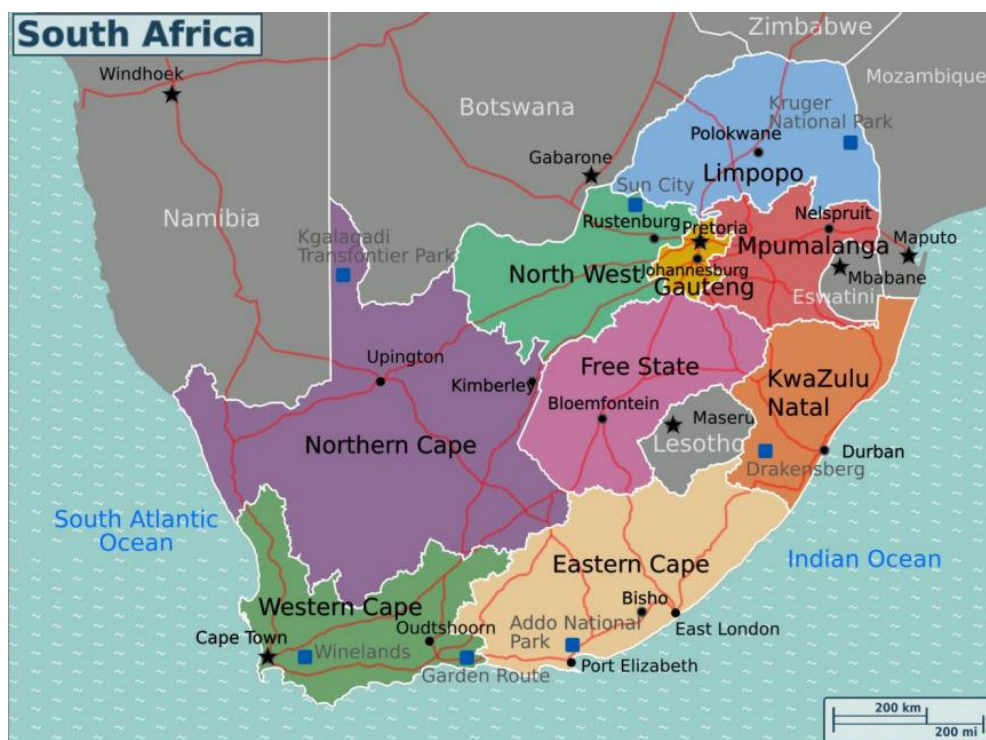
1.1.1. Γεωγραφικά Στοιχεία

Η Δημοκρατία της Νότιας Αφρικής (εφεξής Ν. Αφρική) αποτελεί το νοτιότερο άκρο της αφρικανικής ηπείρου. Η συνολική της έκταση είναι 1.219.090 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km²) (CIA 2011) και εκτείνεται ανάμεσα στα γεωγραφικά πλάτη 22° και 35° νότια (S) και γεωγραφικά μήκη 16° και 33° ανατολικά (E) εντός της εύκρατης ζώνης του Νοτίου Ημισφαιρίου. Βρέχεται από τον Ινδικό Ωκεανό στα ανατολικά και νότια, και τον νότιο Ατλαντικό Ωκεανό στα νοτιοδυτικά και δυτικά (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1. Υψομετρικός χάρτης της Ν. Αφρικής (Van der Walt and Fitchett 2020).

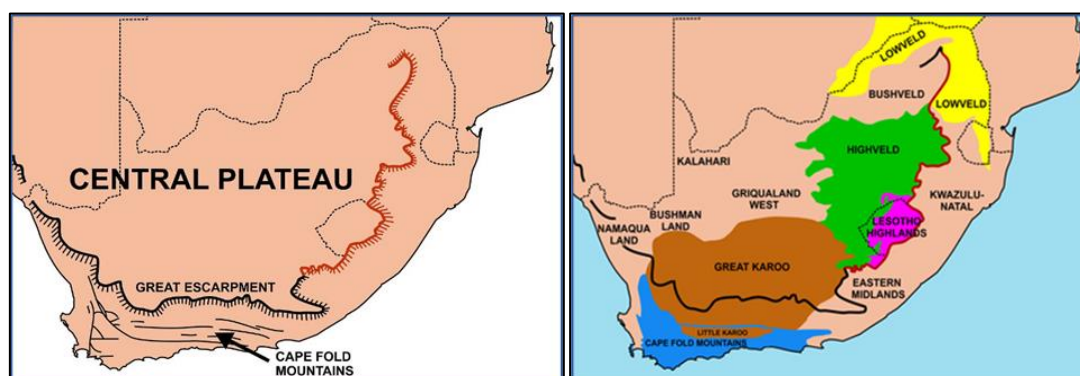
Η Ν. Αφρική διαιρείται σε εννέα επαρχίες (Σχήμα 1.2). Το Ανατολικό Ακρωτήριο (Eastern Cape) που βρίσκεται στα νότια και ανατολικά της χώρας με πρωτεύουσα το Μπίσο (Bhisho), το Βόρειο Ακρωτήριο (Northern Cape) στα δυτικά-βορειοδυτικά με πρωτεύουσα το Κίμπερλι (Kimberly), την Βορειοδυτική επαρχία (North West) στα βόρεια με πρωτεύουσα το Μάχικενγκ (Mahikeng), το Γκαουτένγκ (Gauteng) στα κεντρικά και βορειοανατολικά όπου βρίσκονται η πρωτεύουσα της χώρας Πρετόρια (Pretoria) και το Γιοχάνεσμπουργκ (Johannesburg), πρωτεύουσα της επαρχίας και η μεγαλύτερη σε πληθυσμό πόλη της Νοτίου Αφρικής, το Δυτικό Ακρωτήριο (Western Cape) στα νοτιοδυτικά με πρωτεύουσα το Κέιπ Τάουν (Cape Town), την επαρχία Ελεύθερο κράτος της Οράγγης (Free State) στα κεντρικά της χώρας με πρωτεύουσα το Μπλουμφοντέιν (Bloemfontein), το Κουαζουλού-Νατάλ (KwaZulu Natal) στα ανατολικά με πρωτεύουσα το Πιτερμάριτσμπουργκ (Pietermaritzburg), το Λιμπόπο (Limpopo) στα βορειοανατολικά με πρωτεύουσα το Πολοκουάνε (Polokwane), και την Μπουμαλάνγκα (Mpumalanga) στα ανατολικά της χώρας, βόρεια του Κουαζουλού-Νατάλ, με πρωτεύουσα την Μπαμπέλα (Mbombela, πρώην Nelspruit).



Σχήμα 1.2. Πολιτικός χάρτης της Ν. Αφρικής (OEY 2019).

Η Ν. Αφρική έχει μέσο υψόμετρο 1.034 m από την επιφάνεια της θάλασσας και δεσπόζουσα γεωμορφή είναι το κεντρικό οροπέδιο (Central Plateau) που καλύπτει το

μεγαλύτερο εσωτερικό τμήμα της χώρας και διαχωρίζεται από την παράκτια ζώνη με το Μεγάλο Κρημνό (Great Escarpment). Το Central Plateau κατέρχεται ομαλά προς τα δυτικά και βόρεια έχοντας τα μεγαλύτερα υψόμετρα στα ανατολικά τμήματά του. Το οροπέδιο Central Plateau, με μέσο υψόμετρο 1.000 – 1.800 m, είναι μία συμπαγής λεκάνη που φτάνει τα 2.440 m στην βασαλτική περιοχή του Λεσότο (Σχήμα 1.3). Στο κεντρικό τμήμα του Οροπεδίου, στις επαρχίες Free State και Gauteng, βρίσκεται το Τρανσβαάλ (Transvaal) και η περιοχή Χάιβελτ (Highveld). Το Χάιβελτ περιλαμβάνει τις περισσότερες γεωργικές εκτάσεις εκτατικών καλλιεργειών και συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό των αστικών περιοχών της χώρας. Βόρεια του Χάιβελτ, στην επαρχία Limpopo, το οροπέδιο κλίνει υψομετρικά προς τα κάτω στην περιοχή Μπουσβέλντ (Bushveld), η οποία τελικά οδηγεί στην πεδιάδα του Λιμπόπο (Lowveld). Το οροπέδιο Γκρέιτ Καρού (Great Karoo) στα νοτιοδυτικά έχει μέσο ύψος 1.210 m και περιλαμβάνει αναρίθμητα μεγάλα αλατούχα πεδία. Βόρεια του Γκρέιτ Καρού βρίσκονται τα ξηρά και χαμηλότερα υψομετρικά (600 - 800 m) οροπέδια Μπουσμάλαντ (Bushmaland) και Γκρικουάλαντ Γουέστ (Griqualand West) (Jackson et al. 1984).



Σχήμα 1.3. Χάρτης με τους κυριότερους γεωφυσικούς σχηματισμούς της Ν. Αφρικής (Jackson et al. 1984).

Η παράκτια ζώνη οριοθετείται νότια του Μεγάλου Κρημνού (Great Escarpment) και ξεκινά από την επαρχία του Limpopo στα βορειοανατολικά, συνεχίζει στην επαρχία KwaZulu-Natal στα ανατολικά, όπου στα σύνορα με το Λεσότο σχηματίζεται το υψηλότερο τμήμα του Great Escarpment, η οροσειρά Ντράκενσπεργκ (Drakensberg) με υψηλότερη κορυφή, στα εδάφη της Ν. Αφρικής, το Μαφάντι (Mafadi) με 3.450 m (Jackson et al. 1984). Στην παράκτια ζώνη κάτω από τα νότια τμήματα του Great Escarpment, στις επαρχίες Eastern και Western Cape, σχηματίζονται τα Cape Fold Mountains μια σειρά παράλληλων με την ακτή ορεινών

όγκων, με ύψη που κυμαίνονται από 1.000 έως 2.300 m και εκτείνονται κατά μήκος των νοτιοδυτικών και νότιων ακτών της Ν. Αφρικής για 850 km όπου καταλήγουν στο νοτιότερο άκρο της χώρας στο Ακρωτήριο Αγκούλας (Cape Agulhas), στο σημείο συνάντησης των δύο Ωκεανών (Ατλαντικού και Ινδικού) (McCarthy and Rubidge 2005).

Η δυτική παράκτια ζώνη ξεκινά στα νότια από το Ακρωτήριο της Καλής Ελπίδας (Cape of Good Hope), στις δυτικές απολήξεις των Cape Fold Mountains, και καταλήγει στα βόρεια στην έρημο Ναμίμπ. Στο μεγαλύτερο μέρος της ζώνης αυτής το κλίμα είναι Μεσογειακό (Tyson and Preston-Whyte 2005).

Στα βόρεια της επαρχίας Northern Cape και στα δυτικά της επαρχίας North West ξεκινά η έρημος Καλαχάρι (Kalahari desert), ενώ στις δυτικές απολήξεις του Central Plateau, στα δυτικά παράλια της επαρχίας Northern Cape, ξεκινά η έρημος Ναμίμπ (Namib desert) (Σχήμα 1.4).

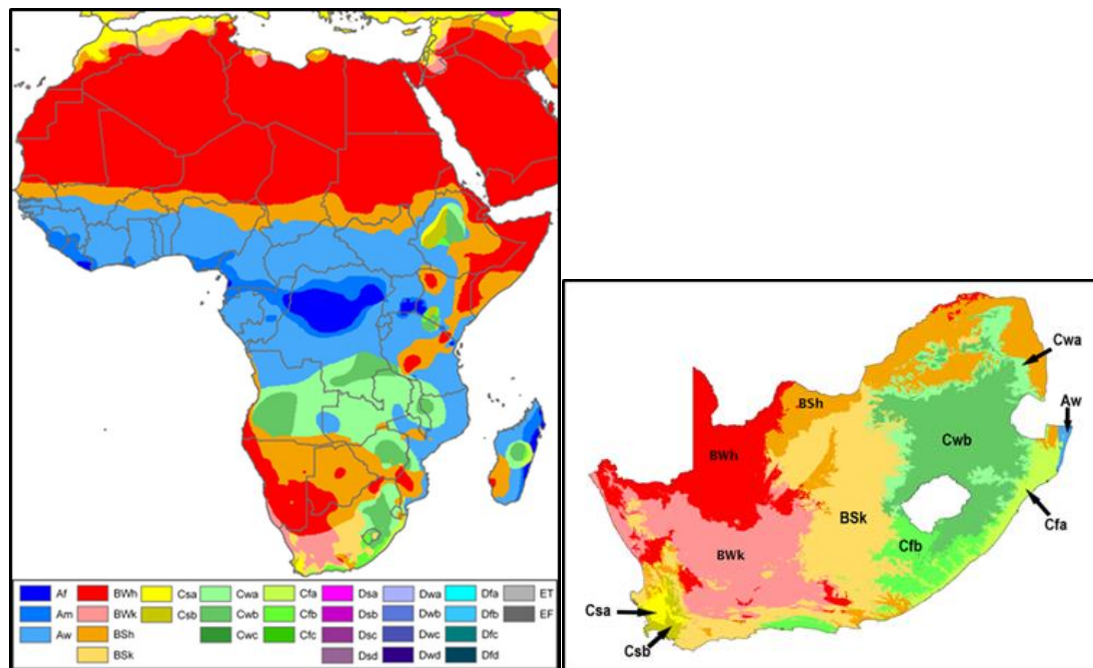


Σχήμα 1.4. Οι έρημοι στην Ν. Αφρική (<http://railwaystays.com/>).

1.1.2. Κλιματολογία και Συνοπτική Κατάσταση

Το κλίμα της Ν. Αφρικής είναι χωρικά και χρονικά εξαιρετικά ετερογενές (Σχήμα 1.5). Χαρακτηριστικό της χωρικής ετερογένειας είναι ότι στην επικράτειά της εντοπίζονται έντεκα από τους δεκατρείς κλιματικούς τύπους που εμφανίζει συνολικά η αφρικανική ήπειρος σύμφωνα με την κατάταξη Köppen – Greiger (Beck et al. 2018).

Η κλιματική μεταβλητότητα προκαλείται τόσο από τη μορφολογία της περιοχής όσο και από τις κλιματικές συνοπτικές συνθήκες της ατμόσφαιρας. Όσον αφορά την μορφολογία, το Great Escarpment έχει καθοριστικό ρόλο στην διαφοροποίηση του κλίματος της ενδοχώρας σε σχέση με την παράκτια ζώνη (Tyson and Preston-Whyte 2005). Ένας δεύτερος σημαντικός μορφολογικός παράγοντας που επηρεάζει το κλίμα της περιοχής, είναι η σταδιακή μείωση του υψομέτρου από τα ανατολικά προς τα δυτικά στην ενδοχώρα με ταυτόχρονη μείωση του ετήσιου ύψους βροχοπτώσεων (Lennard 2019).



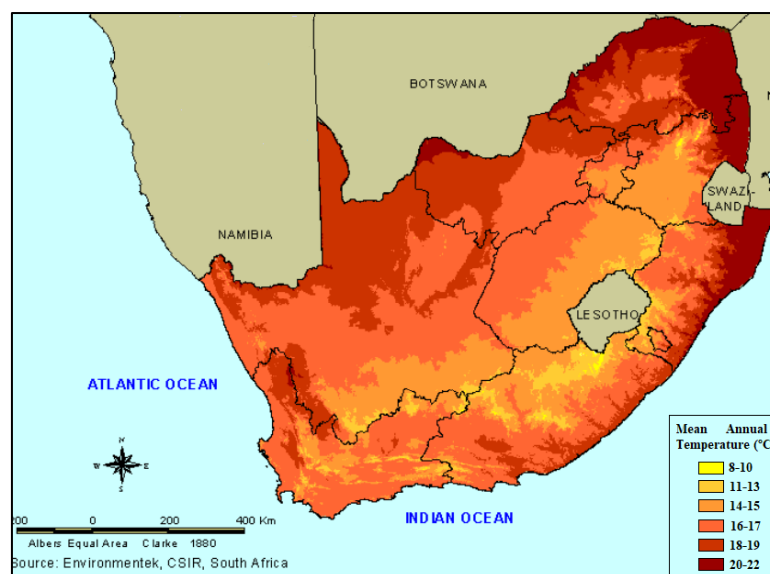
Σχήμα 1.5. Οι τύποι των κλιμάτων για την Αφρική (αριστερά) και για την Ν. Αφρική (δεξιά) σύμφωνα με την κλιματική κατάταξη Köppen – Greiger. **Aw** → Τροπική Σαβάννα με ξηρό χειμώνα, **BWh** → Ερημικό Τροπικό, **BWk** → Ερημικό Εξωτροπικό, **BSh** → Τροπική Στέπα, **BSk** → Εξωτροπική Στέπα, **Cfa** → Υγρό Υποτροπικό, **Cfb** → Θαλάσσιο με θερμό καλοκαίρι, **Csa** → Μεσογειακό ενδοχώρας, **Csb** → Μεσογειακό παράκτιο, **Cwa** → Υποτροπικό Μουσωνικό, **Cwb** → Τροπικό Υψιπέδων (Beck et al. 2018).

Κλιματικές παράμετροι

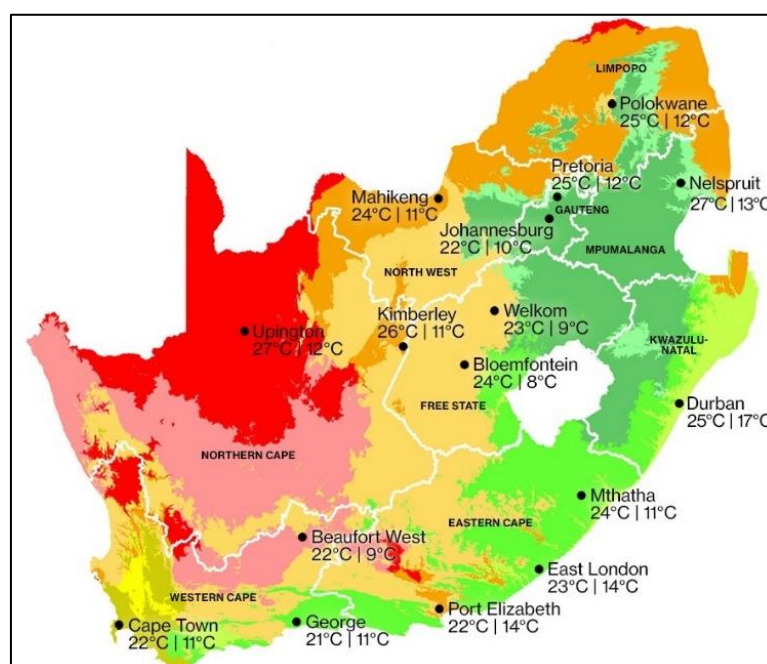
Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στους κύριους κλιματικούς παράγοντες, ως προς την μέσες τιμές και την εποχική τους διακύμανση, που σχετίζονται με το φαινόμενο της ξηρασίας. Η μέση ετήσια θερμοκρασία στις πεδινές και παράκτιες περιοχές της Ν. Αφρικής ξεπερνά τους 16°C και φτάνει έως τους 22°C στις

ανατολικές ακτές της επαρχίας KwaZulu-Natal και στην πεδιάδα του Limpopo στα βορειοανατολικά της χώρας (Σχήμα 1.6).

Αντίθετα, κατά μήκος τους Great Escarpment λόγω μεγάλου υψομέτρου η μέση ετήσια θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 15°C με τις χαμηλότερες τιμές (8°C) να εμφανίζονται στην οροσειρά Drakensberg στα σύνορα με το Λεσότο. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι οι ανατολικές ακτές είναι θερμότερες από τις δυτικές λόγω της επίδρασης του θερμού ωκεάνιου ρεύματος από τον Ινδικό Ωκεανό (Agulhas) στα ανατολικά και του ψυχρού ωκεάνιου ρεύματος από τον Ατλαντικό Ωκεανό (Benguela) στα δυτικά.



Σχήμα 1.6. Χάρτης της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) για την Ν. Αφρική (DEAT 1990).



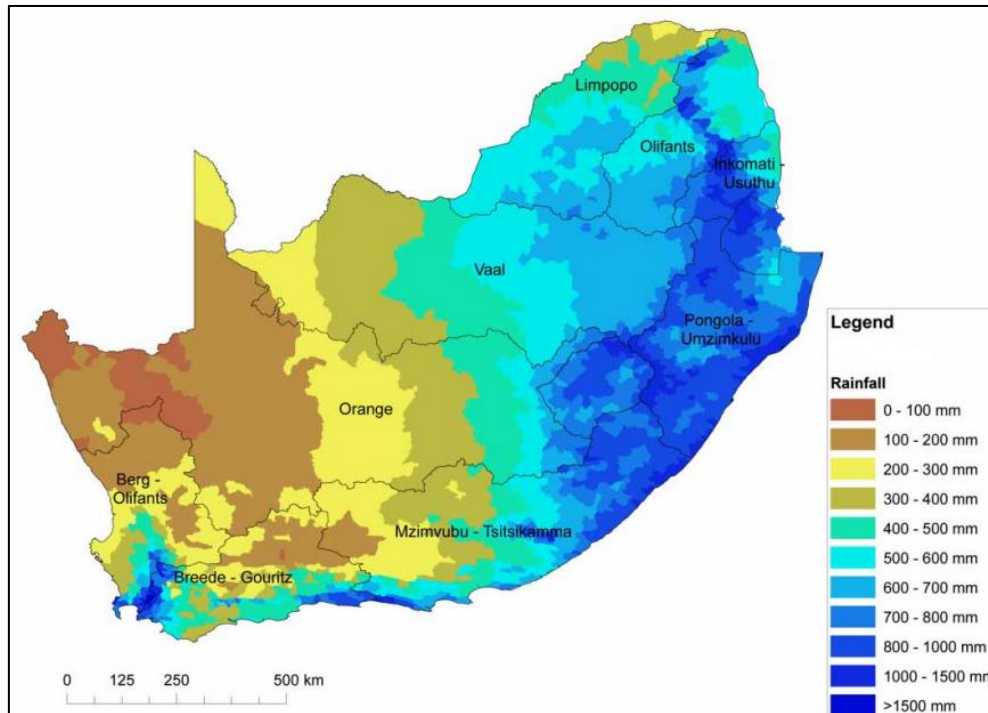
Σχήμα 1.7. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ($^{\circ}\text{C}$) των καλοκαιρινών (DJF) και των χειμερινών μηνών (JJA) στις σημαντικότερες πόλεις την Ν. Αφρικής και ο αντίστοιχος τύπος του κλίματος σύμφωνα με την κατάταξη Köppen – Greiger (SAG 2021).

Η γεωγραφική θέση της Ν. Αφρικής στην υποτροπική – εύκρατη ζώνη του νοτίου ημισφαιρίου έχει σαν αποτέλεσμα την σαφή διάκριση των εποχών. Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες των καλοκαιρινών μηνών (December, January, February – εφεξής DJF) κυμαίνονται από $21-22^{\circ}\text{C}$ στις νότιες και νοτιοδυτικές παράκτιες περιοχές, έως 27°C στα βορειοδυτικά ηπειρωτικά (επαρχία Northern Cape) και ανατολικά της χώρας (επαρχία Mpumalanga) (Σχήμα 1.7). Αντίστοιχα, για τους χειμερινούς μήνες (June, July, August – εφεξής JJA) οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 8°C στα κεντρικά ηπειρωτικά της χώρας (Free State), έως 17°C στις ανατολικές ακτές (KwaZulu-Natal). Όπως είναι φυσικό, η επίδραση των ωκεανών στην παράκτια ζώνη έχει σαν αποτέλεσμα οι παραθαλάσσιες περιοχές να εμφανίζουν μικρότερο ετήσιο θερμομετρικό εύρος ($8-11^{\circ}\text{C}$) σε σχέση με το ΕΘΕ των ηπειρωτικών περιοχών στο εσωτερικό της χώρας ($13-16^{\circ}\text{C}$) (WCG 2021).

Σε αντίθεση με την παράμετρο της θερμοκρασίας η οποία σε μια τόσο μεγάλη σε έκταση χώρα ($25^{\text{η}}$ παγκοσμίως) - μη τροπικής ζώνης - παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις και ομαλές μεταβολές, οι βροχοπτώσεις στην Ν. Αφρική παρουσιάζουν έντονη μεταβλητότητα και αξιοσημείωτες διακυμάνσεις τόσο χωρικά όσο και χρονικά (Σχήμα 1.8). Ο μέσος ετήσιος υετός για την χώρα είναι $\sim 464 \text{ mm}$ και ενώ αυτή η τιμή αντιστοιχεί λίγο παραπάνω από το μισό της παγκόσμιας τιμής ($\sim 860 \text{ mm}$), υπάρχουν ξηρές και ημίξηρες περιοχές όπου το ύψος του μέσου ετήσιου υετού δεν ξεπερνά τα 200 mm στα δυτικά και βορειοδυτικά, και περιοχές που συγκεντρώνουν πάνω από 1500 mm στα ανατολικά και νότια (Dennis and Dennis 2012, DWS 2018).

Επιπρόσθετα, ο υετός στην Ν. Αφρική παρουσιάζει έντονη ενδοετήσια διακύμανση. Συγκεκριμένα, οι χειμερινοί μήνες (JJA) συνεισφέρουν ελάχιστα στα ετήσια ποσά βροχόπτωσης (με εξαίρεση τις νοτιοδυτικές ακτές) και οι σημαντικές βροχοπτώσεις την περίοδο αυτή περιορίζονται στις νότιες ακτές και το παρακείμενο εσωτερικό της χώρας. Κατά την άνοιξη (September, October, November – εφεξής SON) οι βροχοπτώσεις αυξάνονται σταδιακά, πρώτα στα ανατολικά, και η μέγιστη συνεισφορά στις ετήσιες βροχοπτώσεις συμπίπτει με τους καλοκαιρινούς μήνες

(DJF). Το καλοκαίρι οι βροχοπτώσεις έχουν κυρίως τη μορφή καταιγίδων θερμικής αστάθειας σε αντίθεση με τον χειμώνα που είναι προϊόν μετωπικών υφέσεων. Τέλος, οι βροχοπτώσεις μειώνονται σταδιακά με την έλευση του φθινόπωρου (March -April, May - εφεξής MAM) (Tyson & Preston-Whyte 2000).

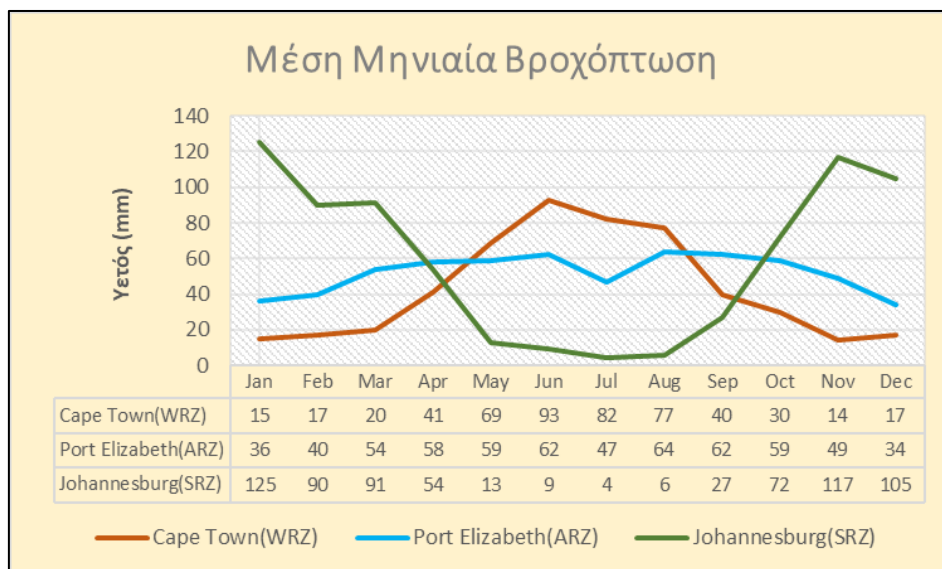


Σχήμα 1.8. Χάρτης του μέσου ετήσιου νετού (mm) για την Ν. Αφρική (DEAT 1990).

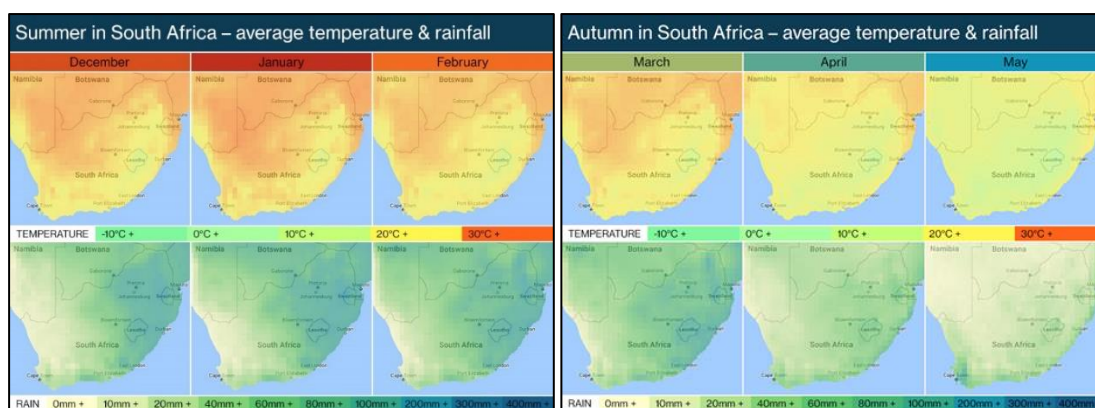
Όσον αφορά την χρονική ετερογένεια των βροχοπτώσεων στη Ν. Αφρική, χαρακτηριστικό είναι ότι εμφανίζει τρεις διαφορετικές ζώνες βροχοπτώσεων. Το κύριο κλιματικό καθεστώς της χώρας χαρακτηρίζεται από θερμά και υγρά καλοκαίρια (DJF), και ψυχρούς και ξηρούς χειμώνες (JJA). Εξάιρεση αποτελούν οι περιοχές στα νοτιοδυτικά που παρουσιάζουν ξηρά καλοκαίρια και υγρούς χειμώνες. Στην πρώτη ζώνη το μέγιστο εντοπίζεται από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο (Winter Rain Zone - WRZ), στη δεύτερη από τον Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο (Summer Rain Zone - SRZ) και στη τρίτη οι βροχοπτώσεις σημειώνονται καθ' όλη την διάρκεια του έτους (Annual Rain Zone - ARZ) (Crétat et al., 2012). Η χειμερινή ζώνη (WRZ) περιλαμβάνει την δυτική παράκτια ζώνη και τις νοτιοδυτικές ακτές, με τον Μεσογειακό τύπο κλίματος, η ετήσια ζώνη (ARZ) εμφανίζεται στις νότιες ακτές της χώρας, ενώ στην καλοκαιρινή ζώνη (SRZ) ανήκουν οι υπόλοιπες περιοχές της Ν. Αφρικής (Philippon et al. 2012, Engelbrecht et al. 2015) (Σχήμα 1.9).

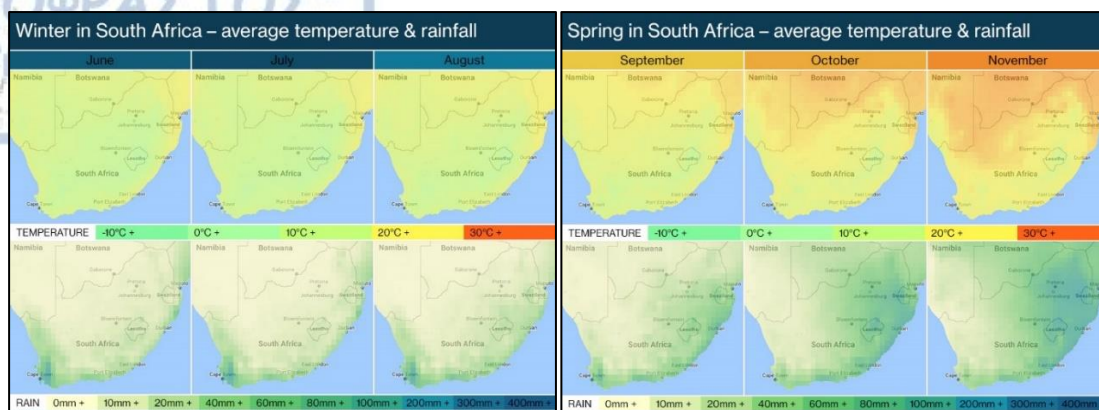
Σε βαθύτερη ανάλυση της καλοκαιρινής ζώνης βροχοπτώσεων (Σχήμα 1.10) διαπιστώνεται μια περαιτέρω χωρική ετερογένεια κατά την οποία οι βροχοπτώσεις

ξεκινούν αρχές καλοκαιριού στα ανατολικά της χώρας. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού επεκτείνονται χωρικά στις κεντρικές περιοχές της Ν. Αφρικής, ενώ στο τέλος του καλοκαιριού εμφανίζονται να επηρεάζουν και τις δυτικές περιοχές της Ν. Αφρικής (Engelbrecht and Landman 2016, Schulze and Kunz 1997).



Σχήμα 1.9. Μέση μηνιαία βροχόπτωση (περίοδος αναφοράς 1981-2010) σύμφωνα με τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της Ν. Αφρικής για τις τρεις διαφορετικές ζώνες ενδοετήσιας χρονικής κατανομής των βροχοπτώσεων (WRZ – Cape Town, SRZ – Johannesburg, ARZ – Port Elizabeth).



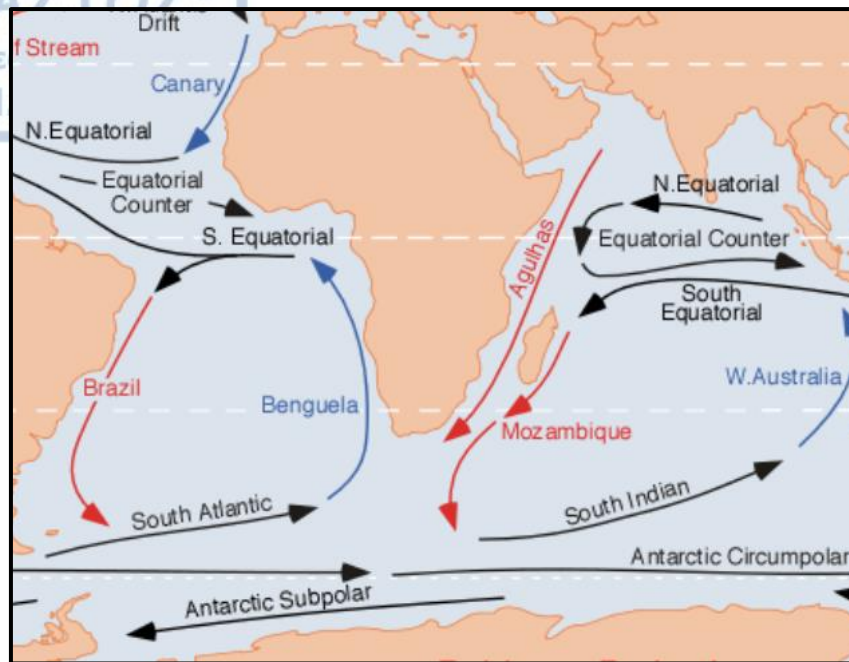


Σχήμα 1.10. Χάρτες μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) και μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) στην Ν. Αφρική (SAG 2021).

Η επίδραση των θαλάσσιων ρευμάτων

Δύο μεγάλα ωκεάνια ρεύματα διαρρέουν τις ακτές της Ν. Αφρικής και επηρεάζουν το κλίμα της: το ρεύμα Agulhas στην ανατολική και νότια ακτή και το ρεύμα Benguela κατά μήκος της δυτικής ακτής (Σχήμα 1.11). Το ρεύμα Agulhas είναι ένα θερμό ρεύμα δυτικού ορίου (Western boundary current) του Νοτιοδυτικού Ινδικού Ωκεανού (Lennard 2019) που ακολουθεί την ανατολική ακτή της Ν. Αφρικής με ροή νότια-νοτιοδυτική και περιστρέφεται προς τα ανατολικά, νότια του Ακρωτηρίου Αγκούλιας (Lutjeharms 2006). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η υγρασία και η ενέργεια από το ρεύμα μεταφέρονται στο εσωτερικό της χώρας μέσω της χερσαίας ροής αέρα διαμέσου του Great Escarpment και της κοιλάδας Limpopo και είναι ζωτικής σημασίας για τον σχηματισμό νετού στο εσωτερικό της χώρας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Jury et al. 1993).

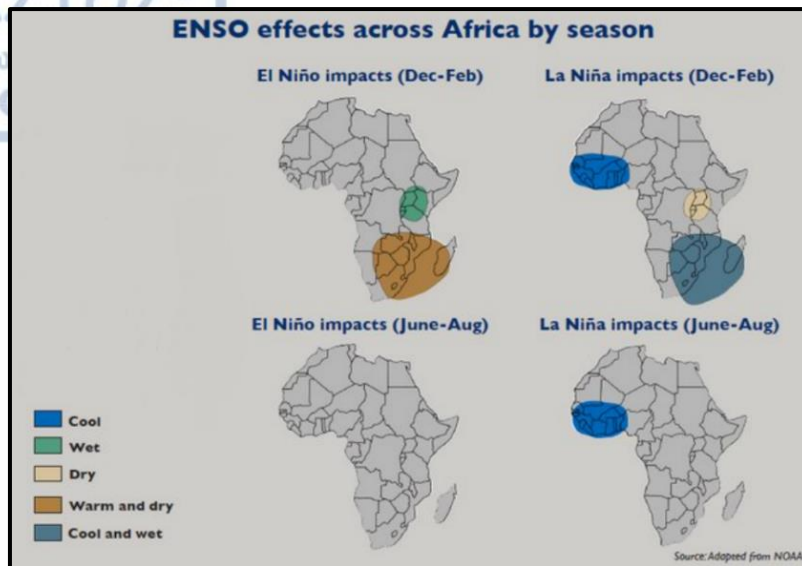
Το ρεύμα Benguela είναι ένα ψυχρό ωκεάνιο ρεύμα, συνέχεια του ρεύματος του Νότιου Ατλαντικού, που εκτρέπεται νότια της Αφρικής και ρέει προς τα βόρεια, παράλληλα των δυτικών ακτών της Ν. Αφρικής (Nicholson 2010). Μαζί με τον καθοδικό αέρα στο νότιο άκρο του κυττάρου Hadley είναι οι πρωταρχικοί λόγοι για τις άνυδρες και ημί-ξηρες συνθήκες στο δυτικό τμήμα της χώρας.



Σχήμα 1.11. Τα θαλάσσια ρεύματα (κόκκινο - θερμά, μπλε - ψυχρά) στον νότιο Ατλαντικό και στον Ινδικό Ωκεανό που επηρεάζουν το κλίμα της Ν. Αφρικής (Physical Geography 2007).

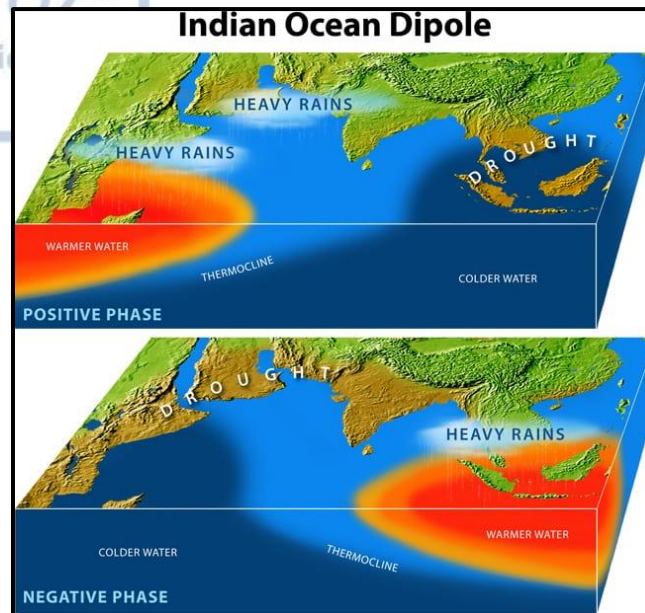
Η επίδραση των Τηλεσυνδέσεων (Teleconnections Patterns)

Το κλίμα της Ν. Αφρικής επηρεάζεται έντονα από τις ατμοσφαιρικές τηλεσυνδέσεις παγκόσμιας κλίμακας. Η Νότια ταλάντωση (Southern Oscillation - ENSO) που σχετίζεται με την μεταβολή των θερμοκρασιών των επιφανειακών υδάτων (Sea Surface Temperature - SST) στο ύψος του Ισημερινού στα ανατολικά του Ειρηνικού Ωκεανού, και διακρίνεται από τρεις φάσεις, επηρεάζει σημαντικά το κλίμα της Ν. Αφρικής κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Συγκεκριμένα, όταν οι SST είναι υψηλότερες από το μέσο όρο (φάση El Niño) τα καλοκαίρια στη Ν. Αφρική είναι ξηρότερα από το κανονικό, ενώ όταν οι SST είναι χαμηλότερες από το μέσο όρο (φάση La Niña) τα καλοκαίρια είναι πιο υγρά από το κανονικό (Reason and Rouault 2005, van Heerden et al. 1988). Επιπλέον, η εποχιακή συχνότητα των τροπικών κυκλώνων στον νοτιοδυτικό Ινδικό Ωκεανό είναι υψηλότερη κατά τη διάρκεια των ετών με ισχυρό El Niño και χαμηλότερη κατά τη διάρκεια ισχυρού La Niña (Fitchett and Grab 2014, Reason et al. 2000). Η μέγιστη ένταση ενός φαινομένου El Niño ή La Niña εμφανίζεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες του νότιου ημισφαιρίου οξύνοντας τις εκάστοτε επιδράσεις στην Ν. Αφρική (Σχήμα 1.12).



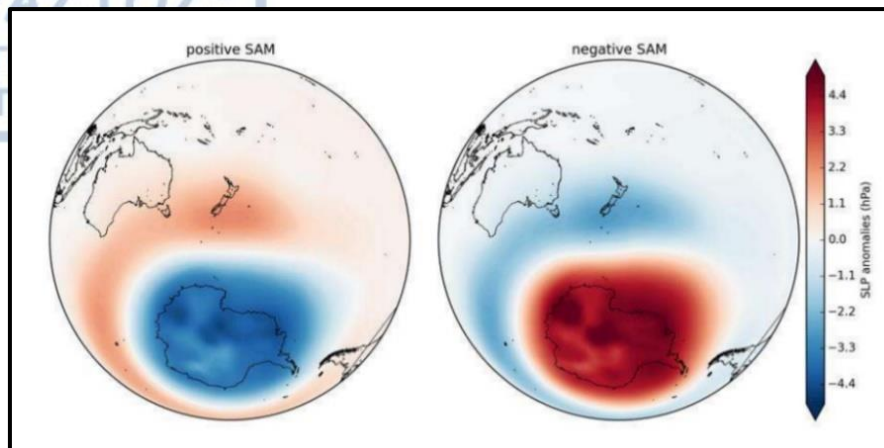
Σχήμα 1.12. Οι επιδράσεις των τιμών ENSO (El Niño / La Niña) στο καιρικό καθεστώς της Αφρικής σε εποχιακή βάση (NOAA 2019).

Δεύτερη τηλεσύνδεση που επηρεάζει το κλίμα της Ν. Αφρικής είναι το δίπολο του Υποτροπικού Ινδικού Ωκεανού (Indian Ocean Subtropical Dipole – IOSD). Στον Ινδικό Ωκεανό υπάρχει ένα παρόμοιο μοτίβο ταλαντώσεων μεταξύ θερμότερων και ψυχρότερων SST σαν αυτό του Ειρηνικού Ωκεανού, μεταξύ των ακτών της νοτιοανατολικής Αφρικής, νότια της Μαδαγασκάρης, και του ανατολικού Ινδικού Ωκεανού, στην περιοχή νότια της Ινδονήσιας και της βορειοδυτικής ακτής της Αυστραλίας. (Σχήμα 1.13). Όταν το νερό στα ανοικτά των ακτών της νοτιοανατολικής Αφρικής είναι θερμότερο (θετική φάση του IOSD), υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης βροχοπτώσεων στην περιοχή της Ν. Αφρικής κατά την θερινή περίοδο, καθώς υπάρχει περισσότερη υγρασία για σχηματισμό νετού και ταυτόχρονη μετακίνηση ανατολικότερα του αντικυκλώνα του Νότιου Ινδικού Ωκεανού (Dieppois et al. 2016). Αντίθετα, κατά την διάρκεια μιας αρνητικής φάσης του IOSD, οι SST στα ανοικτά των ακτών της νοτιοανατολικής Αφρικής είναι χαμηλότερες από το κανονικό και σε συνδυασμό με την μετακίνηση του αντικυκλώνα του Νότιου Ινδικού Ωκεανού δυτικότερα, παράκτια της Ν. Αφρικής, αυξάνεται η πιθανότητα μειωμένων, σε σχέση με τον μέσο όρο, βροχοπτώσεων το καλοκαίρι (Manatsa et al. 2011). Όπως και με το ENSO στον Ειρηνικό Ωκεανό, υπάρχει επίσης μια ουδέτερη φάση IOSD όταν δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση από τις μέσες τιμές SST του Ινδικού Ωκεανού.



Σχήμα 1.13. Απεικόνιση των επιδράσεων του δίπολου του Υποτροπικού Ινδικού Ωκεανού (IOSD) στις θερμοκρασίες των Ωκεανών και στις βροχοπτώσεις κατά την θετική (πάνω) και την αρνητική (κάτω) φάση στις περιοχές του Ινδικού Ωκεανού (WHOI 2021).

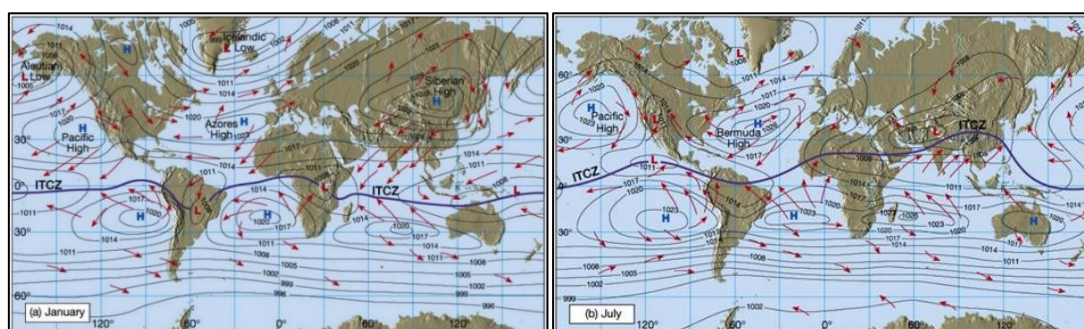
Η τρίτη τηλεσύνδεση που επηρεάζει το κλίμα της Νοτίου Αφρικής (SAF) είναι η Ανταρκτική Ταλάντωση (Antarctic Oscillation – AAO ή Southern Annular Mode - SAM). Η Ανταρκτική Ταλάντωση (AAO) αναφέρεται σ' ένα μοτίβο τροποσφαιρικών μεταβολών της κυκλοφορίας, ειδικότερα των γεωδυναμικών υψών νότια των 20° S (Σχήμα 1.14). Το δίπολο της ταλάντωσης χαρακτηρίζεται από ανωμαλίες πίεσης ενός σημείου στην Ανταρκτική και ενός σημείου 40° - 50° S. Κατά τη θετική φάση του AAO, τα γεωδυναμικά ύψη πάνω από την Ανταρκτική είναι χαμηλότερα των κλιματικών και στην ζώνη μεσαίου πλάτους είναι υψηλότερα των κανονικών (Lee et al 2019). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενδυνάμωση του πολικού στροβίλου και τη μετατόπιση των τροχιών των υφέσεων του Νότιου Ωκεανού νοτιότερα, περιμετρικά της Ανταρκτικής, και την μείωση των βροχοπτώσεων την χειμερινή περίοδο στη Ν. Αφρική. Κατά τη διάρκεια της αρνητικής φάσης του AAO ισχύει το αντίθετο όσον αφορά τις πιέσεις, με αποτέλεσμα το σπάσιμο του πολικού στροβίλου και την εμφάνιση μεσημβρινής κυκλοφορίας στο Νότιο ημισφαίριο, και μετατόπιση των υφέσεων σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα βαρομετρικά χαμηλά να επηρεάζουν την Ν. Αφρική κατά την χειμερινή περίοδο με φυσικό επακόλουθο την αύξηση των βροχοπτώσεων στην περιοχή (Reason and Rouault 2005).



Σχήμα 1.14. Απεικόνιση της επίδρασης της Ανταρκτικής Ταλάντωσης (AAO ή SAM) στην ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια (ανωμαλίες από την κλιματική τιμή, σε hPa) κατά την θετική (αριστερά) και την αρνητική (δεξιά) φάση στην Ανταρκτική (NIWA 2021).

Επίδραση εποχιακών και τοπικών παραγόντων

Η ενδοτροπική ζώνη σύγκλισης (InterTropical Convergence Zone – ITCZ), η ζώνη της Γης γύρω από τον Ισημερινό όπου συγκλίνουν οι θερμοί και υγροί αληγείς άνεμοι των δύο ημισφαιρίων, εμφανίζει ενδοετήσια κύμανση που εξαρτάται από την κλίση του άξονα της Γης. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, του Νοτίου Ημισφαιρίου, η μετατόπισή της νοτιότερα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός αυλώνα (Easterly wave) και τον σχηματισμό του ημιμόνιμου χαμηλού της Ανγκόλας (Angola Low) βόρεια της Ν. Αφρικής (Barry and Chorley 2009) (Σχήμα 1.15). Η ITCZ έχει οριστεί ως η περιοχή όπου οι αληγείς άνεμοι από το βόρειο και το νότιο ημισφαίριο συγκλίνουν (van Heerden et al. 1998).



Σχήμα 1.15. Απεικόνιση της θέσης της ενδοτροπικής ζώνης σύγκλισης (ITCZ) τον Ιανουάριο (αριστερά) και τον Ιούλιο (δεξιά). Στους χάρτες εμφανίζονται επίσης οι μέσες ατμοσφαιρικές πιέσεις επιφανείας (ισοβαρείς, σε hPa) με τα αντίστοιχα εποχιακά

συστήματα χαμηλών (L) και υψηλών (H) πιέσεων με τους επικρατέστερους ανέμους επιφανείας που τα συνοδεύουν (Lutgens and Tarbuck 2001)

Η μετατόπιση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα και την ταυτόχρονη μετακίνηση της ζώνης υψηλών πιέσεων των υποτροπικών περιοχών (καθοδική άκρη του δακτυλίου Hadley) νοτιότερα, υπεράκτια της Ν. Αφρικής. Αυτές οι δύο ταυτόχρονες μετατοπίσεις κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, του Νότιου Ημισφαιρίου, παρέχουν υγρασία στο εσωτερικό της χώρας με αποτέλεσμα την αύξηση των βροχοπτώσεων. Αντίθετα, η μετατόπιση της ITCZ βορειότερα (στο ύψος της Σαχάρας) κατά την διάρκεια του χειμώνα (JJA) και η ταυτόχρονη μετακίνηση της υποτροπικής ζώνης υψηλών πιέσεων σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη έχουν σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό εποχιακών υποτροπικών αντικυκλώνων πάνω από τους ωκεανούς που περιβάλλουν τη Ν. Αφρική, την μείωση της υγρασίας και την ελάττωση των βροχοπτώσεων στο εσωτερικό της χώρας (van Heerden et al. 1998). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του αφρικανικού κλίματος οδηγεί σε ανταγωνιστικές διαδικασίες που παράγουν ζωνικά ασύμμετρα μοτίβα ανέμου που δεν ακολουθούν πάντα αυτή την συνθήκη (Nicholson 2018).

Τέλος, κατά την διάρκεια του χειμώνα (JJA) μετατοπίζονται σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη οι κυκλώνες των μέσων γεωγραφικών πλατών ως αποτέλεσμα της ανατολικής μεταφοράς των βαροκλινικών δυτικών κυμάτων (ψυχρά μέτωπα). Ο αυλώνας (Westerly wave Low) που σχηματίζεται νότια της Αφρικής τροφοδοτεί με υγρασία τα νοτιοδυτικά της Ν. Αφρικής με αποτέλεσμα οι περιοχές αυτές να εμφανίζουν Μεσογειακό κλίμα (μέγιστο των βροχοπτώσεων κατά την χειμερινή περίοδο) (van Heerden et al. 1998).

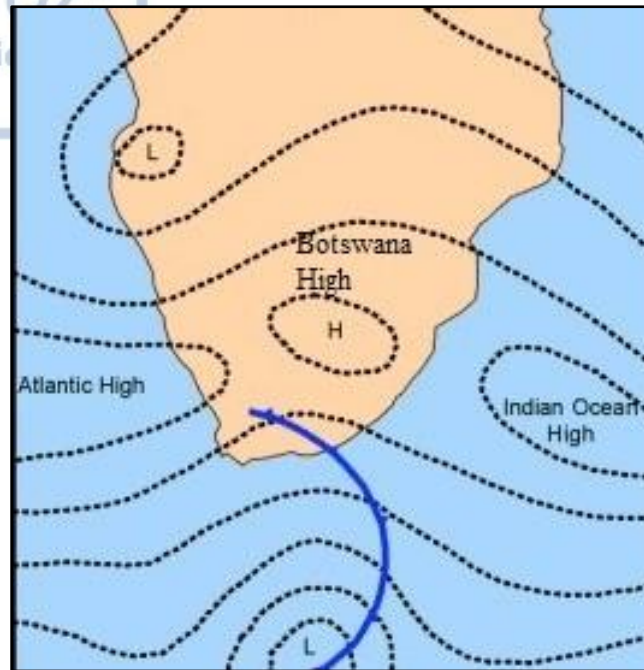
Συνοπτική κλιματολογία

Ο συνδυασμός και η αλληλεπίδραση των παραγόντων που προαναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση συγκεκριμένων μόνιμων και εποχιακών ατμοσφαιρικών συστημάτων συνοπτικής κλίμακας που διαμορφώνουν το καιρό και κατ' επέκταση το κλίμα της Ν. Αφρικής.

Αντικυκλώνας της Μποτσουάνας: Ο αντικυκλώνας της Μποτσουάνας (Botswana High ή Kalahari High) σχηματίζεται στο τέλος του χειμώνα, συνήθως τον Αύγουστο, πάνω από την Μποτσουάνα και στην συνέχεια ενισχύεται και επεκτείνεται νότια στο βόρειο τμήμα της Ν. Αφρικής κατά την διάρκεια της άνοιξης (SON) και του καλοκαιριού (DJF) με την μέγιστη έντασή του να εντοπίζεται τον Φεβρουάριο

και την εξασθένησή του από Μάρτιο και μετά (Σχήμα 1.16). Η θέση του (30° S) κατά την περίοδο αυτή έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας ζώνης υψηλών πιέσεων πάνω από την Ν. Αφρική που αποτελείται από τον αντικυκλώνα της Μποτσουάνας και τους δύο κύριους υποτροπικούς αντικυκλώνες που επηρεάζουν την Ν. Αφρική (αντικυκλώνας του Νότιου Ατλαντικού - South Atlantic High και αντικυκλώνας του Ινδικού Ωκεανού – Southern Indian Ocean High ή Mascarene High) (Driver and Reason 2017).

Ο αντικυκλώνας της Μποτσουάνας παρουσιάζει έντονη διαχρονική μεταβλητότητα που σχετίζεται με την Νότια Ταλάντωση (ENSO) στον Ειρηνικό Ωκεανό. Κατά την διάρκεια εκδήλωσης El Niño είναι συνήθως πιο ισχυρός ενώ, αντίθετα, κατά την διάρκεια εκδήλωσης La Niña είναι ασθενέστερος (Nicholson 1997). Η μεταβλητότητα αυτή επηρεάζει έντονα το βροχομετρικό καθεστώς της Ν. Αφρικής τους καλοκαιρινούς μήνες (DJF), καθώς μαζί με το χαμηλό της Ανγκόλας, τον αντικυκλώνα του Νότιου Ινδικού Ωκεανού και τη θέση της ενδοτροπικής ζώνης σύγκλισης την περίοδο αυτή, καθορίζουν την ανάπτυξη των τροπικών και εξωτροπικών ζωνών νεφώσεων (Cloud Band - Tropical Temperate Troughs - TTT) που αποτελούν το κύριο συνοπτικό σύστημα σχηματισμού βροχοπτώσεων το καλοκαίρι στην Ν. Αφρική και εισροής υγρασίας από τον Ινδικό Ωκεανό στα ανατολικά της ενδοχώρας. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι σε ισχυρά επεισόδια El Niño ένας ισχυρός αντικυκλώνας οδηγεί σε μείωση των βροχοπτώσεων κατά την καλοκαιρινή κυρίως περίοδο, επηρεάζοντας ταυτόχρονα και τις συχνότητες των ξηρών ακολουθιών (dry spells) με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της ξηρασίας. Κατά την διάρκεια του χειμώνα, η ενεργητική επίδραση του αντικυκλώνα στον σχηματισμό υετού στην Ν. Αφρική παύει καθώς η αναστροφή καθίζησης μειώνεται καθ' ύψος και έτσι διακόπτεται η τροφοδοσία υγρασίας από τον Ινδικό Ωκεανό στο εσωτερικό της χώρας λόγω τοπογραφικών παραγόντων που αναλύονται και στην συνέχεια της παρούσας ενότητας. Για την διάκριση αυτή κατά την διάρκεια του χειμώνα ο αντικυκλώνας αναφέρεται και σαν Kalahari High (Driver and Reason 2017).

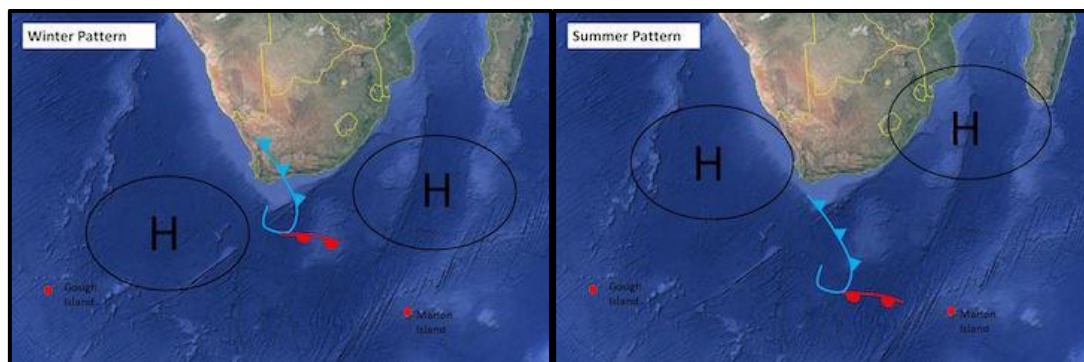


Σχήμα 1.16. Απεικόνιση της μέσης θέσης του αντικυκλώνα της Μποτσουάνας (Botswana High) τον Φεβρουάριο και των βαρομετρικών χαμηλών νότια της Ν. Αφρικής όπου οι τροχιές τους επηρεάζονται από τη θέση του αντικυκλώνα. Στον χάρτη εμφανίζονται και οι αντίστοιχες θέσεις του αντικυκλώνα του Νότιου Ινδικού Ωκεανού και του Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού (Lutgens and Tarbuck 2001).

Αντικυκλώνας του Νότιου Ινδικού Ωκεανού: Ο αντικυκλώνας του Νότιου Ινδικού Ωκεανού (Southern Indian Ocean High or Mascarene High) εκτείνεται από την περιοχή 25° – 35° S και 40° – 110° E και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις καιρικές και κλιματικές μεταβλητές της Ν. Αφρικής. Ο θερμός Δυτικός Ινδικός Ωκεανός είναι μια σημαντική πηγή υγρασίας για τα ανατολικά της ενδοχώρας, που μεταφέρεται μέσω των αληγών ανέμων, επιτρέποντας επίσης τη γένεση τροπικών κυκλώνων η πορεία των οποίων καθορίζεται από την θέση του αντικυκλώνα (Xulu et al. 2020). Επιπρόσθετα, έχει αποδειχθεί η σχέση μεταξύ των λειτουργιών SST πάνω από τον Ινδικό Ωκεανό και της ενίσχυσης ή αποδυνάμωσης του Mascarene High, καθώς και η σχέση μεταξύ της ενδοετήσιας μετακίνησης της ITCZ και της θέσης του αντικυκλώνα. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (DJF) το Mascarene High εκτοπίζεται βορειοδυτικά και τον χειμώνα (JJA) νοτιοανατολικά (Cook 1998, Goddard and Graham 1999).

Το καλοκαίρι η σύγκλιση υγρασίας πάνω από τη Ν. Αφρική ρυθμίζεται από το χαμηλό της Αγκόλας, όπου σε συνδυασμό με ένα ισχυρό Mascarene High (ηπειρωτική επέκταση) δημιουργούν μια απότομη κλίση πίεσης από βορρά προς νότο

που επιτρέπει τη μεταφορά υγρασίας στην ενδοχώρα από τις τροπικές περιοχές. Σε επεισόδια εμποδισμού (blocking) της κυκλοφορίας τον χειμώνα (JJA) από το Mascarene High οι τροπικοί κυκλώνες φαίνεται να αναβγαίνουν συχνότερα στις ανατολικές ακτές της χώρας (landfalls), και σε επεισόδια εμποδισμού κατά την διάρκεια του χειμώνα παρατηρούνται συχνότεροι εγκλωβισμοί των αποκομμένων, από την γενική κυκλοφορία, χαμηλών, με αποτέλεσμα την αύξηση των βροχοπτώσεων στην Ν. Αφρική και στις δύο περιπτώσεις (Xulu et al. 2020) (Σχήμα 1.17).



Σχήμα 1.17. Απεικόνιση των μέσων κλιματικών θέσεων τον χειμώνα (αριστερά) και το καλοκαίρι (δεξιά) του αντικυκλώνα του Νότιου Ατλαντικού ([H] στα αριστερά των εικόνων) και του αντικυκλώνα του Ινδικού Ωκεανού ([H] στα δεξιά των εικόνων) στην Νότια Αφρική. Στον χάρτη εμφανίζονται και οι αντίστοιχες θέσεις των μετώπων από τα βαρομετρικά χαμηλά που επηρεάζουν την περιοχή την αντίστοιχη εποχή (EUMeTrain 2012).

Αντικυκλώνας του Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού: Ο αντικυκλώνας του Νότιου Ατλαντικού (South Atlantic High - SAH ή St. Helena High) είναι ένα σύστημα υψηλών πιέσεων με το κέντρο του να εντοπίζεται 25° S και 15° W στον Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό. Ο ενδοετήσιος κύκλος του αντικυκλώνα έχει δύο μέγιστα τόσο στην ένταση όσο και στην έκτασή του, ένα τον Δεκέμβριο (αρχές καλοκαιριού) και ένα τον Ιούνιο (αρχές χειμώνα) (Morioka et al. 2011). Το κέντρο του κατά την διάρκεια του χειμώνα (JJA) είναι δυτικότερα σε σχέση με το καλοκαίρι (DJF), στο κέντρο του Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού και μετατοπισμένο σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Αντίθετα, το καλοκαίρι (DJF) το κέντρο του είναι πιο κοντά στον ισημερινό και στη δυτική πλευρά της λεκάνης του Νοτίου Ατλαντικού (Σχήμα 1.17). Παρόλο που οι διακυμάνσεις της θέσης του σε ετήσια βάση είναι μεγαλύτερες σε ζωνική κατεύθυνση (έως 40° γεωγραφικό μήκος από Μάιο έως Αύγουστο) από ότι

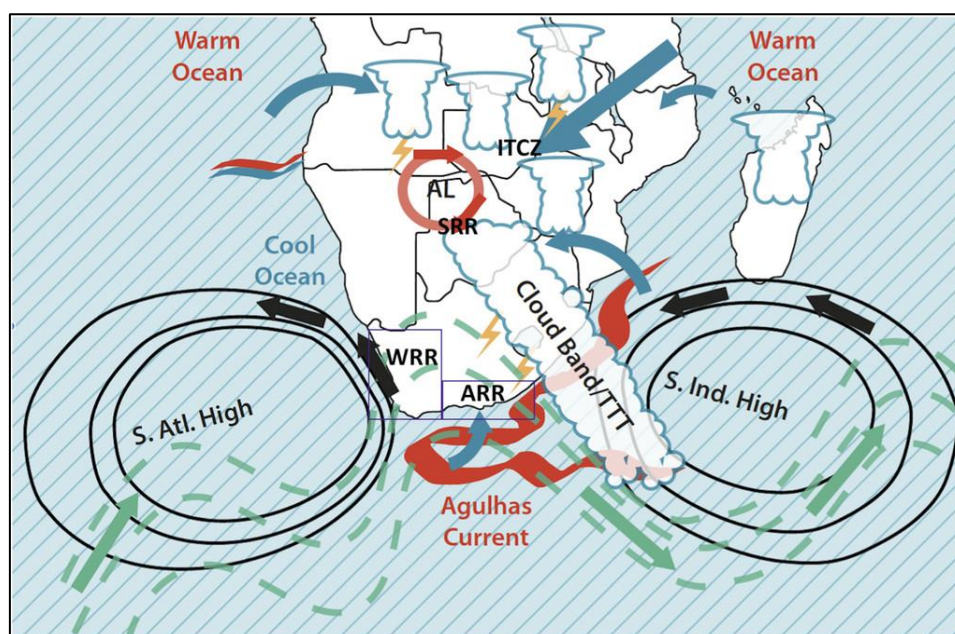
στη μεσημβρινή κατεύθυνση, η ένταση του υψηλού μειώνεται όταν τοποθετείται στα βόρεια (Sun, et al. 2017).

Αν και ο Ινδικός Ωκεανός λειτουργεί ως η κύρια πηγή υγρασίας για τη νότια Αφρική, η μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων στη χώρα σχετίζεται με την ένταση και τη θέση του SAH (Louw et al. 1998). Η δυτικότερη θέση του κατά την διάρκεια του χειμώνα (JJA) επιτρέπει την εισχώρηση στις νότιες και νοτιοδυτικές περιοχές της χώρας βαρομετρικών χαμηλών, αυξάνοντας τις βροχοπτώσεις την συγκεκριμένη περίοδο σε αυτές τις περιοχές, αλλά ταυτόχρονα η δυτικότερή του θέση μειώνει την μεταφορά υγρασίας από τον Ατλαντικό Ωκεανό στην ενδοχώρα. Αντίθετα, η βορειότερη και ταυτόχρονα ανατολικότερη θέση του κατά την διάρκεια του καλοκαιριού (DJF) ενισχύει την ζώνη σύγκλισης στα κεντρικά και ανατολικά της χώρας, των ψυχρών και ξηρών αερίων μαζών που μεταφέρονται από τον Ατλαντικό Ωκεανό και των θερμών και υγρών αερίων μαζών που μεταφέρονται από τον Ινδικό Ωκεανό. Ταυτόχρονα, όμως, λειτουργεί και ως εμποδιστής για την παρουσία υφέσεων στις δυτικές ακτές της Ν. Αφρικής με απόρροια την επικράτηση ξηρικών συνθηκών στις περιοχές αυτές την περίοδο του καλοκαιριού (Sun, et al. 2017) (Σχήμα 1.17).

Χαμηλό της Αγκόλας: Το χαμηλό της Αγκόλας (Angola Low) είναι ένα ρηχό χαμηλό που εντοπίζεται, από την επιφάνεια έως την στάθμη των 700 hPa, στο οροπέδιο της Αγκόλας και Ναμίμπιας, ανατολικά της οροσειράς Μόκο της Αγκόλας, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και είναι μια σημαντική περιοχή ελέγχου των τροπικών - εξωτροπικών ζωνών νεφών (TTTs) που είναι το κύριο συνοπτικό σύστημα βροχοπτώσεων της Ν. Αφρικής κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Cook et al. 2004) (Σχήμα 1.18).

Ένα ενισχυμένο Angola Low σχετίζεται με αυξημένη μεταφορά υγρασίας από τον Νοτιοανατολικό Ατλαντικό και ταυτόχρονη ενίσχυση των αληγών ανέμων που μεταφέρουν υγρασία στις υποτροπικές περιοχές. Αυτές οι διαδικασίες αυξάνουν τη σύγκλιση ανέμων χαμηλού επιπέδου στην περιοχή της Αγκόλας και στα νοτιοανατολικά της. Όταν συνδυαστεί με τη διέλευση ενός κύματος μεσαίου γεωγραφικού πλάτους, η ενίσχυση του Angola Low μπορεί να επιταχύνει το σχηματισμό ζωνών νεφών βορειοδυτικού - νοτιοανατολικού προσανατολισμού στην Ν. Αφρική. Αυτός ο μηχανισμός φαίνεται να συμβάλλει καθοριστικά στην εμφάνιση βροχοπτώσεων στις περιφερικές περιοχές της ζώνης TTTs (Hermes and Reason 2009).

Η διαχρονική μεταβλητότητα του Angola Low σχετίζεται με τη μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων σε ολόκληρη τη Ν. Αφρική (Cook et al. 2004). Κατά τα υγρά έτη (κυρίως την περίοδο JFM) υπάρχει αύξηση 10% της έντασης του Angola Low και συνδέονται με La Niña φάση, ενώ τα ξηρά έτη, την περίοδο Ιανουαρίου - Μαρτίου, σχετίζονται με μείωση κατά 20% της έντασης του Angola Low και El Niño φάσης. Η αύξηση της έντασης του χαμηλού κατά τη διάρκεια των υγρών ετών συνοδεύεται από βελτιωμένη μεταφορά υγρασίας από τον Νοτιοανατολικό Ατλαντικό και ισχυρότερη βορειοανατολική μεταφορά υγρασίας από τον δυτικό Ινδικό Ωκεανό. Αυτά τα δύο βελτιωμένα μονοπάτια μεταφοράς υγρασίας αυξάνουν το ρυθμό σύγκλισης στο εσωτερικό της Ν. Αφρικής (Vigaud et al. 2009, Munday and Washington 2017).



Σχήμα 1.18. Σχηματική απεικόνιση των κλιματικών θέσεων των βασικότερων σχηματισμών που επηρεάζουν το υετικό καθεστώς στην Ν. Αφρική (AL - Angola Low, ITCZ - InterTropical Convergence Zone, TTT - Tropical Temperate Trough). Στην εικόνα απεικονίζονται και οι αντικυκλώνες του Ινδικού και Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού καθώς και τα τρία διαφορετικά ενδοετήσια κλιματικά υετικά καθεστώτα στην Ν. Αφρική (WRR - Winter Rain Zone, SRR - Summer Rain Zone, ARR - Annual Rain Zone) (Hart et al. 2010).

Ο άνεμος Berg και το παράκτιο χαμηλό: Ένα ακόμη συνοπτικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει τις μετεωρολογικές συνθήκες και κατ' επέκταση το κλίμα της Ν. Αφρικής είναι ο άνεμος Berg. Συγκεκριμένα μία με δύο μέρες πριν την

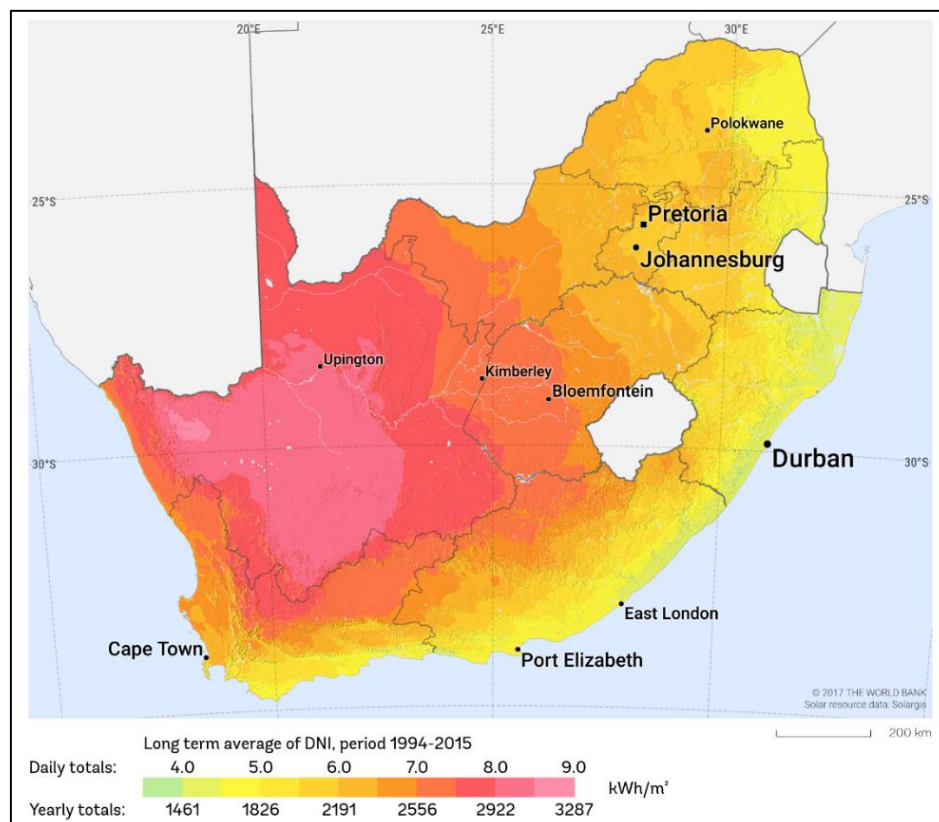
έλευση ενός ψυχρού μετώπου στις ακτές της χώρας παρατηρούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στις περιοχές αυτές σε συνδυασμό με πολύ χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας. Αυτές οι συνθήκες είναι αποτέλεσμα της υπεράκτιας ροής του ανέμου που δημιουργείται από το πλησιέστερο ψυχρό μέτωπο που μεταφέρει τον αέρα από το εσωτερικό της χώρας δια μέσου του Great Escarpment προς τη θάλασσα. Καθώς ο αέρας κινείται από τη σχετικά χαμηλότερη πίεση στις νότιες πλαγιές του Great Escarpment προς τη σχετικά υψηλότερη πίεση της ακτής, θερμαίνεται αδιαβατικά και δρα σαν καταβατικός άνεμος με αποτέλεσμα την επικράτηση αυτών των ξηροθερμικών συνθηκών. Τα επεισόδια καύσωνα (heat waves) στην παράκτια ζώνη της Ν. Αφρικής συνδέονται άμεσα με τον άνεμο Berg. Επίσης, οι άνεμοι Berg συνδέονται συχνά με ένα παράκτιο βαρομετρικό χαμηλό (Coastal Low), το οποίο είναι πολύ ρηχό και παγιδεύεται μεταξύ του Great Escarpment και του πλησιέστερου ψυχρού μετώπου. Το σύστημα σχηματίζεται στη δυτική ακτή καθώς το μετωπικό σύστημα πλησιάζει τις ακτές της Ν. Αφρικής και καθώς ο αέρας κατεβαίνει από το Great Escarpment αρχίζει να περιστρέφεται δεξιόστροφα (δεξιόστροφη είναι η περιστροφική κίνηση των βαρομετρικών χαμηλών στο νότιο ημισφαίριο και αριστερόστροφη αυτή των αντικυκλώνων). Το Coastal Low συνδέεται με τον σχηματισμό ομιχλών στην ανατολική παράκτια ζώνη της χώρας (Lennard 2019).

Tropical-Temperate Troughs: Μία από τις πιο σημαντικές συνοπτικές καταστάσεις στη Ν. Αφρική, την περίοδο του καλοκαιριού, είναι οι τροπικοί - εύκρατοι αυλώνες (Tropical-Temperate Troughs - TTT) (Σχήμα 1.18). Το TTT είναι μια ζώνη χαμηλής πίεσης που εκτείνεται από τις τροπικές περιοχές έως τα εύκρατα μεσαία γεωγραφικά πλάτη στην νότια Αφρική και μπορεί να θεωρηθεί ως μια ζώνη νεφών με βορειοδυτικό-νοτιοανατολικό προσανατολισμό (Hart et al. 2013). Τα TTTs σχηματίζονται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της τροπικής μεταφοράς υγρασίας (λόγω θέσης της ITCZ) και των διαταραχών στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Είναι στην ουσία το αποτέλεσμα της σύγκλισης από την υγρασία που παρέχεται από τα ανατολικά (Ινδικός Ωκεανός) και τα δυτικά (Ατλαντικός Ωκεανός). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτές οι ροές υγρασίας επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες και έτσι με την σειρά τους καθιστούν το TTT ένα ευκολομετάβλητο σύστημα. Αυτά τα συστήματα συμβάλλουν στο 30-60% των βροχοπτώσεων της χώρας που εμφανίζονται από Νοέμβριο έως Μάρτιο (θερινή περίοδο) και έως στο 45% του ετήσιου υετού σε χρονιές La Niña. Μέσης κλίμακας συστήματα (Mesoscale) σχηματίζονται εντός του TTT ως μονοκυτταρικές ή πολυκυτταρικές καταιγίδες και

προκαλούν βροχοπτώσεις στα κεντρικά και ανατολικά της ενδοχώρας της Ν. Αφρικής. Η θέση τους επηρεάζει σημαντικά την μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων στην χώρα ενδοετήσια και εποχιακά (Lennard 2019).

Φυσικοί παράγοντες καθορισμού του κλίματος

Η Ν. Αφρική βρίσκεται εντός των γεωγραφικών πλατών $\sim 22^\circ$ και 35° S και δέχεται κατά μέσο όρο ετησίως 1.4 kWh/m^2 με 3.3 kWh/m^2 (DNI - Direct Normalized Irradiance) (Solargis 2020) με τις μεγαλύτερες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας να εμφανίζονται στα δυτικά βορειοδυτικά της χώρας (Σχήμα 1.19).

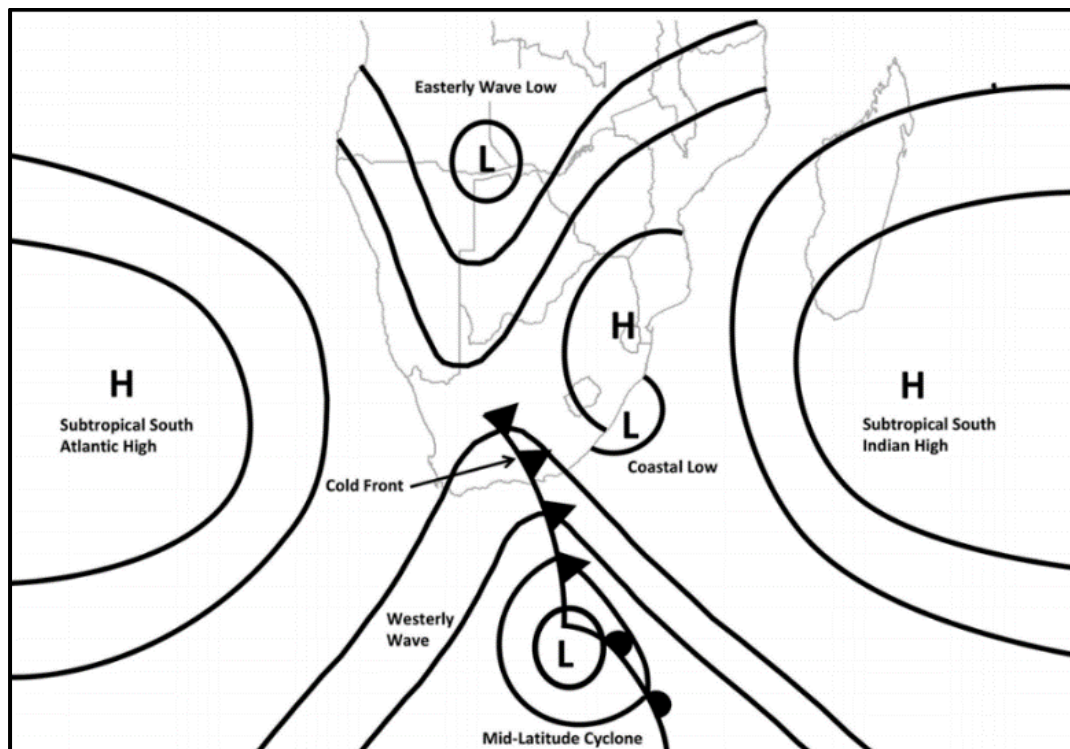


Σχήμα 1.19. Χάρτης μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m^2) στην Ν. Αφρική (<https://globalsolaratlas.info/map>).

Το Great Escarpment επηρεάζει τη δυτική ροή της κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας στα μέσα γεωγραφικά πλάτη κατά τη διάρκεια του χειμώνα (JJA) και την ανατολική ροή στις υποτροπικές περιοχές της κεντρικής Αφρικής κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του νοτίου ημισφαιρίου (DJF). Ετησίως σχηματίζονται αυλώνες χαμηλής πίεσης στο άκρο του ως αποτέλεσμα του κατερχόμενου αέρα, οι οποίοι δεν θα υφίσταντο εάν εξέλειπε ο Κρημνός. Αυτοί οι αυλώνες, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα «Επίδραση εποχιακών και τοπικών παραγόντων»,

ονομάζονται δυτικά (westerly wave) και ανατολικά (easterly wave) κύματα, αντίστοιχα (Harrison 1984) (Σχήμα 1.20).

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα (JJA), το πίσω μέρος του δυτικού κύματος (που βρίσκεται γενικά πάνω από το δυτικό ακρωτήριο) προκαλεί σύγκλιση επιφανείας, ανύψωση και βροχοπτώσεις, ενώ μπροστά από τον αυλώνα (γενικά πάνω από το εσωτερικό και ανατολικό τμήμα της χώρας στην περιοχή του αντικυκλώνα) υπάρχει καθίζηση, απόκλιση επιφανείας και αντικυκλωνικές συνθήκες.

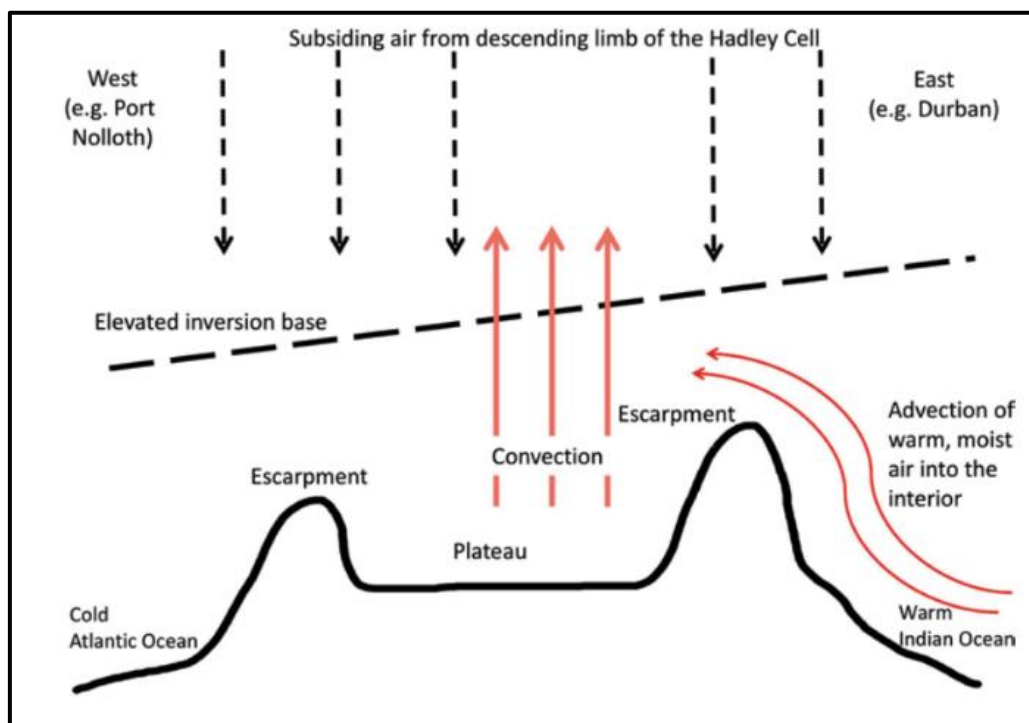


Σχήμα 1.20. Προβολή επιφανείας των συνοπτικών καιρικών συστημάτων που επηρεάζουν το κλίμα της Ν. Αφρικής (Tyson and Preston-Whyte 2000).

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (DJF), το πίσω μέρος του ανατολικού κύματος βρίσκεται πάνω από το εσωτερικό και ανατολικό τμήμα της χώρας και συνδέεται με σύγκλιση επιφανείας, ανύψωση, σχηματισμό νεφών και βροχοπτώσεις, ενώ μπροστά από τον αυλώνα, στα δυτικά της χώρας, εμφανίζεται επιφανειακή απόκλιση και ξηρές συνθήκες. Πρέπει να σημειωθεί ότι το Central Plateau δέχεται σημαντικά λιγότερες βροχοπτώσεις λόγω του υψομέτρου του και της ύπαρξης του Great Escarpment (Tyson and Preston-Whyte 2000).

Το Great Escarpment αλληλοεπιδρά και με την καθοδική άκρη του κυττάρου Hadley (Σχήμα 1.21) για να διευκολύνει ή να περιορίσει τη ροή υγρασίας από το θερμό Ωκεάνιο ρεύμα Agulhas στα ανατολικά της χώρας προς το εσωτερικό. Ο

δακτύλιος του Hadley εκτείνεται από τον Ισημερινό έως τους υποτροπικούς. Στην ισημερινή του άκρη προκαλείται ανοδική κίνηση του αέρα από μεταφορά του και ανύψωση από τις τροπικές περιοχές (Lennard 2019).



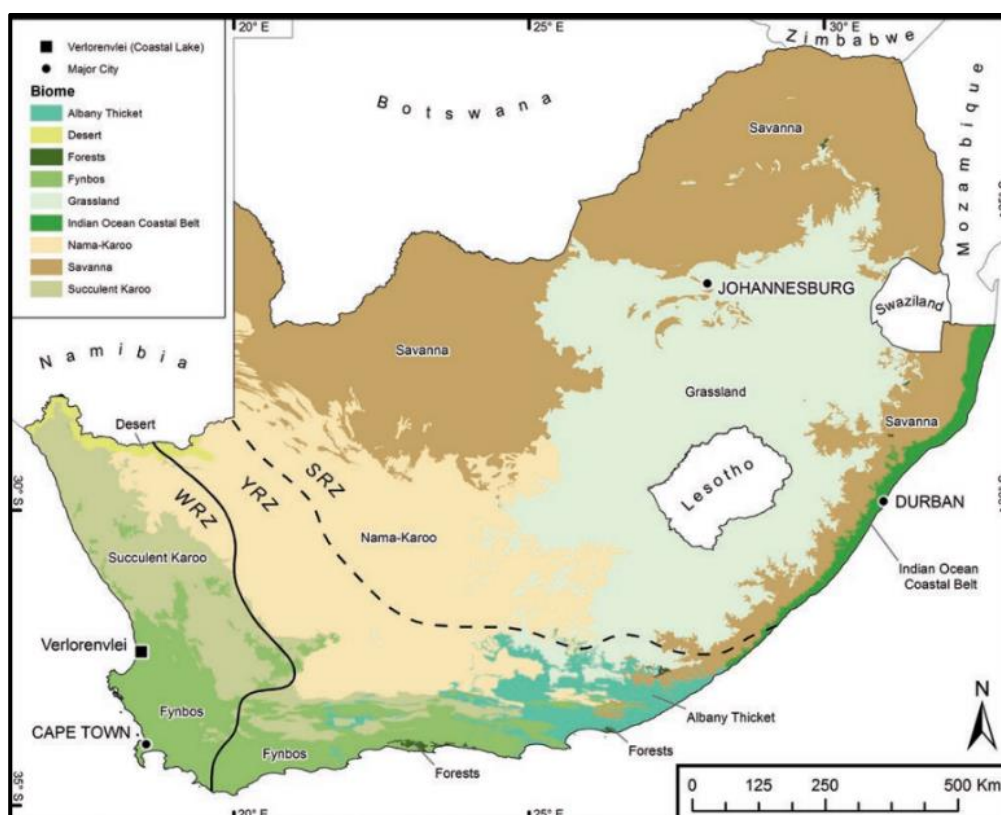
Σχήμα 1.21. Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης του κατερχόμενου κλάδου του κυττάρου του Hadley στην περιοχή της Νότιας Αφρικής (SAF) με την τοπογραφία και το Great Escarpment που έχει σαν αποτέλεσμα την εποχιακή μεταβολή της ροής υγρασίας από τον Ινδικό Ωκεανό στο εσωτερικό της Ν. Αφρικής (Lennard 2019).

Όταν ο ανερχόμενος αέρας φτάσει στην κορυφή της τροπόσφαιρας, αναγκάζεται να περιστραφεί προς μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Καθώς ο αέρας κινείται προς τους πόλους ψύχεται και βυθίζεται στις υποτροπικές περιοχές, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αντικυκλωνικού συστήματος. Πάνω από τη Ν. Αφρική, αυτός ο αιωρούμενος αέρας οδηγεί σε αυξημένη αναστροφή καθίζησης ύψους περίπου 3000 m πάνω από το εσωτερικό της χώρας το καλοκαίρι (Botswana High) και ύψους περίπου 1750 m το χειμώνα (Kalahari High) (Tyson and Preston-Whyte 2000). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (DJF), η βάση της αναστροφής της καθίζησης βρίσκεται πάνω από το Great Escarpment και η υγρασία από τον θερμό Ινδικό Ωκεανό μπορεί να φτάσει στο εσωτερικό της χώρας. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του χειμώνα (JJA), η βάση της αναστροφής της καθίζησης βρίσκεται κάτω από το Great Escarpment και εμποδίζει τη ροή υγρασίας στο εσωτερικό της χώρας, ενώ επίσης παγιδεύει ρύπους

στην περιοχή (Tyson et al. 1996). Επιπλέον, το Great Escarpment ευθύνεται για την ανάπτυξη του παράκτιου χαμηλού Coastal Low.

1.1.3. Βιοκλιματικές Ζώνες και Ο Πρωτογενής Τομέας

Η Ν. Αφρική εμφανίζει μια σειρά από βιοκλιματικές ζώνες (biomes), οι οποίες παρουσιάζουν έντονη βιοποικιλότητα και πλούσια ενδημικότητα. Το biome ορίζεται σαν ένα ευρύ οικοσύστημα (μεγαοοικοσύστημα) που αντιπροσωπεύει μια χαρακτηριστική κυρίαρχη ζώνη ζωής και εκτείνεται σε μια μεγάλη φυσική περιοχή (Rutherford and Westfall 1994).



Σχήμα 1.22. Απεικόνιση των βιοκλιματικών ζωνών (biomes) στην Ν. Αφρική (κατά Mucina and Rutherford 2006). Στην εικόνα απεικονίζονται τα όρια των τριών υετικών καθεστώτων στην Ν. Αφρική (WRZ - Winter Rain Zone, SRZ - Summer Rain Zone, ARZ - Annual Rain Zone) (Finch and Meadows 2019).

Η τρέχουσα ταξινόμηση (Mucina and Rutherford 2006) υποδιαιρεί τη χώρα σε Fynbos, Desert, Succulent Karoo, Nama-Karoo, Albany Thicket, Savanna, Grassland, Forest και Indian Ocean Coastal Belt (Σχήμα 1.22). Αυτές οι βιοκλιματικές ζώνες

έχουν βιώσει φυσικές και ανθρωπογενείς μεταβολές στη σύνθεση και έκτασή τους τόσο σε μακροπρόθεσμα όσο και σε πρόσφατα χρονικά διαστήματα (Masubelele et al. 2015), και προβλέπεται να συνεχίσουν να αλλάζουν στο μέλλον (Moncrieff et al. 2016). Στο Παράρτημα II αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά των βιοκλιματικών ζωνών της Ν. Αφρικής και οι συσχετίσεις τους με τις κλιματικές συνθήκες της χώρας.

Η γεωργία στην Νότια Αφρική

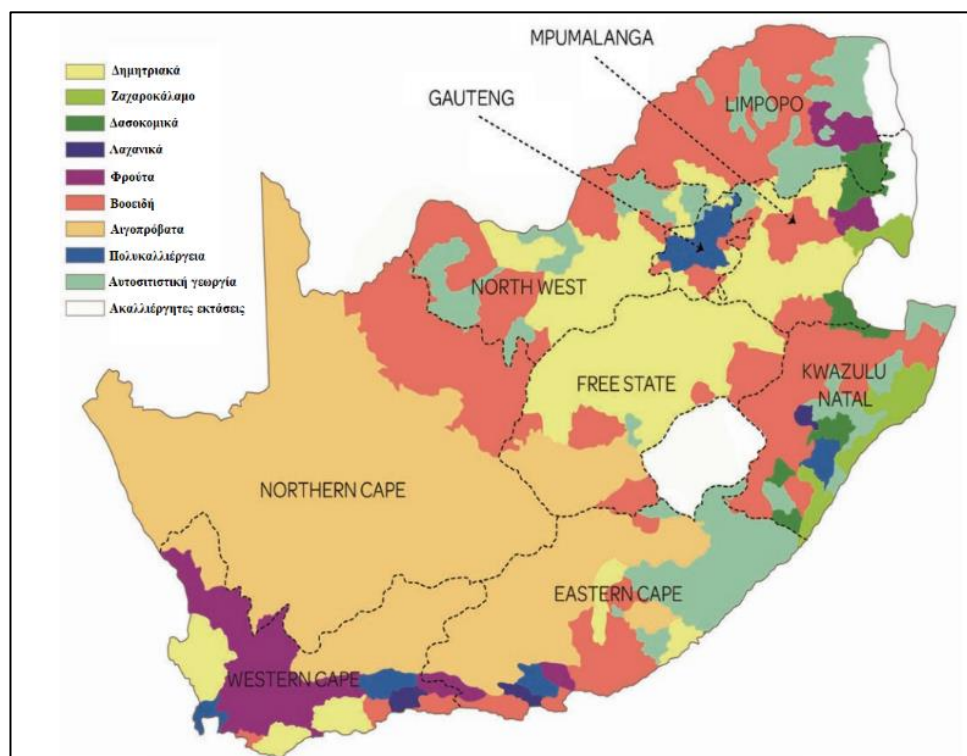
Η εμπορική γεωργία ασκείται σε 86 εκατομμύρια εκτάρια γης με δικαίωμα ελεύθερης ιδιοκτησίας. Επίσης, 15 εκατομμύρια εκτάρια με κοινοτικό τίτλο χρησιμοποιούνται για την κοινοτική γεωργία. Η γεωργία στη Ν. Αφρική παράγει ένα ευρύ φάσμα φυτικών προϊόντων (du Preez et al. 2019). Αν και μόνο το 2.4% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος της Ν. Αφρικής προέρχεται από τη γεωργία, η χώρα είναι ο τρίτος μεγαλύτερος εξαγωγέας γεωργικών προϊόντων στον κόσμο. Τα κύρια προϊόντα που παράγονται είναι τα σιτηρά (κυρίως καλαμπόκι και σιτάρι), ζαχαροκάλαμο, φρούτα και λαχανικά, κρέας και κρασί (FAOSTAT 2021).

Οι πολιτικές γης πριν από το 1994 προκάλεσαν στη Ν. Αφρική έναν καλά αναπτυγμένο εμπορικό γεωργικό τομέα και έναν υπανάπτυκτο κοινοτικό γεωργικό τομέα. Και οι δύο τομείς εξακολουθούν να λειτουργούν σήμερα είτε για καλλιέργεια είτε για κτηνοτροφία παρά τις σημαντικές πολιτικές και κοινωνικές αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί από το 1994 (DEAT 2007). Το κλίμα, ανεξάρτητα από τον γεωργικό τομέα, υπαγορεύει μαζί με το έδαφος τη θέση των περιοχών παραγωγής καλλιεργειών και, μαζί με τη βλάστηση, την τοποθεσία περιοχών ζωικής παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια η παραγωγή καλλιεργειών και η εκτροφή ζώων έχει εντατικοποιηθεί. Αυτή η εντατικοποίηση μπορεί να είναι καταστροφική για το έδαφος και τη βλάστηση επειδή και οι δύο φυσικοί πόροι είναι πολύ ευαίσθητοι στην υποβάθμιση. Εκτός από την υποβάθμιση της γης, η κλιματική αλλαγή και οι αξιώσεις γης μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τη μελλοντική παραγωγή και την ασφάλεια τροφίμων (du Preez et al. 2019).

Ταυτόχρονα με το εξαγωγικό πλεονέκτημα που δίνει ο πρωτογενής τομέας στην χώρα ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού εξαρτάται με τον ένα ή τον άλλο τρόπο από τη γεωργία. Το 2011, το 19.9% των συνολικών νοικοκυριών ασχολήθηκαν με τη γεωργία. Αυτό το ποσοστό μειώθηκε σε 13.7% το 2016. Κατά τη διάρκεια αυτής της πενταετούς περιόδου, ο αριθμός των αγροτικών νοικοκυριών μειώθηκε από 2.9 σε 2.3 εκατομμύρια, ενώ τα συνολικά νοικοκυριά αυξήθηκαν από 14.5 σε 16.9

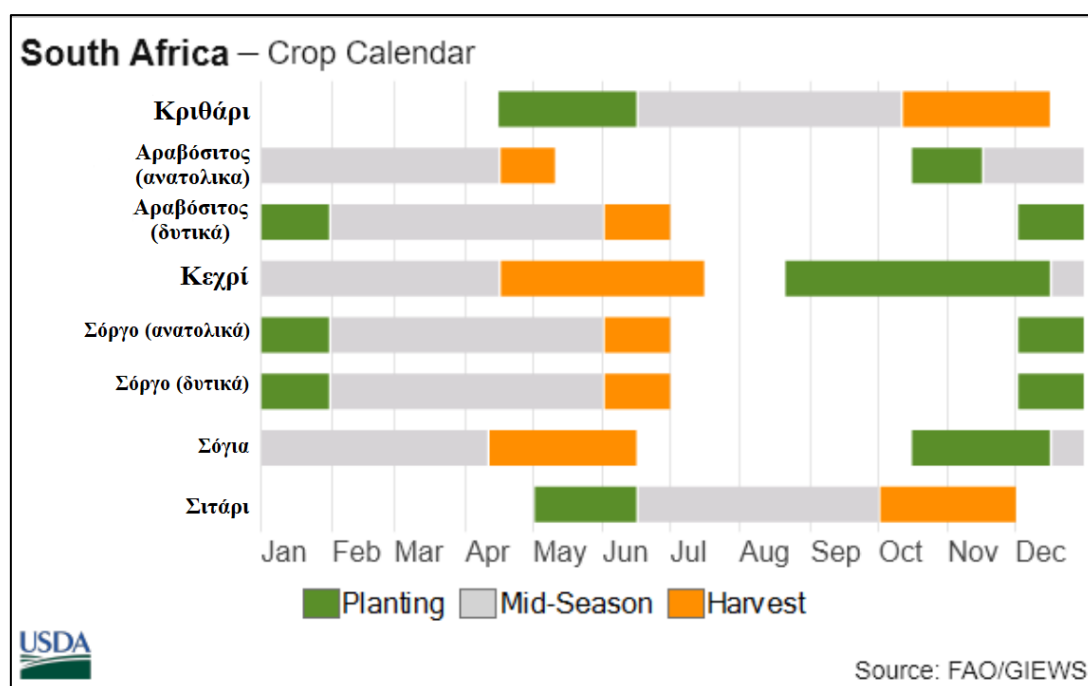
εκατομμύρια. Αυτή η μεγάλη μείωση μπορεί, εκτός από τη γενική διαδικασία αστικοποίησης, να οφείλεται πιθανώς στις σοβαρές ξηρασίες τα τελευταία χρόνια (Lehohla, StatsSA 2016). Σε μεμονωμένες επαρχίες, το υψηλότερο ποσοστό νοικοκυριών που ασχολήθηκαν με τη γεωργία το 2016 ήταν 27.6% στην επαρχία Eastern Cape. Αυτή ακολουθήθηκε με φθίνουσα σειρά από το Limpopo (24.1%), την KwaZulu-Natal (18.6%), την Mpumalanga (18.2%), το Free State (16.6%), το Northern Cape (13.8%) και το North West (13.4%). Αντίθετα, οι επαρχίες Gauteng και Western Cape είχαν τα χαμηλότερα ποσοστά με 4.9% και 3.6% αντίστοιχα (Lehohla, StatsSA 2016).

Η δυνητικά αρόσιμη γη στη Ν. Αφρική ανέρχεται σε 16.8 εκατομμύρια εκτάρια εκ των οποίων τα 14.2 εκατομμύρια εκτάρια προορίζονται για την εμπορική γεωργία και 2.6 εκατομμύρια εκτάρια για την κοινοτική γεωργία. Τα 12.9 εκατομμύρια εκτάρια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλλιεργειών, εκ των οποίων στα 11.5 εκατομμύρια εφαρμόζεται η ξηρική γεωργία και στα 1.4 εκατομμύρια η αρδευόμενη (DAFF 2016).



Σχήμα 1.23. Χάρτης διάκρισης των περιοχών της Ν. Αφρικής σύμφωνα με το κυρίαρχο γεωργικό είδος παραγωγής από οικονομικής άποψης (WWF 2010).

Το μεγαλύτερο μέρος των καλλιεργήσιμων εκτάσεων φυτεύεται με αραβόσιτο, ακολουθούμενη από σιτάρι και, σε μικρότερη κλίμακα, από ζαχαροκάλαμο και ηλιάνθο (Σχήμα 1.23). Περίπου 15.000 αγρότες παράγουν αραβόσιτο κυρίως στις επαρχίες North West, στο βόρειο και ανατολικό Free State, στη Mpumalanga Highveld και στο KwaZulu-Natal. Η τοπική κατανάλωση αραβοσίτου ανέρχεται περίπου στα 6.5 εκατομμύρια τόνους και το πλεόνασμα αραβοσίτου εξάγεται (Byrnes 1997). Το σιτάρι παράγεται στις περιοχές χειμερινών βροχοπτώσεων στο Western Cape και στα ανατολικά της επαρχίας Free State. Το κριθάρι παράγεται κυρίως στις νότιες παράκτιες πεδιάδες του Western Cape, αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 98% της τοπικής παραγωγής κριθαριού (Byrnes 1997). Το σόργο καλλιεργείται κυρίως στα ξηρότερα μέρη των θερινών βροχοπτώσεων. Οι αραχίδες καλλιεργούνται στις επαρχίες Mpumalanga, Free State και North West. Η Ν. Αφρική είναι ο δέκατος μεγαλύτερος παραγωγός σπόρων ηλιάνθου στον κόσμο με ετήσια συγκομιδή μεταξύ 186.300 και 780.000 τόνων (NDA 2019).



Σχήμα 1.24. Απεικόνιση της περιόδου σποράς και συγκομιδής μερικών από τις σημαντικότερες ετήσιες καλλιέργειες στην Ν. Αφρική (FAO 2021).

Επίσης, είναι ο δέκατος μεγαλύτερος παραγωγός ζάχαρης. Το μεγαλύτερο μέρος της καλλιέργειας εντοπίζεται στις παράκτιες περιοχές όπου χαρακτηρίζονται κλιματικά ελεύθερες από παγετό. Οπωροφόρα δέντρα καλλιεργούνται κυρίως στο Western Cape, καθώς και στην κοιλάδα Langkloof στο Eastern Cape (Byrnes 1997).

Η βιομηχανία κρασιού και οινοπνευματωδών ποτών της Ν. Αφρικής είναι μια από τις πιο ανεπτυγμένες στον κόσμο. Περίπου 4.500 παραγωγοί σταφυλιών έχουν 103.300 εκτάρια γης υπό καλλιέργεια, καθιστώντας τη Ν. Αφρική την 20η μεγαλύτερη αμπελουργική περιοχή στον κόσμο (Vink et al. 2012). Η παραγωγή εσπεριδοειδών περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό στις αρδευόμενες περιοχές της Northern επαρχίας, στη Mpumalanga, στα Eastern και Western Cape και στο KwaZulu-Natal (GAIN 2021). Η καλλιέργεια του ανανά εντοπίζεται στο Eastern Cape και στο βόρειο KwaZulu-Natal. Άλλες υποτροπικές καλλιέργειες όπως αβοκάντο, μάνγκο, μπανάνες, λίτσι, γκουάβα και παπάγια, παράγονται κυρίως στην Mpumalanga και στη Northern επαρχία (Byrnes 1997). Περίπου το 40% της καλλιέργειας πατάτας της χώρας καλλιεργείται στις υψηλότερες περιοχές του Free State και της Mpumalanga. Περίπου τα δύο τρίτα της συνολικής καλλιέργειας πατάτας της χώρας παράγεται υπό άρδευση (NDA 2019). Το βαμβάκι, που παράγεται κυρίως στη επαρχία Northern, αποτελεί το 74% των φυσικών ινών και το 42% όλων των ινών που μεταποιούνται στη Ν. Αφρική. Ο καπνός, κυρίως τύπου Βιρτζίνια, παράγεται κυρίως στη Mpumalanga και στη Northern επαρχία (Byrnes 1997). Στο Σχήμα 1.24 απεικονίζονται οι περίοδοι σποράς και συγκομιδής μερικών από τις σημαντικότερες ετήσιες καλλιέργειες στην Ν. Αφρική.

Γεωργική παραγωγή στην χειμερινή ζώνη βροχοπτώσεων (WRZ)

Η εμπορική γεωργία κυριαρχεί στην περιοχή των χειμερινών βροχοπτώσεων της Ν. Αφρικής. Το ανατολικό τμήμα της WRZ, με ετήσιες βροχοπτώσεις από 350 έως 500 mm, είναι κατά κύριο λόγο μια περιοχή καλλιέργειας σιτηρών (σιτάρι και κριθάρι) και κτηνοτροφίας. Στο δυτικό τμήμα της WRZ, το σιτάρι είναι η κύρια καλλιέργεια σε σύστημα μονοκαλλιέργειας. Ωστόσο, η αγρανάπαιση της γης ασκείται σε ποσοστό έως και 20% των 350.000 εκταρίων για την χειμερινή παραγωγή σιτηρών. Η ελαιοκράμβη, με ετήσια παραγωγή 94.000 τόνων, έχει αποκτήσει δυναμική τα τελευταία χρόνια ως εναλλακτική καλλιέργεια έναντι των σιτηρών (DAFF 2016). Επιπρόσθετα, η αμπελουργία είναι ιστορικά και πολιτιστικά μια σημαντική γεωργική δραστηριότητα στην ζώνη των χειμερινών βροχοπτώσεων ενώ ταυτόχρονα η εντατική καλλιέργεια λαχανικών και φρούτων, κυρίως υπό άρδευση, συμβάλλει επίσης στη γεωργική παραγωγή στην περιοχή αυτή (Van Rensburg et al. 2011).

Γεωργική παραγωγή στην θερινή ζώνη βροχοπτώσεων (SRZ)

Οι ετήσιες βροχοπτώσεις στην SRZ κυμαίνονται από 400 mm στα δυτικά της έως πάνω από 1.000 mm στα ανατολικά της. Περισσότερο από το 75% αυτών των βροχοπτώσεων σημειώνονται μεταξύ Νοεμβρίου και Μαρτίου, όμως η ξηρασία τους θερινούς μήνες (DJF) είναι ένα γενικό φαινόμενο που συμπίπτει με την περίοδο ανθοφορίας των θερινών καλλιεργειών προκαλώντας συχνά κακή ανθοφορία και χαμηλές αποδόσεις (du Preez et al. 2019). Το μεγαλύτερο ποσοστό της αρόσιμης γης στην ζώνη SRZ έχει χαμηλό έως μέτριο δυναμικό παραγωγής. Μέτριο έως υψηλό δυναμικό εμφανίζουν μόνο οι επαρχίες Gauteng, Limpopo και Mpumalanga (DAFF 2017). Ο αραβόσιτος, το σιτάρι, η σόγια, ο ηλίανθος, το κριθάρι, το σόργο, το ξηρό φασόλι και η αραχίδα είναι οι κύριες καλλιέργειες που παράγονται σε περίπου 9.7 εκατομμύρια εκτάρια ξηρών εκτάσεων από εμπορικούς ή κοινοτικούς αγρότες στην περιοχή των καλοκαιρινών βροχοπτώσεων (du Preez et al. 2019). Ο αραβόσιτος και το σόργο καλλιεργούνται σε μεγάλο βαθμό σε συστήματα μονοκαλλιέργειας, ενώ άλλα είδη καλλιεργούνται συχνότερα σε εναλλαγή (Hensley et al. 2006). Οι υποτροπικές και τροπικές καλλιέργειες φρούτων παράγονται σε περιοχές των επαρχιών KwaZulu-Natal, Mpumalanga και Limpopo όπου το κλίμα και τα εδάφη είναι κατάλληλα. Το ζαχαροκάλαμο είναι επίσης μια σημαντική καλλιέργεια σε αυτές τις περιοχές με ετήσια παραγωγή 17 εκατομμυρίων τόνων σε 452.000 εκτάρια (DAFF 2016). Επίσης, κηπευτικά και λαχανικά φυτεύονται υπό άρδευση στην περιοχή των βροχοπτώσεων το καλοκαίρι. Σε ορισμένες από τις αρδευόμενες περιοχές, για παράδειγμα κατά μήκος του ποταμού Vaal και των παραποτάμων του, η παραγωγικότητα αυτών των καλλιεργειών μειώνεται λόγω υπερχειλίσσης και αλάτωσης. Η παραγωγή των συγκεκριμένων καλλιεργειών υπό άρδευση έχει ωστόσο σταθεροποιητική επίδραση στην εθνική επισιτιστική ασφάλεια, καθώς ο κίνδυνος αποτυχίας των καλλιεργειών μειώνεται σε σχέση με τις ξηρές περιοχές που είναι επιρρεπείς στην ξηρασία (Rensburg et al. 2011).

Εντατικοποίηση του πρωτογενή τομέα στην Νότια Αφρική

Οι εκτάσεις που καλλιεργήθηκαν με αραβόσιτο και σιτάρι στην Ν. Αφρική έχουν μειωθεί σημαντικά κατά 34% και 72% αντίστοιχα, μέσα στην δεκαετία από το

1985 έως το 2014. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι μέσες αποδόσεις αραβοσίτου αυξήθηκαν από 9.2 σε 12.4 εκατομμύρια τόνους και του σιταριού από 1.8 σε 2.2 εκατομμύρια τόνους (DAFF 2016). Παρόμοιες τάσεις, όσον αφορά την έκταση που καλλιεργήθηκε και την απόδοση, παρατηρούνται για το κριθάρι, το ξηρό φασόλι, το σόργο, την αραχίδα και τον ηλιάνθο. Αντίθετα, οι εκτάσεις που καλλιεργήθηκαν με ελαιοκράμβη στην περιοχή WRZ και σόγιας στην περιοχή SRZ αυξήθηκαν σημαντικά την ίδια περίοδο, επιβεβαιώνοντας την αυξανόμενη δημοτικότητα αυτών των δύο καλλιεργειών στα συστήματα εναλλαγής καλλιεργειών. Όσον αφορά τις μέσες αποδόσεις των δύο αυτών καλλιεργειών, η ελαιοκράμβη εμφανίζει αυξητικές τάσεις σε αντίθεση με αυτήν της σόγιας όπου η μέση απόδοση της μειώθηκε από 1.61 tn/ha το 2009 σε 1 tn/ha το 2014. Τονίζεται ότι αυτή η μείωση στην μέση απόδοση συνδέθηκε έντονα με την ξηρασία (DAFF 2016).

Αυτές οι τάσεις δείχνουν μια συνολική εντατικοποίηση της παραγωγής των καλλιεργειών. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των εκμεταλλεύσεων προσαρμόστηκαν σε ένα πιο ανταγωνιστικό περιβάλλον. Για να επιτευχθεί αυτό, οι αγρότες χρησιμοποίησαν τους εδαφικούς πόρους πιο ορθολογικά, υιοθετώντας βελτιωμένες καλλιεργητικές πρακτικές και χρησιμοποιώντας ποικιλίες καλλιεργειών υψηλότερης απόδοσης. Η εφαρμογή της καλλιέργειας ακριβείας (π.χ. μεταβλητοί ρυθμοί πυκνότητας φυτού και εφαρμογής λιπασμάτων) συνέβαλε περαιτέρω στην αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Greenberg 2019). Ταυτόχρονα όμως, οι εισροές και το κόστος καλλιέργειας αυξήθηκαν διαμορφώνοντας ένα νέο απαιτητικό πλαίσιο όσο αφορά τις υπηρεσίες που παρέχονται στους γεωργούς. Εμφανίστηκαν νέες προκλήσεις ως προς την επισιτιστική ασφάλεια της χώρας που σχετίζονται με την ανασφάλεια των υδάτων για όλους τους αγρότες στη Ν. Αφρική, δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της χώρας είναι ξηρό ή ημίξηρο και υπόκειται σε ένα εξαιρετικά μεταβλητό κλίμα. Επιπρόσθετα τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα εμφανίζουν ένα υγρότερο - από το υφιστάμενο - ανατολικό τμήμα και ένα ξηρότερο, μελλοντικά, δυτικό τμήμα, με τη νότια παράκτια ζώνη να παρουσιάζει στο τέλος του αιώνα σημαντικά μικρότερη περίοδο βροχοπτώσεων (Maître et al. 2018) (Ενότητα 1.2.4.). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αβεβαιότητα σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργική παραγωγή της Ν. Αφρικής. Αυτή η εντατικοποίηση του πρωτογενή τομέα στην Ν. Αφρική φανέρωσε την ανάγκη παρεμβάσεων για τον μετριασμό των επιπτώσεων που απαιτούν έγκαιρη προειδοποίηση για ξηρασίες - κατά προτίμηση όσο το δυνατόν

νωρίτερα πριν από την περίοδο συγκομιδής (συνήθως αρχίζει τον Απρίλιο) και την περίοδο σποράς (συνήθως αρχίζει τον Νοέμβριο) (Shukla 2020).

1.2 ΞΗΡΑΣΙΑ

1.2.1. Ορισμοί, Τύποι και Χαρακτηριστικά της Ξηρασίας

Η ξηρασία είναι ένα ακραίο μετεωρολογικό - κλιματικό φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί χωρικά και χρονικά σε οποιαδήποτε περιοχή και χρόνο, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να έχει πολύ μεγάλο εύρος χρονικής διάρκειας (Burton et al. 1978, Wilhite and Glantz 1985, Wilhite 1993). Τα τελευταία χρόνια η μετεωρολογική έρευνα, εμφανίζει τα επεισόδια ξηρασίας να παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στη συχνότητα εμφάνισής τους σε πολλές περιοχές παγκοσμίως, με σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Η ξηρασία θεωρείται ως ένα από τα πιο δαπανηρά και διαδεδομένα φυσικά καταστροφικά φαινόμενα (Below et al. 2007). Η εμφάνισή της είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων και διαφέρει από τις άλλες ακραίες μετεωρολογικές καταστάσεις. Αρχικά, είναι δύσκολο να οριστεί η έναρξη και η λήξη ενός επεισοδίου ξηρασίας γιατί παρουσιάζει υστέρηση στην εμφάνιση από τη στιγμή που θα παρατηρηθεί η απουσία βροχοπτώσεων, ενώ οι καταστροφικές της επιπτώσεις μπορούν να συνεχιστούν και μετά την εμφάνιση βροχοπτώσεων στις πληγείσες περιοχές (για το λόγο αυτό θεωρείται ως «έρπον φαινόμενο», Tannehill 1947). Ταυτόχρονα, δεν υπάρχει ένας κοινός παγκόσμιος επιστημονικός ορισμός για την ξηρασία, καθώς κάθε περιοχή έχει το δικό της λειτουργικό ορισμό ανάλογα με την κλιματολογία και την τοπογραφία που την χαρακτηρίζει. Αυτό εξηγεί και το πλήθος των ορισμών που έχουν καταγραφεί στη διάρκεια των τελευταίων χρόνων (Gibbs for WMO 1975, Wilhite and Glantz 1985).

Επιπρόσθετα, το πώς ορίζεται η ξηρασία αλλάζει ανάλογα με το αντικείμενο της εκάστοτε επιστήμης. Για την μετεωρολογία, ξηρασία είναι ελάττωση της βροχόπτωσης σε σχέση με την κλιματική τιμή της για μια περιοχή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για την γεωργία σημαίνει δυσμενείς συνθήκες ανάπτυξης των φυτών και μη παραγωγική σοδειά αποτέλεσμα της έλλειψης του νερού στα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας. Για την υδρολογία και την υδρογεωλογία είναι πτώση της στάθμης των λιμνών, ποταμών και του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από κάποιο όριο για μία ορισμένη χρονική περίοδο, ενώ για την οικονομία ή την πολιτική, η

ξηρασία εμφανίζεται μόνο όταν υπάρχουν οικονομικοκοινωνικές επιπτώσεις (Anagnostopoulou et al. 2003).

Η ξηρασία μπορεί επίσης να επιδεινωθεί από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η αποψίλωση των δασών, η αλλαγή της χρήσης γης και η κακή διαχείριση των υδάτινων πόρων που τροφοδοτούν το κλίμα και μεταβάλλουν την αποθήκευση νερού στη γη (Sheffield et al. 2014). Ειδικότερα στην Αφρική η ξηρασία συνδέεται με υψηλή εποχιακή και διαχρονική μεταβλητότητα στις βροχοπτώσεις και ενώ αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 20% των φυσικών καταστροφών, ευθύνεται για πάνω από το 80% του πληγέντος πληθυσμού (UN / ISDR 2009). Μεγάλο μέρος της ηπείρου εξαρτάται από τη γεωργία που τροφοδοτείται από τις βροχοπτώσεις, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ευαίσθητη στην κλιματική μεταβλητότητα. Σχεδόν το 70% του εργατικού δυναμικού ασχολείται με τη γεωργική εργασία και η γεωργία συμβάλλει περίπου στο 25% του μέσου ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ) σε ολόκληρη την ήπειρο (Dixon et al. 2001). Όταν οι άμεσες επιπτώσεις της ξηρασίας στη γεωργία και τους υδάτινους πόρους εμφανίζονται σε αυτούς τους μεγάλους χώρους και χρονικές κλίμακες, υπάρχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στην ασφάλεια των τροφίμων και των υδάτων. Οι επιπτώσεις οφείλονται στη γενικά υψηλή ευπάθεια των τοπικών πληθυσμών και επιδεινώνονται από τις επικρατούσες τοπικές και εξωτερικές οικονομικές και πολιτικές συνθήκες στις αναπτυσσόμενες χώρες (Haile 2005). Οι επιπτώσεις μπορεί να σχετίζονται με την εμφάνιση συνθηκών υποσιτισμού και να συνδέονται με την εξάπλωση ασθενειών, οξύνοντας έτσι τα διαρθρωτικά προβλήματα προκαλώντας ανεργία, φτώχεια, μειώσεις στις αποδόσεις των καλλιεργειών, ακόμη και αναγκαστικές μεταναστεύσεις (Sheffield et al. 2014).

Ορισμοί της ξηρασίας

Οι ορισμοί της ξηρασίας, όπως προαναφέρθηκε, αντανakλούν τις διαφορετικές προσεγγίσεις της ξηρασίας ανάλογα με την περιοχή που εντοπίζεται, τις ανάγκες της περιοχής αυτής, και ανάλογα με τις διεπιστημονικές προσεγγίσεις. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι δεν μπορεί να δοθεί ένας περιεκτικός και ευρέως αποδεκτός ορισμός της ξηρασίας. Ο καταστροφικός χαρακτήρας της εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι οι υψηλές θερμοκρασίες, οι ισχυροί άνεμοι και η χαμηλή σχετική υγρασία (Oladipo 1985). Επίσης, η ξηρασία σχετίζεται με το χρόνο εμφάνισής της (καθυστέρηση στην έναρξη της υγρής περιόδου, απουσία βροχόπτωσης κατά τα στάδια ανάπτυξης των φυτών), αλλά και την

αποτελεσματικότητα των βροχοπτώσεων (π.χ. ένταση βροχόπτωσης, αριθμός επεισοδίων βροχόπτωσης, υγρές και ξηρές ακολουθίες). Έτσι κάθε επεισόδιο ξηρασίας μπορεί να θεωρηθεί μοναδικό με δικά του χαρακτηριστικά και επιπτώσεις (Μπαλτάς 2013).

Είναι σημαντικό να μην συγχέεται η ξηρασία με συναφείς έννοιες όπως η ανυδρία (aridity) όπου οι χαμηλές βροχοπτώσεις, οι οποίες δεν επαρκούν για την διατήρηση της βλάστησης (Wallen 1967), είναι ένα μόνιμο χαρακτηριστικό του κλιματικού περιβάλλοντος και της εποχικότητας με την έλλειψη του νερού να είναι ένα φυσιολογικό μέρος του ετήσιου κλιματικού καθεστώτος ή με την ερημοποίηση, όπου μια περιοχή της ανυδρίας μετατοπίζεται λόγω κακής διαχείρισης (White and Walcott 2009). Οι ορισμοί της ξηρασίας διακρίνονται σε δύο τύπους: (i) εννοιολογικοί και (ii) λειτουργικοί (Wilhite et al. 2006).

Εννοιολογικοί ορισμοί της ξηρασίας: Ένας εννοιολογικός ορισμός της ξηρασίας έχει ως στόχο να βοηθήσει τους ανθρώπους να κατανοήσουν την έννοια της ξηρασίας. Για παράδειγμα: Η ξηρασία είναι μια παρατεταμένη περίοδος έλλειψης βροχοπτώσεων με αποτέλεσμα εκτεταμένες ζημιές στις καλλιέργειες και την μείωση στην απόδοσή τους. Οι εννοιολογικοί ορισμοί παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της πολιτικής της ξηρασίας. Στην Αυστραλία, για παράδειγμα, ενσωματώνεται στον ορισμό η κατανόηση της φυσιολογικής μεταβλητότητας του κλίματος. Η χώρα παρέχει οικονομική βοήθεια προς τους αγρότες μόνο σε «ακραία επεισόδια ξηρασίας», όταν δηλαδή οι συνθήκες ξηρασίας είναι πέρα από εκείνες που θα μπορούσαν να θεωρηθούν φυσιολογικές. Η αποδοχή μιας ξηρασίας σαν εξαιρετική ξηρασία γίνεται σύμφωνα με την επιστήμη και με γνώμονα τις εκτιμήσεις. Παλαιότερα, όταν η έννοια της ξηρασίας ήταν λιγότερο καλά καθορισμένη από την άποψη της πολιτικής και λιγότερο καλά κατανοητή από τους αγρότες, ορισμένοι γεωργοί στις ημίξηρες περιοχές της Αυστραλίας ζητούσαν βοήθεια ξηρασίας κάθε λίγα χρόνια.

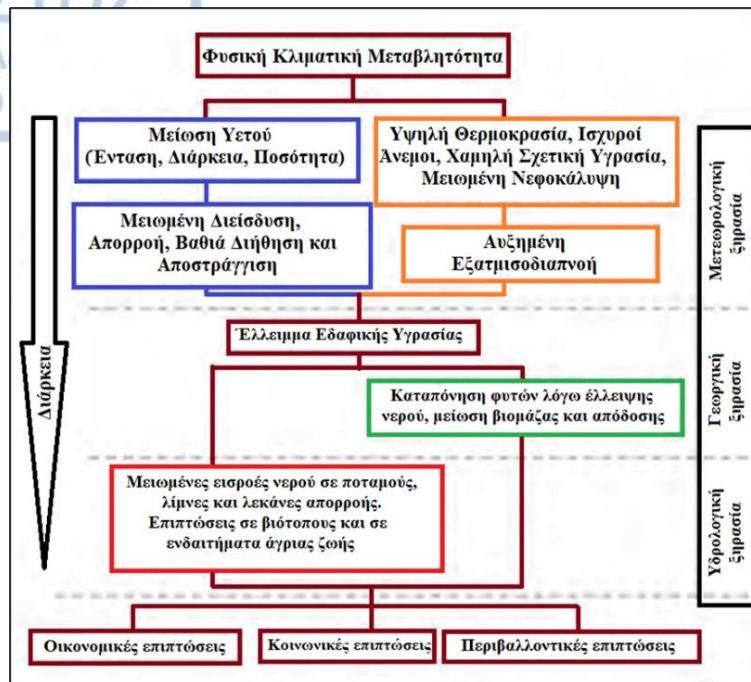
Λειτουργικοί ορισμοί ξηρασίας: Οι λειτουργικοί ορισμοί βοηθούν στον καθορισμό της έναρξης, της σοβαρότητας, και της λήξης της περιόδου ξηρασίας. Ένα πρόβλημα το οποίο δυσκολεύει τους αρμόδιους φορείς να χαράξουν πολιτική για την αντιμετώπιση της ξηρασίας και τον τρόπο με τον οποίο θα διαχειριστούν τους οικονομικούς πόρους είναι το ότι δεν υπάρχει ένα μοναδικό λειτουργικό σύστημα που να αναφέρεται στην ξηρασία και να λειτουργεί σε όλες τις περιπτώσεις (π.χ. σε όλες τις περιοχές). Αυτός είναι ο λόγος που οδήγησε τους επιστήμονες να βασίζονται

πλέον σε μαθηματικούς δείκτες έτσι ώστε να αποφασίσουν πότε θα αρχίσει η εφαρμογή της διατήρησης του νερού και πότε θα γίνει η έναρξη των μέτρων αντίδρασης στη ξηρασία.

Ένας λειτουργικός ορισμός πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια επιχειρησιακή αξιολόγηση της σοβαρότητας της ξηρασίας και των επιπτώσεων αυτής. Για την εφαρμογή του απαιτούνται δεδομένα που θα προέλθουν από την παρακολούθηση μετεωρολογικών μεταβλητών. Τέτοια δεδομένα αποτελούν, για παράδειγμα, η υγρασία του εδάφους και οι συνθήκες καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Ένας λειτουργικός ορισμός πρέπει συνεχώς να επαναξιολογεί τον ενδεχόμενο αντίκτυπο των συνθηκών αυτών στην τελική απόδοση των καλλιεργειών. Λειτουργικοί ορισμοί μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για την ανάλυση της συχνότητας της ξηρασίας, της σοβαρότητας και της διάρκειας για μια δεδομένη ιστορική περίοδο. Οι ορισμοί αυτοί ωστόσο, απαιτούν πληροφορίες για τον καιρό σε ωριαία, ημερήσια, μηνιαία ή άλλη χρονική κλίμακα καθώς επίσης και στοιχεία για τις επιπτώσεις (π.χ., στην απόδοση των καλλιεργειών), ανάλογα με τη φύση του ορισμού που εφαρμόζεται.

Τύποι Ξηρασίας

Η ξηρασία διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες: τη μετεωρολογική, την υδρολογική, τη γεωργική και την κοινωνικοοικονομική ξηρασία (Wilhite and Glantz 1985, Wilhite 2000). Οι διάφορες μορφές ξηρασίας δεν παρουσιάζονται πάντα ξεχωριστά, αντίθετα μπορεί να συνδυάζονται ή να διαδέχονται η μία την άλλη (Σχήμα 1.25).



Σχήμα 1.25. Οι τύποι της ξηρασίας και οι σχέσεις μεταξύ τους (μτφ από Wilhite 2000).

Η πιο γνωστή και ευρέως εφαρμοζόμενη κατηγοριοποίηση του φαινομένου της ξηρασίας προτείνεται από τον Wilhite (2000):

Η **μετεωρολογική ξηρασία** (meteorological drought) εκφράζεται ως σύγκριση των βροχοπτώσεων με τις κανονικές ή τις μέσες τιμές βροχόπτωσης. Η ξηρασία σε κάθε περιοχή ή χώρα καθορίζεται ως το 60%, ή λιγότερο, του κανονικού ετήσιου υετού για περισσότερο από δύο συνεχόμενα έτη σε έκταση μεγαλύτερη του 50% της περιοχής (WMO 1986). Άλλοι ορισμοί της μετεωρολογικής ξηρασίας βασίζονται στον αριθμό ημερών βροχόπτωσης κάτω από κάποιο συγκεκριμένο όριο, αλλά δεν είναι εφικτοί σε περιοχές, όπου η κατανομή του υετού παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, ή σε περιοχές, όπου τα επεισόδια ξηρασίας είναι πολύ συχνά. Ο ορισμός της μετεωρολογικής ξηρασίας παρουσιάζει ιδιαίτερο τοπικό χαρακτήρα, καθώς η ατμοσφαιρική κυκλοφορία που επηρεάζει τις βροχοπτώσεις έχει και αυτή τοπικό χαρακτήρα, ενώ η ένταση του φαινομένου, καθώς και η διάρκεια του, είναι τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του τύπου ξηρασίας (Μπαλτάς 2013).

Τα σύνολα δεδομένων που απαιτούνται για την εκτίμηση της μετεωρολογικής ξηρασίας είναι καθημερινές μετρήσεις που σχετίζονται με τις βροχοπτώσεις, τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την πίεση και την εξάτμιση.

Η **γεωργική ξηρασία** (agricultural drought) συνδέει την μετεωρολογική ξηρασία με τις επιπτώσεις στη γεωργία, εστιάζοντας κυρίως στην έλλειψη υετού, στη διαφορά

μεταξύ πραγματικής και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, στο εδαφικό νερό, κ.α. Η ανάγκη ενός φυτού σε νερό εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του είδους του, το στάδιο ανάπτυξής του, καθώς και από τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Τονίζεται ότι μια σημαντική ξηρή περίοδος κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου μπορεί να έχει μικρές έως και ανύπαρκτες επιπτώσεις στη γεωργία. Αν όμως αυτή η κατάσταση συνεχιστεί και κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου τότε οι επιπτώσεις στην γεωργία είναι σημαντικές έως και καταστροφικές (Μπαλτάς 2013).

Τα σύνολα δεδομένων που απαιτούνται για την εκτίμηση της γεωργικής ξηρασίας είναι η υφή, η γονιμότητα και η υγρασία του εδάφους, ο τύπος και η έκταση των καλλιεργειών, οι απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό, τα παράσιτα και το κλίμα.

Η **υδρολογική ξηρασία** (hydrological drought) είναι αυτή που σχετίζεται με τα αποτελέσματα που έχει μια περίοδος με ύψος υετού μικρότερο από τη μέση τιμή, σε συνδυασμό με τα χαμηλά υδατικά αποθέματα του εδάφους και του υπεδάφους (π.χ. απορροή υδατορευμάτων, στάθμη λιμνών, υπόγειων υδάτων). Η υδρολογική ξηρασία συνήθως παρουσιάζει υστέρηση στην εμφάνισή της σε σχέση με την μετεωρολογική και τη γεωργική. Μόλις καταγραφεί η έλλειψη υετού η μετεωρολογική ξηρασία εμφανίζεται αμέσως, αντίθετα η εμφάνιση της γεωργικής ξηρασίας εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους. Κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου ξηρασίας υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός μεταξύ των διάφορων χρηστών για το νερό, καθώς χρησιμοποιείται για διαφορετικούς σκοπούς (άρδευση, ύδρευση, υδρολογική ενέργεια κ.α.) (Μπαλτάς 2013).

Τα σύνολα δεδομένων που απαιτούνται για την αξιολόγηση της υδρολογικής ξηρασίας είναι η επιφάνεια και ο όγκος των επιφανειακών υδάτων, οι επιφανειακές απορροές, οι μετρήσεις ροής, η διήθηση και οι διακυμάνσεις των επιφανειακών υδάτων.

Η **κοινωνικοοικονομική ξηρασία** (socioeconomic drought) σχετίζεται με τα αποθέματα και τις απαιτήσεις ορισμένων οικονομικών αγαθών ή υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις τρεις προηγούμενες μορφές ξηρασίας. Όσο τα αποθέματα μειώνονται οι ανάγκες των αγαθών γίνονται εντονότερες, με αποτέλεσμα τις σοβαρές επιπτώσεις στην κοινωνική και οικονομική κατάσταση μιας περιοχής. Οι επιπτώσεις της ξηρασίας δεν έχουν ιδιαίτερη δομή και παρουσιάζονται διάσπαρτες σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές προκαλώντας σπάνια υλικές ζημιές. Έτσι ο ποσοτικός

προσδιορισμός των ζημιών που μπορεί να προκαλέσει η ξηρασία είναι δύσκολος (Μπαλτάς 2013).

Τα σύνολα δεδομένων που απαιτούνται για την αξιολόγηση της κοινωνικοοικονομικής ξηρασίας είναι ο πληθυσμός των ανθρώπων και των ζώων στην περιοχή, ο ρυθμός ανάπτυξης, οι απαιτήσεις για νερό για την ικανοποίηση του συνόλου των αναγκών (ύδρευσης, άρδευσης, γεωργίας, κτηνοτροφίας, βιομηχανίας) και η σοβαρότητα της αποτυχίας των καλλιεργειών.

Χαρακτηριστικά της ξηρασίας

Τρία είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των επεισοδίων ξηρασίας: η ένταση, η διάρκεια και η χωρική κατανομή.

Η **ένταση** της ξηρασίας η οποία αναφέρεται στο ποσοστό μείωσης της βροχόπτωσης και στη σοβαρότητα των επιπτώσεων από την έλλειψη υετού. Γενικά, μπορεί να καθοριστεί με τον υπολογισμό διάφορων δεικτών ξηρασίας, οι οποίοι υπολογίζονται κυρίως με βάση την βροχόπτωση (Anagnostopoulou et al. 2003, Μπαλτάς 2013).

Η **διάρκεια** της ξηρασίας. Ένα επεισόδιο ξηρασίας, μπορεί να παρουσιάζει χρονική υστέρηση σε σχέση με την αρχική ελάττωση ή την πλήρη απουσία υετού σε μια περιοχή, στη συνέχεια όμως μπορεί να διατηρείται για μήνες ή και για χρόνια, παρά το γεγονός ότι στο διάστημα αυτό μπορεί να καταγραφούν βροχοπτώσεις μικρής όμως σημαντικότητας (Anagnostopoulou et al. 2003, Μπαλτάς 2013).

Η **χωρική κατανομή** της ξηρασίας. Η χωρική κλίμακα στην οποία μπορεί να εμφανιστεί μια ξηρασία κυμαίνεται από πολύ τοπική έως σχεδόν ηπειρωτική. Η γνώση της χωρικής κατανομής της ξηρασίας έχει πολύ μεγάλη σημασία.

Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστή η **πιθανότητα** που έχει ένα επεισόδιο ξηρασίας να επηρεάσει μια περιοχή, καθώς και να είναι δυνατός ο καθορισμός των πιθανών επιπτώσεων που θα υπάρξουν (Μπαλτάς 2013).

1.2.2. Δείκτες Ξηρασίας

Η ξηρασία σαν «έρπον φαινόμενο» μπορεί να παρακολουθηθεί αρκετά αποτελεσματικά. Η κατά κανόνα αργή έναρξή της προσφέρει χρόνο για να παρατηρηθούν οι αλλαγές στις βροχοπτώσεις, στη θερμοκρασία και σε άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, καθώς και στη συνολική κατάσταση της βλάστησης και των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σε μια περιοχή.

Οι δείκτες ξηρασίας χρησιμοποιούνται συχνά για την παρακολούθηση της ξηρασίας και διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή και την εποχή. Η επιλογή του κατάλληλου δείκτη ξηρασίας καθορίζεται, κατά κανόνα, από τον τύπο των επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο πλαίσιο παρακολούθησής της και έγκαιρης προειδοποίησης. Η εκτίμηση αυτών των επιπτώσεων είναι περίπλοκη, καθώς κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες, εκτός από τη φύση της ξηρασίας, επηρεάζουν τα επίπεδα και τους τύπους επιπτώσεων που σχετίζονται με την έκθεση και την ευπάθεια σε αυτή. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η ξηρασία επηρεάζει τους ανθρώπους, τις κοινότητες, τις επιχειρήσεις και άλλους οικονομικούς τομείς είναι καθοριστικής σημασίας για τη λήψη μέτρων για τον μετριασμό των επιπτώσεων των μελλοντικών επεισοδίων ξηρασίας.

Τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για την ξηρασία στοχεύουν συνήθως στην παρακολούθηση, στην αξιολόγηση και στην παροχή πληροφοριών σχετικά με τις κλιματολογικές και υδρολογικές συνθήκες, καθώς και τις συνθήκες και τις τάσεις παροχής νερού. Στην ιδανική περίπτωση έχουν και ένα στοιχείο παρακολούθησης (συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων) και ένα στοιχείο πρόβλεψης. Ο στόχος τους είναι η παροχή έγκαιρης πληροφόρησης πριν την έναρξη ή και κατά τη διάρκεια της ξηρασίας ώστε να προωθηθούν δράσεις (μέσω κατωφλίων) στα πλαίσια ενός σχεδίου διαχείρισης του κινδύνου ξηρασίας, σαν μέσο μείωσης των πιθανών επιπτώσεων. Μια επιμελής και ολοκληρωμένη προσέγγιση είναι ζωτικής σημασίας για την παρακολούθηση ενός κινδύνου αργής έναρξης όπως είναι η ξηρασία.

Ορισμός δεικτών ξηρασίας

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO 1992) ως δείκτης ξηρασίας ορίζεται «ένας δείκτης ο οποίος σχετίζεται με κάποιες από τις σωρευτικές συνέπειες μιας παρατεταμένης και ανώμαλης ανεπάρκειας υγρασίας». Οι Δείκτες Ξηρασίας ή Ξηρότητας, είναι στην ουσία αριθμητικοί δείκτες μέτρησης, έτσι ώστε να είναι εφικτή η αναγνώριση και η καταγραφή της έντασης και της έκτασης των επεισοδίων ξηρασίας, καθώς επίσης και η δυνατότητα αξιολόγησής της, όχι μόνο σε τοπικό επίπεδο, αλλά και σε μια ευρύτερη περιοχή.

Ακριβώς όπως δεν υπάρχει ορισμός για την ξηρασία που περικλείει όλες τις πτυχές της, έτσι δεν υπάρχει δείκτης ξηρασίας που να μπορεί να αντιπροσωπεύει και να εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους ξηρασίας, κλιματικών καθεστώτων και τομέων που επηρεάζονται από την ξηρασία.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά κριτήρια τα οποία κάθε δείκτης ξηρασίας θα πρέπει να πληροί σύμφωνα με τον Friedman (1957):

- θα πρέπει το χρονικό διάστημα να είναι κατάλληλο για υπολογισμούς.
- θα πρέπει ο δείκτης να είναι μια ποσοτική μέτρηση μεγάλης κλίμακας παρατεταμένων συνθηκών ξηρασίας.
- θα πρέπει να είναι εφαρμόσιμος στο πρόβλημα που μελετάται.
- μια μακροχρόνια ακριβής καταγραφή του δείκτη θα πρέπει να είναι διαθέσιμη ή να μπορεί να υπολογιστεί για το παρελθόν.

Όσον άφορα τους δείκτες ξηρασίας που χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά υπάρχει και ένα ακόμη κριτήριο που πρέπει να πληρούται. Οι δείκτες θα πρέπει να μπορούν να υπολογιστούν σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.

Εκτός από τα παραπάνω κριτήρια ενός δείκτη ξηρασίας, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας, πρέπει να εμφανίζει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να θεωρηθεί κατάλληλος και επιλέξιμος για μια περιοχή. Επιγραμματικά αυτά είναι:

- να επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση της ξηρασίας, προκειμένου να ενεργοποιηθεί η κατάλληλη επικοινωνία και ο συντονισμός των δράσεων απόκρισης ή μετριασμού της ξηρασίας,
- να είναι ευαίσθητος στις μεταβολές των παραμέτρων προκειμένου να καθοριστεί η έναρξη και ο τερματισμός της ξηρασίας,
- τα διάφορα επίπεδα σοβαρότητας του δείκτη να ανταποκρίνονται και να αντανakλούν τις επιπτώσεις που συμβαίνουν στο έδαφος για μια δεδομένη τοποθεσία ή περιοχή,
- να εφαρμόζεται εύκολα και να είναι κατανοητός,
- να λαμβάνει υπόψη πολλούς παράγοντες και από διαφορετικές πηγές (ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα, βιόσφαιρα, λιθόσφαιρα) και
- να υπάρχει μια μακρά περίοδος καταγραφής για την πηγή δεδομένων και διαθεσιμότητα στοιχείων που μπορεί να δώσει στους σχεδιαστές και στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων έναν ισχυρό ιστορικό και στατιστικό δείκτη.

Indicators και Indices

Πριν την παρουσίαση των δεικτών ξηρασίας που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών που αναλύονται στην παρούσα εργασία για την μελέτη της

ξηρασίας στην Ν. Αφρική, σε αυτή την ενότητα γίνεται μια περιληπτική αναφορά στην διάκριση μεταξύ των όρων Indicators και Indices.

Οι Indices καθορίζονται ρητά από εξισώσεις, ενώ οι Indicators είναι σχέσεις που προσδιορίζονται ποσοτικοποιημένα. Οι Indicators είναι δηλαδή μεταβλητές ή παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή συνθηκών ξηρασίας (βροχόπτωση, θερμοκρασία, επίπεδα υπόγειων υδάτων και δεξαμενών, υγρασία εδάφους, χιονοκάλυψη κ.α.). Οι Indices μπορούν να είναι Indicators όταν οι σχέσεις αυτές ποσοτικοποιηθούν και μετρηθούν. Οι Indicators επίσης μπορεί να είναι αποτελέσματα εξόδου από μοντέλα προσομοίωσης, οι οποίοι αποκαλύπτουν απλοποιημένες σχέσεις στις επιπτώσεις (Svoboda and Fuchs, WMO 2016).

Οι Indices είναι συνήθως υπολογισμένες αριθμητικές αναπαραστάσεις της σοβαρότητας της ξηρασίας, που αξιολογούνται χρησιμοποιώντας κλιματολογικά ή υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου, συμπεριλαμβανομένων των Indicators που αναφέρονται παραπάνω. Οι Indices στοχεύουν στη μέτρηση της ποιοτικής κατάστασης των ξηρασιών για μια δεδομένη χρονική περίοδο σε μια περιοχή (Hayes et al. 2011).

Η παρακολούθηση του κλίματος σε διάφορα χρονικά διαστήματα επιτρέπει τον εντοπισμό βραχυπρόθεσμων υγρών περιόδων εντός μακροπρόθεσμων ξηρασιών ή βραχυπρόθεσμων ξηρών περιόδων εντός μακροπρόθεσμων υγρών περιόδων. Οι Indices μπορούν να απλοποιήσουν πολύπλοκες σχέσεις και να παρέχουν χρήσιμα εργαλεία επικοινωνίας και πληροφορίες άμεσα στο ευρύ κοινό (Svoboda and Fuchs, WMO 2016).

Οπότε, οι Indices είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ποσοτική αξιολόγηση της σοβαρότητας, της θέσης, του χρόνου και της διάρκειας των γεγονότων ξηρασίας. Η σοβαρότητα αναφέρεται στην απόκλιση από το κανονικό ενός δείκτη. Ένα κατώτατο όριο μπορεί να οριστεί για να καθορίσει την έναρξη και την λήξη ενός επεισοδίου ξηρασίας. Η τοποθεσία αναφέρεται στη γεωγραφική περιοχή που αντιμετωπίζει συνθήκες ξηρασίας ενώ ο χρόνος και η διάρκεια καθορίζονται από τις κατά προσέγγιση ημερομηνίες έναρξης και λήξης. Έτσι, οι δείκτες ξηρασίας (drought indices), σε συνδυασμό με πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τα εκτεθειμένα στοιχεία (άνθρωποι, γεωργία, κτηνοτροφία, διαθεσιμότητα νερού) και τα χαρακτηριστικά ευπάθειάς τους, είναι απαραίτητοι για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη των επιπτώσεων και των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την ξηρασία.

Τέλος, οι δείκτες (indices) μπορούν να διαδραματίσουν έναν ακόμη κρίσιμο ρόλο, καθώς μπορούν να παρέχουν μια ιστορική αναφορά για τους σχεδιαστές ή τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων παρέχοντας πληροφορίες που σχετίζονται με την πιθανότητα επανεμφάνισης ή επανάληψης επεισοδίων ξηρασίας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η κλιματική αλλαγή θα αρχίσει να αλλάζει τα ιστορικά πρότυπα (WMO 2016).

Δείκτες (Indices) εκτίμησης της ξηρασίας

Δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index - SPI): Οι McKee et al. (1993) δημιούργησαν τον δείκτη Τυποποιημένης Βροχόπτωσης (SPI) ώστε να γίνει κατανοητό ότι η απουσία της βροχόπτωσης έχει διαφορετικές επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα, στους ταμιευτήρες, στην υγρασία του εδάφους και στα επιφανειακά ύδατα. Ο συγκεκριμένος μετεωρολογικός δείκτης σχεδιάστηκε για να ποσοτικοποιήσει τις ελλείψεις βροχοπτώσεων σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Οι κλίμακες αυτές μας δείχνουν τις επιπτώσεις της ξηρασίας στη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων. Η υγρασία του εδάφους αντιστοιχεί σε σχετικά μικρή χρονική κλίμακα στις ανωμαλίες που σχετίζονται με τη βροχόπτωση, ενώ τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα και οι ταμιευτήρες αντιστοιχούν σε μακροπρόθεσμες ανωμαλίες της βροχόπτωσης. Για τους λόγους αυτούς οι McKee et al. (1993) υπολόγισαν αρχικά τον SPI για χρονικές κλίμακες 3, 6, 12, 24 και 48 μηνών (Παράρτημα II).

Ο δείκτης SPI είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος καθώς διαφέρει από τους υπόλοιπους δείκτες ξηρασίας, διότι αναγνωρίζει έγκαιρα τα διάφορα επεισόδια ξηρασίας και βασίζεται στην πιθανότητα κατακρήμνισης κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Ο υπολογισμός του SPI βασίζεται στην μακροχρόνια καταγραφή βροχόπτωσης για την επιθυμητή περίοδο σε μια τοποθεσία. Αυτή η μακροπρόθεσμη καταγραφή έχει τοποθετηθεί σε μια κατανομή πιθανοτήτων, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε κανονική κατανομή, έτσι ώστε ο μέσος SPI για τη συγκεκριμένη τοποθεσία και το επιθυμητό χρονικό διάστημα να είναι μηδέν (Edwards 1997).

Πίνακας 1.1. Κατάταξη των ξηρών και υγρών περιόδων σύμφωνα με τον δείκτη SPI (McKee et al. 1993).

Τιμές του δείκτη SPI	Χαρακτηρισμός Περιόδου
≥ 2.0	Εξαιρετικά υγρή
1.5 έως 1.99	Πολύ υγρή

1.0 έως 1.49	Υγρή
-0.99 έως 0.99	Κανονικές βροχοπτώσεις
-1.49 έως -1.0	Ξηρασία
-1.99 έως -1.5	Σημαντική ξηρασία
≤ -2.0	Ακραία ξηρασία

Οι McKee et al. (1993) χρησιμοποίησαν το σύστημα ταξινόμησης των τιμών του SPI που παρατίθεται στον Πίνακα 1.1 για τον καθορισμό της έντασης της ξηρασίας που προκύπτει βάσει του SPI. Θετικές τιμές SPI υποδεικνύουν μεγαλύτερη από τη μέση τιμή βροχόπτωση, ενώ οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μικρότερη από τη μέση τιμή βροχόπτωση. Ο δείκτης προσδίδει την αρχή, το τέλος και την ένταση κάθε φαινομένου ξηρασίας. Όταν ο δείκτης πάρει αρνητική τιμή δίνεται η αρχή του επεισοδίου, το οποίο και ολοκληρώνεται μόλις ο δείκτης πάρει θετική τιμή. Η ένταση του φαινομένου καθορίζεται με βάση την προαναφερθείσα κλίμακα αρνητικών τιμών. Επειδή ο SPI κανονικοποιείται, υγρά και ξηρά κλίματα μπορούν να αντιπροσωπεύονται με τον ίδιο τρόπο, και οι υγρές περίοδοι μπορούν επίσης να παρακολουθούνται με χρήση του SPI.

Οι Hayes et al. (1999) παρέθεσαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του δείκτη SPI για τον χαρακτηρισμό της σοβαρότητας της ξηρασίας. Τα κύρια πλεονεκτήματα του είναι:

α) η ευκολία υπολογισμού του, καθώς απαιτείται μόνο η χρονοσειρά βροχόπτωσης και η εκτίμηση δύο μόνο παραμέτρων (α και β της κατανομής Gamma για τον υπολογισμό του δείκτη). Καθώς δεν εξαρτάται από την εδαφική υγρασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία τόσο για τα καλοκαίρια όσο και για τους χειμώνες,

β) η δυνατότητα υπολογισμού του σε διάφορες χρονικές κλίμακες, γεγονός που επιτρέπει την εκτίμηση συνθηκών ξηρασίας σε μεγάλη ποικιλία μετεωρολογικών, αγροτικών και υδρολογικών εφαρμογών,

γ) η τυποποιημένη εφαρμογή του, η οποία εξασφαλίζει τον εντοπισμό της συχνότητας ακραίων γεγονότων σε οποιαδήποτε θέση και με οποιαδήποτε χρονική ανάλυση.

Αντίθετα τα τρία κυριότερα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

α) η υπόθεση που πρέπει να γίνει εκ των προτέρων, ότι υπάρχει μια κατάλληλη θεωρητική κατανομή που προσαρμόζεται καλά στη χρονοσειρά δεδομένων απαιτεί ένα ικανοποιητικό μέγεθος χρονοσειράς καθώς και την αξιοπιστία των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό οι McKee et al. (1993) συνιστούν τη χρήση χρονοσειρών τουλάχιστον 30 ετών υψηλής αξιοπιστίας δεδομένων,

β) ο δείκτης SPI δεν είναι ικανός να διακρίνει ότι κάποιες περιοχές είναι περισσότερο επιρρεπείς στην ξηρασία από άλλες. Ίδια τιμή του δείκτη σε δύο διαφορετικές περιοχές δεν σημαίνει ίδια έλλειψη νερού στις θέσεις αυτές,

γ) η εφαρμογή του δείκτη σε μικρές χρονικές κλίμακες (1, 2 ή 3 μηνών) σε περιοχές με μικρή εποχική βροχόπτωση είναι προβληματική καθώς στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να εμφανιστούν αναπάντεχα μεγάλες θετικές ή αρνητικές τιμές του δείκτη.

Οι ραγδαίες εξελίξεις της τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες έδωσαν τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας νέας ομάδας δεικτών που στηρίζονται σε δορυφορικά δεδομένα και αξιοποιούν τις εξελίξεις της τηλεπισκόπησης. Τα δεδομένα αφορούν κυρίως μετρήσεις της κατάστασης της ατμόσφαιρας, του εδάφους και της ποιότητας της βλάστησης σύμφωνα με τον τύπο βλάστησης και το στάδιο ανάπτυξης, χρησιμοποιώντας τις φασματικές υπογραφές των φυτών κυρίως στο υπέρυθρο και στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα (Huete et al. 1997).

Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες αυτής της κατηγορίας είναι ο Normalized Difference Vegetation Index - NDVI (Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης), ο Vegetation Condition Index – VCI (Δείκτης Κατάστασης Βλάστησης), ο Temperature Condition Index – TCI (Δείκτης Κατάστασης Θερμοκρασίας), ο Vegetation Health Index – VHI (Δείκτης Υγιούς Βλάστησης) και ο Enhanced Vegetation Index – EVI (Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης).

Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI): Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς NDVI είναι ένας τηλεπισκοπικός δείκτης που υποδεικνύει την κατάσταση της βλάστησης. Αναπτύχθηκε από το έργο των Tarpley et al. (1984) και Kogan (1990) σε συνεργασία με την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA), και βασίζεται στην διαφορά μεταξύ της μέγιστης απορρόφησης της ακτινοβολίας στην ερυθρή φασματική ζώνη και τη μέγιστη αντανάκλαση της ακτινοβολίας στην εγγύς υπέρυθρη φασματική ζώνη. Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται μεταξύ -1.0 και +1.0

αλλά συνήθως είναι θετικές για το έδαφος και τη βλάστηση. Πυκνότερη ή και υγιής βλάστηση έχουν υψηλότερες τιμές. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad \text{Εξ. (1)}$$

όπου *NIR* οι τιμές ανακλώμενου φάσματος κοντά στην υπέρυθη περιοχή και *RED* οι τιμές απορροφούμενου κόκκινου φάσματος.

Η σπουδαιότητα του NDVI βασίζεται στο γεγονός ότι είναι ενδεικτικός του βαθμού της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας της υπό παρακολούθηση βλάστησης. Είναι ένας γρήγορος και αποδοτικός τρόπος εκτίμησης της υγιούς βλάστησης (FEWS Bulletin, 1996). Μετά από αντίξοες συνθήκες, κυρίως έντονα επεισόδια ξηρασίας, αναμένεται σημαντική μείωση του δείκτη NDVI στο πεδίο και οι τιμές αποκρίνονται στην έλλειψη στοιχείων χλωροφύλλης και στην μειωμένη κατά πολύ φωτοσυνθετική δραστηριότητα σύμφωνα με την φυσιολογία των φυτών.

Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με την φυσιολογία των φυτών, η ηλιακή ακτινοβολία (0.4 - 2.5 μm) που διεισδύει στο φύλλο ενός φυτού υπόκειται σε ανάκλαση, διάθλαση και απορρόφηση. Η ανάκλαση υλοποιείται μέσω διαφορετικών δεικτών διάθλασης μεταξύ των αερίων του μεσοκυττάριου χώρου του φύλλου και των ιδίων των κυττάρων. Επίσης, κάποιο ποσοστό διάθλασης οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ενδοκυτταρικών συστατικών, όπως μακρομορίων και λυσοσωμάτων, το οποίο όμως, ανέρχεται στο 10% μόνο της συνολικής διάθλασης. Οι χρωστικές των φυτών και το νερό στο μεσόφυλλο απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία στις περιοχές 0.4 - 0.7 μm και 1.3 - 2.5 μm αντίστοιχα του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (Deering 1975). Ακτινοβολία στην πρώτη περιοχή είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως PAR (Photosynthetic Active Radiation) ή ενεργός - αποτελεσματική για τη φωτοσύνθεση ακτινοβολία και απορροφάται κυρίως από την χλωροφύλλη, συστατικό των χλωροπλαστών και δευτερευόντως από τα καροτενοειδή. Στην περιοχή 0.7 - 1.3 μm πραγματοποιείται μηδενική ή καθόλου απορρόφηση και έτσι κυριαρχούν οι μηχανισμοί ανάκλασης και εκπομπής (Δαλέζιος 2002).

Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η φασματική συμπεριφορά της φυτικής κάλυψης στο εύρος 0.4 - 0.7 μm προσφέρει την δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών στα διάφορα στάδια καλλιεργούμενων και μη φυτών, λαμβάνοντας υπόψιν και την αντίστοιχη συμπεριφορά του γύρω μικροπεριβάλλοντος, όπως το έδαφος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του δείκτη NDVI είναι η πολύ υψηλή ανάλυση και η μεγάλη χωρική κάλυψη ενώ κύριο μειονέκτημά του είναι ότι η επεξεργασία

δεδομένων είναι κρίσιμη και αυτό το βήμα απαιτεί ένα ισχυρό υπολογιστικό σύστημα και ταυτόχρονα η διαθέσιμη χρονοσειρά των δορυφορικών δεδομένων δεν είναι μεγάλη (Μπαλτάς 2013).

Δείκτης υγρασίας εδάφους (Soil Water Index - SWI): Η υγρασία του εδάφους είναι μια σημαντική μεταβλητή στις ανατροφοδοτήσεις εδάφους - ατμόσφαιρας, καθώς συμβάλλει στη διαίρεση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (διαθέσιμης ενέργειας) σε λανθάνουσα και αισθητή θερμότητα και στην κατανομή της βροχόπτωσης στην απορροή, την υπόγεια ροή και τη διήθηση. Η υγρασία του εδάφους σχετίζεται στενά με την ανάδραση μεταξύ κλίματος και βλάστησης, καθώς τόσο το τοπικό κλίμα όσο και η βλάστηση επηρεάζουν την υγρασία του εδάφους μέσω της εξατμισοδιαπνοής, και η υγρασία του εδάφους και το κλίμα καθορίζουν τον τύπο της βλάστησης σε μια περιοχή. Κατά συνέπεια, οι αλλαγές στην υγρασία του εδάφους μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στη γεωργική παραγωγικότητα, τη δασοκομία και την υγεία των οικοσυστημάτων (Copernicus Global Land Operations 2018).

Εκτός από την επιφανειακή υγρασία του εδάφους (SSM) (δηλαδή την περιεκτικότητα σε υγρασία των ανώτερων λίγων εκατοστών του εδάφους), διαφορετικές εφαρμογές απαιτούν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση υγρασίας εντός του ενεργού υπεδάφους (του εδάφους στη ζώνη της ρίζας).

Ο δείκτης υγρασίας εδάφους SWI (Soil Water Index), είναι ένας τηλεπισκοπικός δείκτης που ποσοτικοποιεί την κατάσταση υγρασίας του εδάφους σε διαφορετικά βάθη η οποία οφείλεται κυρίως στη βροχόπτωση και τη διείσδυση. Η υγρασία του εδάφους είναι μια πολύ ετερογενής μεταβλητή και ποικίλλει σε μικρή κλίμακα με αλλαγές στις ιδιότητες του εδάφους και στα πρότυπα αποστράγγισης. Οι δορυφορικές μετρήσεις ενσωματώνουν σχετικά μεγάλες περιοχές και η παρουσία βλάστησης προστίθεται στην πολυπλοκότητα της ερμηνείας (Copernicus Global Land Operations 2018).

Ο αλγόριθμος του δείκτη SWI χρησιμοποιεί ένα μοντέλο διείσδυσης για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ επιφανειακής υγρασίας εδάφους (SSM) και της υγρασίας του ενεργού υπεδάφους (επίπεδο ανάπτυξης των ριζών) ως συνάρτηση του χρόνου. Ο αλγόριθμος βασίζεται στο μοντέλο ισορροπίας νερού δύο επιπέδων που προτείνεται από τους Wagner et al. (1999) και αρχικά αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας της Βιέννης (TU Wien) και αργότερα βελτιώθηκε από άλλες ερευνητικές ομάδες.

Ο ακόλουθος τύπος περιγράφει τον τρόπο μετατροπής των παρατηρήσεων υγρασίας SSM σε SWI:

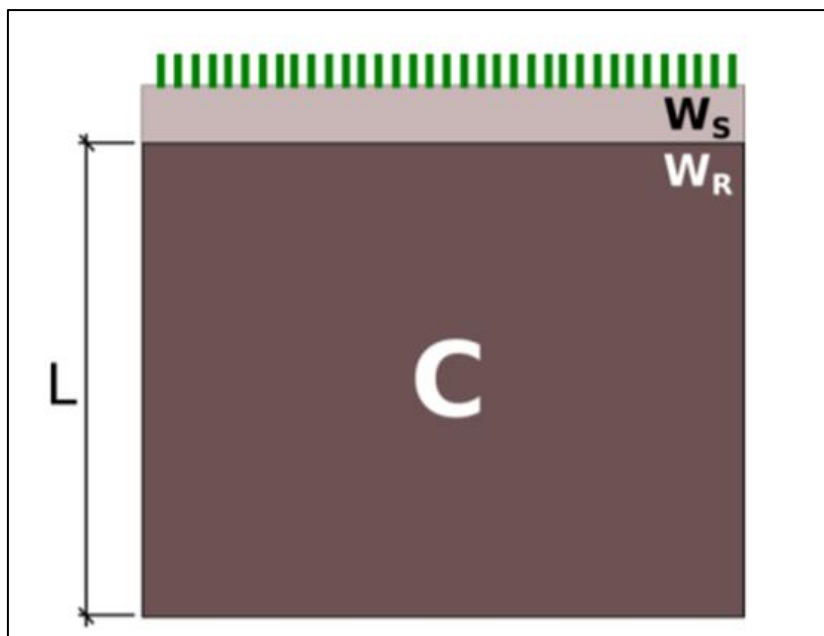
$$SWI_{(t_n)} = \frac{\sum_i^n SSM(t_i) e^{\frac{t_n - t_i}{T}}}{\sum_i^n e^{\frac{t_n - t_i}{T}}} \quad \text{για } t_i \leq t_n \quad \text{Εξ. (2)}$$

όπου t_n είναι ο χρόνος παρατήρησης της τρέχουσας μέτρησης και t_i ο χρόνος παρατήρησης της προηγούμενης μέτρησης. Αυτοί οι χρόνοι δίνονται σε Ιουλιανές ημέρες. Στην παραπάνω εξίσωση όλες οι παρατηρήσεις SSM που έγιναν πριν από t_n αθροίζονται και σταθμίζονται εκθετικά. Ο παράγοντας T καθορίζει πόσο γρήγορα τα φορτία γίνονται μικρότερα και πόσο θα επηρεάσουν οι προηγούμενες παρατηρήσεις SSM το τρέχον SWI.

Ο παραπάνω τύπος αντιπροσωπεύει ένα απλό μοντέλο ισορροπίας νερού δύο στρωμάτων, όπου το πρώτο στρώμα είναι το επιφανειακό στρώμα εδάφους που είναι προσβάσιμο στο σκεδαστόμετρο ζώνης C και το δεύτερο στρώμα είναι το τμήμα του προφίλ που εκτείνεται προς τα κάτω από το κάτω μέρος του επιφανειακού στρώματος του εδάφους. Υποτίθεται ότι το δεύτερο στρώμα λειτουργεί ως ταμιευτήρας που συνδέεται με την ατμόσφαιρα μέσω του πρώτου στρώματος. Οι συνθήκες υγρασίας στο πρώτο στρώμα (W_s), που είναι σε άμεση επαφή με την ατμόσφαιρα, είναι εξαιρετικά δυναμικές στο χρόνο. Η χρονική δυναμική των συνθηκών υγρασίας μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος του προφίλ του δεύτερου στρώματος, επειδή η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα εξαρτάται από τη διεύθυνση του νερού που προστίθεται στο πρώτο στρώμα κατά τη διάρκεια των γεγονότων βροχόπτωσης.

Επομένως, η περιεκτικότητα σε νερό του ταμιευτήρα ελέγχεται μόνο από τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας στην επιφάνεια και από το ιστορικό της βροχόπτωσης. Εδώ, τα πρόσφατα γεγονότα βροχοπτώσεων έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στις συνθήκες υγρασίας στον ταμιευτήρα, κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από την εκθετικά σταθμισμένη συνάρτηση στην εξίσωση υπολογισμού του δείκτη. Έστω L το βάθος του ταμιευτήρα (W_R) και C η σταθερά ψευδο-διάχυσης που αντιπροσωπεύει την περιοχή. Η τιμή T που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του SWI είναι $T = L/C$, που σημαίνει ότι εάν η διαχυτικότητα του εδάφους είναι σταθερή, ένα υψηλό T περιγράφει ένα βαθύτερο στρώμα εδάφους. Αυτό σημαίνει επίσης, ότι η ίδια τιμή T περιγράφει διαφορετικά βάθη για διαφορετικά εδάφη αντίστοιχα

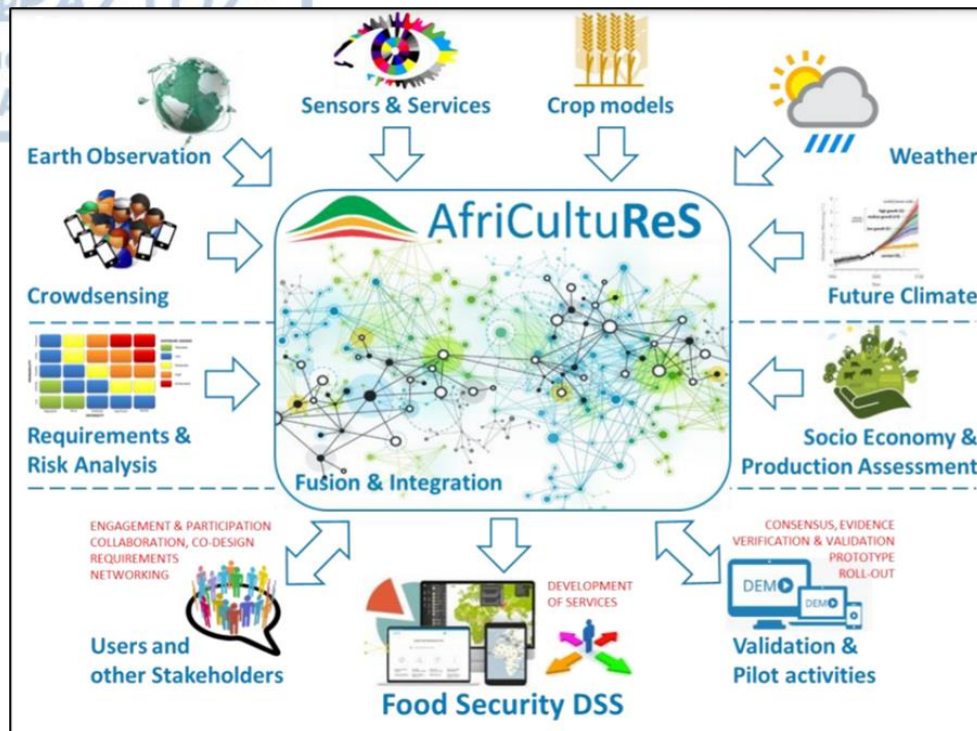
(Ceballos et al. 2005). Στο Σχήμα 1.26 παρουσιάζεται ένα απλό σκίτσο του μοντέλου. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ένα μειονέκτημα του δείκτη SWI είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την υφή του εδάφους.



Σχήμα 1.26. Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου δύο επιπέδων που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του SWI. Το L είναι το βάθος του ταμιευτήρα (του ενεργού υποστρώματος), το C είναι η σταθερά ψευδο-διάχυσης και τα W_S και W_R δηλώνουν την επιφάνεια και τον ταμιευτήρα αντίστοιχα (Ceballos et al. 2005).

1.2.3. AfriCultuReS

Το έργο AfriCultuReS (Enhancing Food Security in AFRican AgriCULTUral systems with the support of REmote Sensing - Ενίσχυση της επισιτιστικής ασφάλειας στα αφρικανικά γεωργικά συστήματα με την υποστήριξη της τηλεπισκόπησης), χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του προγράμματος «Horizon 2020», αξιοποιεί όλα αυτά τα σύγχρονα εργαλεία για να συμβάλει σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα γεωργικής παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης για την Αφρική, υποστηρίζοντας τις λήψεις αποφάσεων στον τομέα της επισιτιστικής ασφάλειας (Alexandridis et al. 2021) (Σχήμα 1.27). Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης εκπονείται στο πλαίσιο του προγράμματος AfriCultuReS με δεδομένα που έχουν αντληθεί από την πλατφόρμα του προγράμματος (<http://africultures-platform.eu/en/>).



Σχήμα 1.27. Απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων και των εργαλείων αξιοποίησης του προγράμματος AfriCultuReS.

Διεθνώς έχει οριστεί ότι ένας πληθυσμός είναι ασφαλής ως προς τα τρόφιμα "όταν όλοι οι άνθρωποι, ανά πάσα στιγμή, έχουν φυσική, κοινωνική και οικονομική πρόσβαση σε επαρκή, ασφαλή και θρεπτικά τρόφιμα που ανταποκρίνονται στις διατροφικές τους ανάγκες και τις διατροφικές προτιμήσεις τους για ενεργό και υγιή ζωή" (FAO 2009). Αυτό δεν ισχύει για την Αφρική καθώς η κλιματική αλλαγή έχει οδηγήσει σε χαμηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης, μείωση της παραγωγικότητας του πρωτογενή τομέα, αυξημένη ερημοποίηση, και αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ξηρασιών (IPCC 2019). Οι ξηρασίες και οι διαδικασίες ερημοποίησης έχουν αρνητικές επιπτώσεις στους υδάτινους πόρους, οι οποίοι διαδραματίζουν καίριο ρόλο στις πρακτικές γεωργικής διαχείρισης. Επιπλέον, η υποβάθμιση της γης έχει μειώσει τα γεωργικά εισοδήματα σε διάφορες χώρες, με συνέπεια τη σημαντική αύξηση του κινδύνου φτωχοποίησης της ηπείρου.

Το έργο AfriCultuReS παρέχει ένα ευρύ φάσμα κλιματικών, παραγωγικών, βιοφυσικών και οικονομικών πληροφοριών για διάφορες περιοχές της Αφρικής με σκοπό τη βιώσιμη γεωργική ανάπτυξη, τη διαχείριση των φυσικών πόρων, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και την ανακούφιση της φτώχειας στην Αφρική. Τελικός στόχος είναι η παροχή ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων στον τομέα της επισιτιστικής ασφάλειας στην Αφρική το οποίο (Suárez 2018):

- θα βελτιώσει την παρακολούθηση και την πρόβλεψη των αποδόσεων των καλλιεργειών και των βοσκοτόπων,
- θα μειώσει την υποκειμενικότητα και τα σφάλματα που αφορούν τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και τις εκτιμήσεις των αποδόσεων τους,
- θα προβλέπει τις επερχόμενες απειλές μέσω της εκτίμησης των φυσικών κινδύνων,
- θα μετατρέπει τις νέες μεθόδους παρακολούθησης και πρόβλεψης σε λειτουργικές,
- θα παρέχει μια ανοικτή σε όλους πλατφόρμα υπηρεσιών φιλική προς τους χρήστες και
- θα οικοδομήσει ένα αίσθημα αξιοπιστίας και ευαισθητοποίησης.

Ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα του έργου σε σύγκριση με τους προκατόχους του, είναι η άμεση συμμετοχή των δυνητικών χρηστών σε μια προσέγγιση συνσχεδιασμού, που προωθείται μέσω των πολυάριθμων ερευνών που διεξάγονται στην Αφρική. Ένα άλλο πλεονέκτημα του έργου είναι η άμεση επικοινωνία με τους χρήστες και η επεξήγηση του τρόπου με τον οποίο θα φτάσουν οι υπηρεσίες σε αυτούς. Σύμφωνα με την ανάλυση των αναγκών των χρηστών και την τεχνολογική ικανότητα του έργου, οι εταίροι έχουν προχωρήσει ένα βήμα παραπέρα στον λεπτομερή ορισμό των συνιστωσών των υπηρεσιών, καταλήγοντας σε επτά γενικές κατηγορίες υπηρεσιών (Alexandridis et al. 2021):

Υπηρεσίες κλίματος: Οι υπηρεσίες AfriCultuReS για το κλίμα έχουν διττό σκοπό. Από τη μία πλευρά, παρέχουν τις απαραίτητες κλιματικές πληροφορίες (π.χ. βροχοπτώσεις, θερμοκρασίες, ακτινοβολία) και άλλες πληροφορίες (π.χ. υπηρεσίες καλλιέργειας και ξηρασίας) που θα χρησιμοποιηθούν ως εισροές (Kim et al. 2019), και από την άλλη, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μεσοπρόθεσμη κλιματική μεταβλητότητα (εποχιακές προβλέψεις) και τα μακροπρόθεσμα σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Υπηρεσίες καλλιέργειας: Οι υπηρεσίες καλλιέργειας AfriCultuReS περιλαμβάνουν την ετήσια χαρτογράφηση καλλιεργειών και ημερολογίων καλλιέργειας, την παρακολούθηση της φαινολογικής κατάστασης των καλλιεργειών, καθώς και προβλέψεις για την αναμενόμενη απόδοση των κύριων καλλιεργειών, με βάση τα μοντέλα ανάπτυξης (Crop models).

Πίνακας 1.2. Τα προϊόντα των υπηρεσιών των AfriCultuReS όσον αφορά τη ξηρασία και τους τομείς πληροφόρησης που καλύπτουν (AfriCRS-S3).

Όνομα	Χαρτογράφηση	Παρακολούθηση	Εκτίμηση	Πρόγνωση	Προειδοποίηση
Ιστορική εκτίμηση επεισοδίων ξηρασίας (AfriCRS-S3-P01)	✗	✗	✓	✗	✗
Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση ξηρασίας (AfriCRS-S3-P02)	✗	✗	✗	✓	✗
Εποχιακή πρόγνωση ξηρασίας (AfriCRS-S3-P03)	✗	✗	✗	✓	✗
Προειδοποίηση ξηρασίας (AfriCRS-S3-P04)	✗	✗	✗	✗	✓
Παρακολούθηση ξηρασίας (AfriCRS-S3-P05)	✗	✓	✗	✗	✗

Υπηρεσίες ξηρασίας: Η παρακολούθηση της ξηρασίας όσο και οι εποχιακές προβλέψεις εξετάζονται στο πλαίσιο των υπηρεσιών AfriCultuReS. Οι υπηρεσίες παρακολούθησης αφορούν δύο βασικούς τύπους: τη μετεωρολογική και τη γεωργική ξηρασία και έχουν σαν στόχο να καταγράψουν έγκυρα την χωροχρονική έναρξη, εξέλιξη και λήξη ενός επεισοδίου ξηρασίας. Στην περίπτωση της υπηρεσίας εποχιακών προβλέψεων, αυτή βασίζεται στον υπολογισμό του τυποποιημένου δείκτη εξατμισοδιαπνοής υετού (SPEI – αναλύεται στην συνέχεια), ο οποίος είναι σε θέση να παρέχει εκτίμηση της έναρξης, της διάρκειας και της έντασης ενός συμβάντος ξηρασίας (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno 2010). Επιπλέον, ο SPEI επιτρέπει μια πολυεπίπεδη ανάλυση, υπολογίζοντας τις τιμές του σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Αυτός ο χαρακτήρας του SPEI επιτρέπει τον προσδιορισμό του χρόνου επιστροφής διαφορετικών τύπων ξηρασίας (Schwaln et al. 2017). Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα προϊόντα των υπηρεσιών των AfriCultuReS όσον αφορά την ξηρασία και τους τομείς πληροφόρησης που καλύπτουν.

Υπηρεσίες εδάφους: Παρέχουν προϊόντα σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση κάλυψης γης και τις αλλαγές κάλυψής της, καθώς και αβιοτικούς παράγοντες που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγή τροφίμων.

Υπηρεσίες κτηνοτροφίας: Παρέχουν προϊόντα πληροφόρησης για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ζωική παραγωγή. Για το σκοπό αυτό, οι υπηρεσίες παρέχουν πολυβάθμιες αξιολογήσεις του παρελθόντος σε εποχιακούς και εν εξελίξει βοσκοτόπους, χαρτογράφηση και παρακολούθηση των συνθηκών των βοσκοτόπων,

καθώς και αξιολόγηση σχετικά με την ικανότητα αυτών για τη διατήρηση της ζωικής παραγωγής.

Υπηρεσίες νερού: Παρέχουν γεωχωρικά προϊόντα για τη χαρτογράφηση της έκτασης του υδατικού συστήματος, την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού και την παρακολούθησή του. Άλλα προϊόντα έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού και την κατανάλωσή του από τις καλλιέργειες.

Υπηρεσίες καιρού: Παρέχουν ντετερμινιστικές προγνώσεις καιρού, χρονικής κάλυψης από σχεδόν πραγματικό χρόνο έως επτά ημερών - σε κλίμακα ηπείρου - με χωρική ανάλυση $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, και πιθανολογικές προγνώσεις καιρού - επίσης σε κλίμακα ηπείρου - που χρησιμεύουν για την έγκαιρη προειδοποίηση ακραίων καιρικών συνθηκών (χωρική ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$).

1.2.4. Ν. Αφρική και Μελλοντικά Hot-spots Ξηρασίας

Η Ν. Αφρική την τριετία 2015-2018 βίωσε διαδοχικά, έντονα και μεγάλης διάρκειας επεισόδια ξηρασίας σε πολλές περιοχές της (Masante et al. 2018), με αποτέλεσμα να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη το ερώτημα αν η χώρα μελλοντικά ενδέχεται να αποτελέσει μια περιοχή όπου το φαινόμενο της ξηρασίας θα επιδεινωθεί (drought hot-spot).

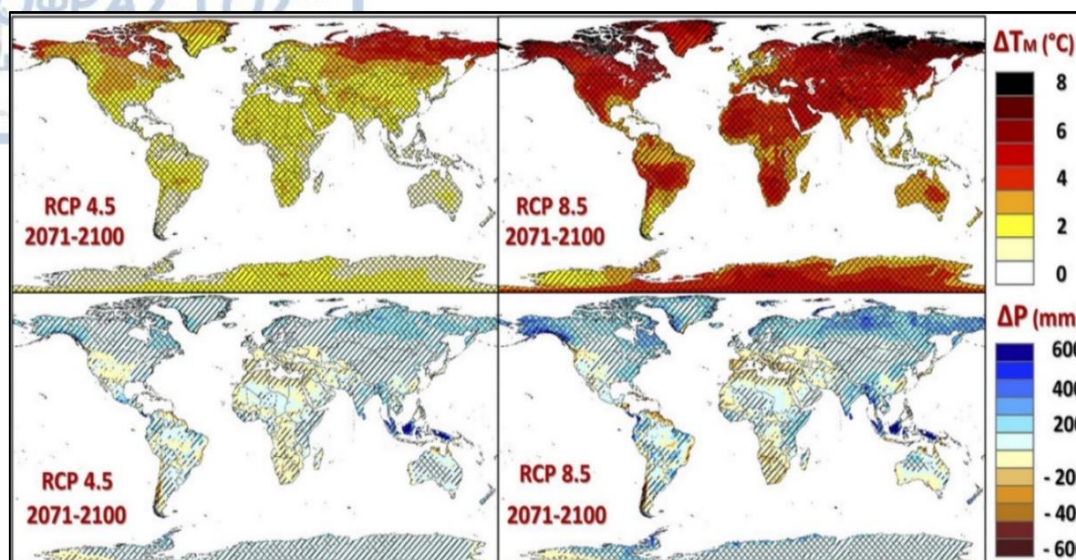
Η συνολική εικόνα για τις μελλοντικές προβολές της μετεωρολογικής ξηρασίας ακόμη και σήμερα είναι ελλιπής, καθώς βασίζεται κυρίως στα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCMs), τα οποία εξ ορισμού στερούνται ικανοποιητικής χωρικής ανάλυσης τέτοιας που να μπορέσουν να αποδώσουν με βεβαιότητα την μελλοντική τάση ενός φαινομένου, όπως αυτό της ξηρασίας, που καθορίζεται από ένα μεγάλο αριθμό μετεωρολογικών παραγόντων σε τοπικό επίπεδο.

Για τους λόγους αυτούς, στη προσπάθεια απάντησης στο ερώτημα αν η Ν. Αφρική μπορεί να αποτελέσει μελλοντικά μια hot-spot περιοχή επεισοδίων ξηρασίας, θα παρουσιαστούν - κατά κανόνα - τα αποτελέσματα από τις τελευταίες έρευνες που συνδυάζουν παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCMs) υποβιβασμένα δυναμικά με περιοχικά κλιματικά μοντέλα (RCMs) και διενεργήθηκαν στα πλαίσια του CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment).

Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις έρευνες, και εξετάζοντας τις μελλοντικές κλιματικές προβολές RCP4.5 (μετριοπαθές σενάριο εκπομπής θερμοκηπικών αερίων

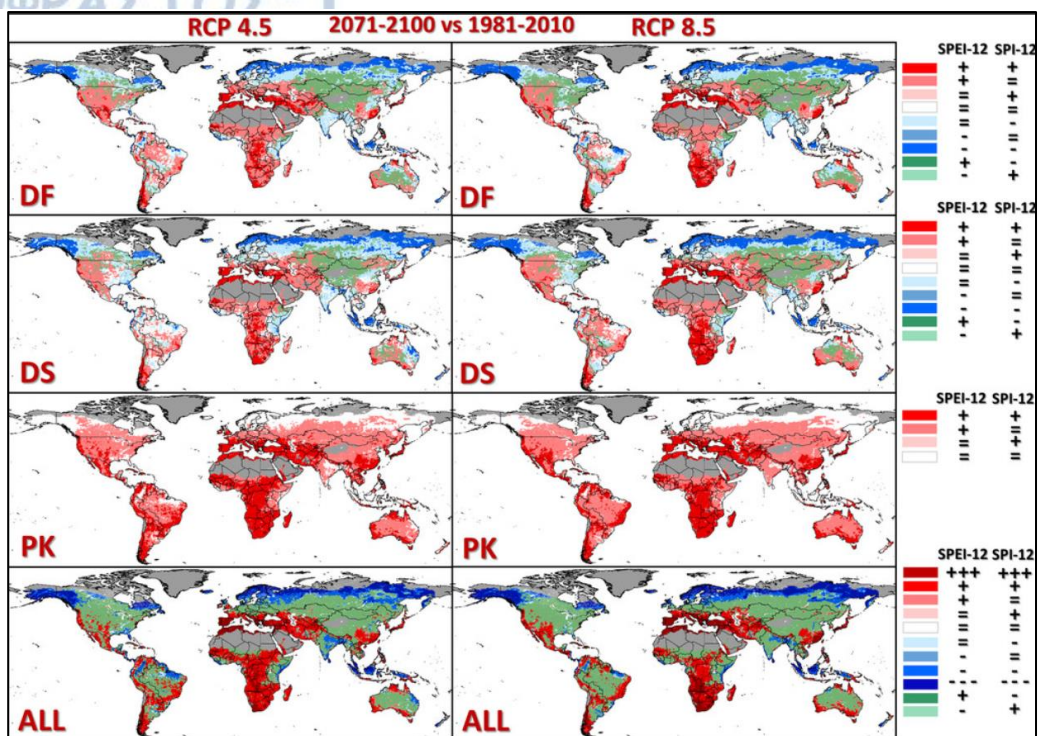
και ηλιακής ακτινοβολίας) και RCP8.5 (ακραίο σενάριο εκπομπής θερμοκηπικών αερίων και ηλιακής ακτινοβολίας) (van Vuuren et al. 2011), αναμένεται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην περιοχή της Ν. Αφρικής κατά 2.4 °C και 4.6 °C αντίστοιχα για την περίοδο 2071-2100 σε σχέση με την περίοδο 1981-2010. Ταυτόχρονα για την ίδια χρονική περίοδο αναμένεται μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Ν. Αφρική, κατά 6.1% βάσει του σεναρίου RCP4.5 και 2.8% βάσει του σεναρίου RCP8.5. Εποχιακά η μείωση των βροχοπτώσεων αναμένεται να είναι πιο μεγάλη τον χειμώνα (JJA) και δευτερευόντως την άνοιξη (SON) (Spinoni et al. 2020).

Ταυτόχρονα, εξετάζοντας ως προς την βεβαιότητα τις συγκεκριμένες μελλοντικές τάσεις της θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, διαπιστώνεται μια ισχυρή τάση αύξησης της θερμοκρασίας και για τα δύο σενάρια για τα τέλη του 21^{ου} αιώνα, ενώ η βεβαιότητα για την τάση της βροχόπτωσης είναι μικρότερη (Σχήμα 1.28), αλλά ισχυρότερη σε σχέση με την μεγάλη αβεβαιότητα που εμφάνιζαν ως προς αυτή την παράμετρο τα GCMs, λόγω κυρίως μη σωστού υπολογισμού της μεταφοράς (convection) (Kendon et al., 2017, Spinoni et al. 2020). Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι τα παραπάνω ευρήματα έρχονται σε συμφωνία με αυτά των ερευνών που βασίζονται αποκλειστικά σε παγκόσμια κλιματικά μοντέλα, καθώς και με εκείνα που αναφέρονται στην 5^η έκθεση αξιολόγησης της IPCC (IPCC 2014) με βάση τις παγκόσμιες προσομοιώσεις CMIP5 (Taylor et al. 2012). Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι οι δύο βασικοί μετεωρολογικοί παράγοντες που σχετίζονται με την ξηρασία αναμένεται να επιδεινωθούν στην περιοχή της Ν. Αφρικής, ευνοώντας μελλοντικά τις συνθήκες εκδήλωσης επεισοδίων ξηρασίας.



Σχήμα 1.28. Μεταβολή της μέσης ετήσιας Θερμοκρασίας (TM, επάνω) και ετήσιας βροχόπτωσης (P, κάτω), μεταξύ της περιόδου 1981-2010 (περίοδος αναφοράς και 2071 - 2100, βάσει των προβολών CORDEX για το σενάριο RCP4.5 (αριστερά) και RCP8.5 (δεξιά) με χωρική ανάλυση 0.44° ($\sim 50\text{km}$). Η τάση είναι ισχυρή εάν περισσότερα από τα δύο τρίτα των προσομοιώσεων συμφωνήσουν για την συγκεκριμένη μεταβολή. Οι διασταυρούμενες γραμμές αντιπροσωπεύουν μια μεταβολή ισχυρή τόσο στο μέγεθος όσο και στην τάση (βεβαιότητα), οι γραμμές (//) αντιπροσωπεύουν την μια ισχυρή μεταβολή ως προς την τάση, οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν ισχυρή αλλαγή προς το μέγεθος αλλά με μεγάλη αβεβαιότητα και στις περιοχές χωρίς γραμμές δεν εμφανίζεται ισχυρή μεταβολή προς το μέγεθος, ούτε ισχυρή τάση (Spinoni et al. 2020).

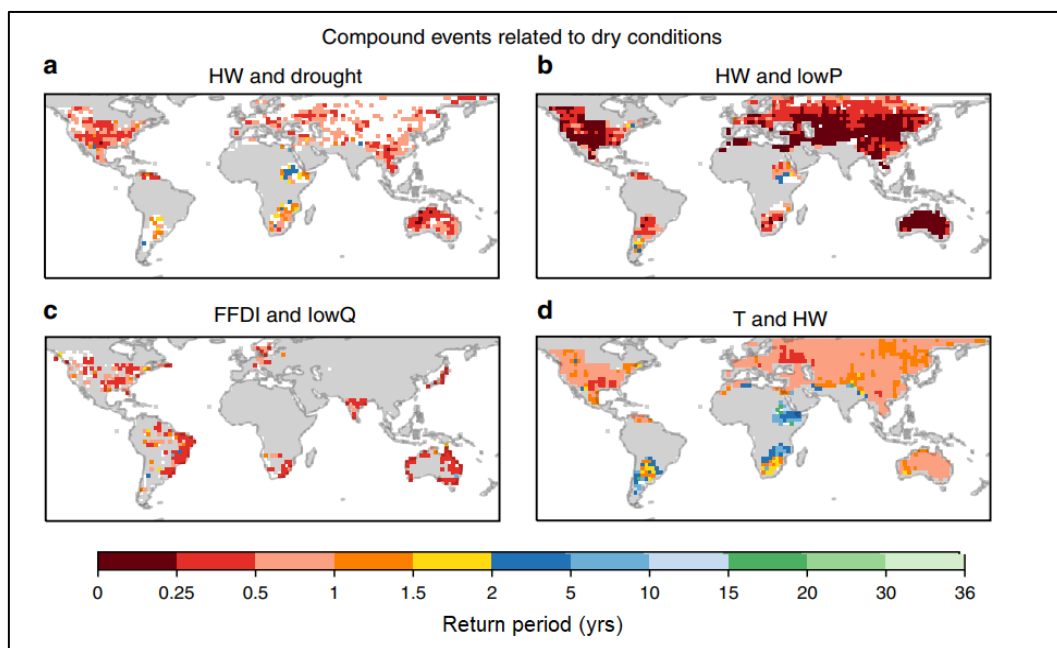
Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες (Burke et al. 2006, Sheffield and Wood 2008) όσο και με τα πιο πρόσφατα GCMs (Zhao and Dai 2015, 2017) στη Ν. Αφρική εμφανίζεται ισχυρή τάση αύξησης τόσο της έντασης όσο και της συχνότητας της ξηρασίας και στα δύο μελλοντικά σενάρια (RCP4.5 και RCP8.5) για το τέλος του 21ου αιώνα (περίοδος αναφοράς 1981-2010), είτε ο υπολογισμός γίνεται βάσει του δείκτη SPEI είτε με τον δείκτη SPI. Ταυτόχρονα, στις μελέτες εμφανίζεται αυξημένη η πιθανότητα, και για τα δύο RCPs, η Ν. Αφρική να βιώσει τουλάχιστον τρία ακραία επεισόδια ξηρασίας την τελευταία τριακονταετία του 21ου αιώνα (2071-2100) τα οποία θα ξεπερνούν σε ένταση και διάρκεια το πιο ακραίο καταγεγραμμένο επεισόδιο ξηρασίας της περιόδου αναφοράς (1981-2010) (Σχήμα 1.29).



Σχήμα 1.29. Συμφωνία ή μη μεταξύ των δεικτών ξηρασίας (SPEI-12 και SPI-12) έναντι της μελλοντικής τάσης στην συχνότητα (DF), την ένταση (DS) και των ακραίων γεγονότων (PK) ξηρασίας μεταξύ 1981-2010 και 2071-2100 για τα δύο RCPs σενάρια (RCP4.5 αριστερά, RCP8.5 δεξιά). Εμφανίζεται το (+) εάν η τάση είναι ισχυρά ανοδική και το (-) εάν η τάση είναι ισχυρά πτωτική (περισσότερα από τα δύο τρίτα των προσομοιώσεων συμφωνούν στο σύμβολο). Εάν δεν είναι ισχυρή εμφανίζεται το σύμβολο (=). Οι πράσινες περιοχές αντιπροσωπεύουν αντιφατικές τάσεις στους δύο δείκτες. Τα κάτω διαγράμματα του σχήματος (ALL) απεικονίζουν την συνδυασμένη αύξηση ή μείωση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (DF, DS και PK): οι δύο επιπλέον κατηγορίες (σκούρο κόκκινο και σκούρο μπλε) αντιπροσωπεύουν αύξηση ή μείωση όλων των χαρακτηριστικών της ξηρασίας προς μια κατεύθυνση και για τους δύο δείκτες (Spinoni et al. 2020).

Ένα άλλο κομμάτι της έρευνας για τις προβολές της ξηρασίας μέσα στον 21^ο αιώνα, εξετάζει το φαινόμενο σε συνδυασμό με άλλα καιρικά ή κλιματικά φαινόμενα που μπορούν επίσης να έχουν σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων τέτοιων φαινομένων σε μια περιοχή μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες οικονομικές και κοινωνικές απώλειες σε σχέση με την εμφάνιση ενός μόνο γεγονότος. Η έρευνα των σύνθετων γεγονότων (Compound events - CEs) για την Ν. Αφρική όσον αφορά την ξηρασία, αποκαλύπτει σημαντική αύξηση στην επαναληψιμότητα εμφάνισης τέτοιων γεγονότων. Πιο συγκεκριμένα, η ταυτόχρονη εμφάνιση μετεωρολογικής ξηρασίας σε συνδυασμό με συνθήκες

καύσωνα παρουσιάζει ρυθμό επανάληψης λιγότερο από δύο χρόνια, ενώ ο ρυθμός επανάληψης εμφάνισης μειωμένων βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με συνθήκες καύσωνα για το εσωτερικό της Ν. Αφρικής είναι ακόμη μικρότερος (Σχήμα 1.30). Επίσης, ο ρυθμός επαναληψιμότητας συνθηκών υδρολογικής ξηρασίας σε συνδυασμό με αυξημένο κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιών (Forest Fire Danger Index - FFDI) εμφανίζεται μικρότερος του ενός έτους για τις ανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής, ενώ και ο ρυθμός επαναληψιμότητας ταυτόχρονης εμφάνισης ακραίων θερμοκρασιακών τιμών και συνθηκών καύσωνα για τις ίδιες περιοχές είναι κάτω από τα δύο έτη (Ridder et al. 2020). Εν κατακλείδι, σύμφωνα με την πλειοψηφία των ερευνών πάνω στο συγκεκριμένο ερώτημα που τέθηκε στην αρχή της ενότητας, μπορεί να λεχθεί με μεγάλη βεβαιότητα ότι η Ν. Αφρική μπορεί να αποτελέσει ένα μελλοντικό hot-spot ξηρασίας τις επόμενες δεκαετίες και έως το τέλος του 21ου αιώνα.



Σχήμα 1.30. Hot-spots κοινής εμφάνισης διαφορετικών ζευγών κινδύνου που σχετίζονται με ξηρές συνθήκες και ρυθμός επαναληψιμότητας. Εμφανίζονται σύνθετα γεγονότα (CE) που αποτελούνται από: (α) μετεωρολογική ξηρασία (drought) και καύσωνα (HW), (β) μειωμένη βροχόπτωση (lowP) και καύσωνα (HW), (γ) υδρολογική ξηρασία (lowQ) και κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιάς (FFDI) και (δ) ακραίες θερμοκρασίες (T) και καύσωνα (HW). Παρουσιάζονται μόνο στατιστικά σημαντικές τιμές ($p \leq 0.05$). Οι στατιστικά ασήμαντες τιμές αποκρύπτονται (λευκό). Οι γκριζες περιοχές υποδεικνύουν περιοχές χωρίς κάλυψη δεδομένων (Ridder et al. 2020).

Κύριος στόχος της παρούσας μελέτης ορίστηκε η ανάλυση των επεισοδίων ξηρασίας, ως προς τα χαρακτηριστικά της έντασης διάρκειας και της χωρικής τους κατανομής, την περίοδο 2017 - 2020 στην χώρα της Νότιας Αφρικής μέσω τριών δεικτών ξηρασίας (SPEI, SWCI, VCI) συγκρινόμενους με τις βιβλιογραφικές αναφορές για την περίοδο αυτή, εξετάζοντας ταυτόχρονα τα κλιματολογικά στοιχεία της χώρας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην παρούσα εργασία, περιοχή μελέτης αποτελεί το σύνολο της Ν. Αφρικής και το περικλείστο στα σύνορά της κρατίδιο του Λεσότο. Για τις ανάγκες της ανάλυσης των πέντε δεικτών ξηρασίας επιλέχτηκαν έξι σημεία από έξι διαφορετικές επαρχίες της χώρας. Οι ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων που αναλύθηκαν εμφανίζονται στην Πίνακα 2.1 και οι θέσεις τους στο Σχήμα 2.1.

Πίνακας 2.1. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας. Στον Πίνακα εμφανίζονται και οι αντίστοιχες επαρχίες που ανήκουν τα σημεία καθώς και τα υψόμετά τους.

Επαρχία	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Υψόμετρο (m)	Βιοκλιματική Ζώνη
Eastern Cape	33.65 °S	25.55 °E	240	Albany Thicket
Free State	29.15 °S	26.15 °E	1430	Grassland
KwaZulu Natal	29.55 °S	30.85 °E	118	Indian Ocean Coastal Belt
Limpopo	25.25 °S	29.25 °E	1010	Savanna
Northern Cape	30.65 °S	19.85 °E	970	Nama-Karoo
Western Cape	33.55 °S	18.55 °E	250	Fynbos

Η επιλογή των σημείων έγινε στοχευμένα για την όσο το δυνατόν καλύτερη χωρική κάλυψη της Ν. Αφρικής, βάσει έξι περιοχών που εμφανίζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τα κλιματικά τους καθεστώτα. Επίσης, έγινε προσπάθεια επιλογής σημείων μακριά από μητροπολιτικά κέντρα για την αποφυγή ανάλυσης

τιμών των δεικτών ξηρασίας με έντονες διαφοροποιήσεις, σε σχέση με τις όμορες περιοχές τους. Τέλος, όλα τα σημεία αναφέρονται σε χέρσες εκτάσεις, αποφεύγοντας έτσι καλλιεργούμενες επιφάνειες οι οποίες θα μπορούσαν να διαφοροποιήσουν σημαντικά τις τιμές των υπό μελέτη δεικτών ξηρασίας.



Σχήμα 2.1. Η περιοχή μελέτης όπου εμφανίζονται τα έξι επιλεγμένα σημεία για την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας για την Ν. Αφρική.

2.2. ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ - SPEI

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η σύγκριση του δείκτη ξηρασίας του Τυποποιημένου Δείκτη Βροχόπτωσης και Εξατμισοδιαπνοής (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI), όπως προτάθηκε από τους Vicente-Serrano et al. το 2010, με τους δείκτες VCI (Δείκτης Κατάστασης Βλάστησης - Vegetation Condition Index) και SWCI (Δείκτης Κατάστασης Εδαφικής Υγρασίας - Soil Water Condition Index) για τη μελέτη επεισοδίων ξηρασίας στην Ν. Αφρική.

Ο συγκεκριμένος μετεωρολογικός δείκτης έχει την δυνατότητα απεικόνισης της έντασης, της διάρκειας αλλά και των περιόδων έναρξης και λήξης επεισοδίων ξηρασίας σε πολλές περιοχές με αρκετά διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά.

Ειδικότερα, παρέχει εύχρηστα και επιστημονικά αποδεκτά αποτελέσματα, ως συνέπεια της απλής και εύχρηστης διαδικασίας υπολογισμού του (Begueria et al 2014).

Καθώς η κλιματική αλλαγή εξελίσσεται, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αποδειχθεί από πολλές εμπειρικές μελέτες ότι επηρεάζει σημαντικά τη σοβαρότητα της ξηρασίας. Για παράδειγμα, οι Abramopoulos et al. (1988) χρησιμοποίησαν ένα πείραμα γενικού μοντέλου κυκλοφορίας για να δείξουν ότι η εξάτμιση και η διαπνοή μπορούν να καταναλώσουν έως και 80% των βροχοπτώσεων. Η επίδραση της θερμοκρασίας ήταν εμφανής και στην καταστροφική ξηρασία της Κεντρικής Ευρώπης το καλοκαίρι του 2003. Αν και οι κατακρημνίσεις των προηγούμενων μηνών ήταν χαμηλότερες από τον μέσο όρο, οι εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες στην πλειονότητα της Ευρώπης τον Ιούνιο και τον Ιούλιο του 2003 προκάλεσαν τις μεγαλύτερες καταστροφές σε καλλιεργημένα και φυσικά συστήματα, και αύξησαν δραματικά τα ποσοστά εξατμισοδιαπνοής (Rebetez et al. 2006). Το πλεονέκτημα του SPEI σε σχέση με τον δείκτη SPI είναι ότι δεν βασίζεται μόνο στα δεδομένα των κατακρημνίσεων – υετού, αλλά λαμβάνει υπόψιν και την παράμετρο της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET), συνυπολογίζοντας και την παράμετρο της θερμοκρασίας επιτρέποντας την μελέτη της πιθανής επίδρασης της θερμοκρασίας στις συνθήκες ξηρασίας.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του SPEI, σε σχέση με άλλους δείκτες ξηρασίας, είναι η δυνατότητα εκτίμησης του δείκτη σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, από ενός μηνός, SPEI_1, έως και σαράντα οχτώ μηνών, SPEI_48, ή και περισσότερο επιτρέποντας τη μελέτη της ξηρασίας στο πλαίσιο της κλιματικής μεταβολής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του δείκτη SPEI για διαστήματα ενός, τριών και δώδεκα μηνών (SPEI_1, SPEI_3 και SPEI_12). Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του δείκτη είναι ότι ως μηνιαίος δείκτης, οι ταχέως αναπτυσσόμενες συνθήκες ξηρασίας μπορεί να μην εντοπιστούν γρήγορα από αυτόν.

Ο υπολογισμός του δείκτη ξηρασίας SPEI είναι αρκετά απλός και βασίζεται στον τρόπο υπολογισμού του SPI (Παράρτημα II), εισάγοντας μηνιαίες ή εβδομαδιαίες τιμές βροχόπτωσης (P_i), με τη διαφορά ότι αντί για την βροχόπτωση εισάγεται η διαφορά της βροχόπτωσης από την δυναμική εξατμισοδιαπνοή (PET_i). Στην ουσία, η διαδικασία αντιπροσωπεύει την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{Εξ. (3)}$$

και ο υπολογισμός του σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, μεγαλύτερες του μηνός δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{k}{n} D = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-1} \quad \text{Εξ. (4)}$$

όπου k (μήνες) της χρονικής κλίμακας υπολογισμού του δείκτη και n ο υπολογιζόμενος μήνας.

Ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε επιστημονική μέθοδο από μετεωρολογικές παραμέτρους που καταγράφονται σε μετεωρολογικούς σταθμούς. Σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα δεδομένων, τέτοιες μέθοδοι περιλαμβάνουν φυσικές μεθόδους (π.χ. τη μέθοδο Penman-Monteith, PM) και μοντέλα που βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις, όπου η δυναμική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με λιγότερες απαιτήσεις δεδομένων. Η αρχική διατύπωση του SPEI πρότεινε τη χρήση της εξίσωσης Thornthwaite (Th) για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Thornthwaite 1948), όπου απαιτείται μόνο η μέση ημερήσια θερμοκρασία και το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής. Η μέθοδος PM έχει υιοθετηθεί από τη Διεθνή Επιτροπή Άρδευσης και Αποχέτευσης (ICID), τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) και την Αμερικανική Εταιρεία Πολιτικών Μηχανικών (ASCE), ως τυπική διαδικασία για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η μέθοδος όμως PM απαιτεί επιπλέον δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, όπως ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου και σχετική υγρασία, τα οποία πολλοί μετεωρολογικοί σταθμοί δεν μετρούν συνήθως, και οι μακροπρόθεσμες εγγραφές αυτών των μεταβλητών δεν είναι πάντα διαθέσιμες με αποτέλεσμα την δυσκολία εφαρμογής του δείκτη σε ένα σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας σε πραγματικό χρόνο.

Η ταξινόμηση του δείκτη SPEI ακολουθεί αυτή του SPI. Ένα ακραίο επεισόδιο ξηρασίας εμφανίζεται σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα όταν ο δείκτης λαμβάνει τιμή μικρότερη ή ίση από -1.5. Το επεισόδιο θεωρείται ότι τελειώνει όταν ο δείκτης λαμβάνει ξανά θετικές τιμές. Η διάρκεια του επεισοδίου καθορίζεται από το διάστημα των αρνητικών τιμών του δείκτη, ενώ η έντασή του από τη μέγιστη αρνητική τιμή

κατά την διάρκεια του επεισοδίου. Η κατάταξη των ξηρών και υγρών περιόδων σύμφωνα με τον δείκτη SPEI απεικονίζεται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2. Κατάταξη των ξηρών και υγρών περιόδων σύμφωνα με τον δείκτη ξηρασίας SPEI.

Τιμές του δείκτη SPEI	Χαρακτηρισμός Περιόδου
≥ 2.0	Εξαιρετικά υγρή περίοδος (Extremely wet)
1.5 έως 1.99	Πολύ υγρή περίοδος (Very wet)
1.0 έως 1.49	Υγρή περίοδος (Moderate wet)
-0.99 έως 0.99	Κανονική περίοδος (Near normal)
-1.49 έως -1.0	Μέτρια ξηρασία (Moderate dry)
-1.99 έως -1.5	Σημαντική ξηρασία (Severely dry)
≤ -2.0	Εξαιρετική ξηρασία (Extremely dry)

2.3. ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ - SWCI

Ο Δείκτης Κατάστασης Εδαφικής Υγρασίας (Soil Water Condition Index – SWCI) είναι ένας κανονικοποιημένος δείκτης του δείκτη SWI που αναλύθηκε στο Κεφ.1. Οπότε ο δείκτης SWCI είναι ένας τηλεπισκοπικός δείκτης κατάλληλος για την παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας, καθώς εξετάζει το διαθέσιμο ποσό υγρασίας σε διάφορα επίπεδα του εδάφους. Οι αξιολογήσεις της υγρασίας του εδάφους βασίζονται σε ημερήσιες και δεκαήμερες τιμές του δείκτη SWI (Daily Soil Moisture Index - SWI και Decadal Soil Moisture Index - SWI₁₀) που παρέχονται από την υπηρεσία AfriCultuReS. Η εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους προσδιορίζεται από την απόκλιση του SWI (SWI₁₀) από τις παρατηρούμενες ελάχιστες και μέγιστες τιμές για μια χρονοσειρά σε μια τοποθεσία (AfriCultuReS 2020).

Ο υπολογισμός του δείκτη SWCI γίνεται βάση της εξίσωσης:

$$SWCI = \frac{SWI_{10} - SWI_{10_{mean}}}{\sigma} \quad \text{Εξ. (5)}$$

όπου SWI_{10} η πραγματική δεκαήμερη τιμή του SWI_{10} , $SWI_{10_{mean}}$ η στατιστική μέση τιμή του SWI_{10} με 10ετη περίοδο αναφοράς, και σ η τυπική απόκλιση που υπολογίζεται στο σύνολο της χρονοσειράς για τον SWI_{10} .

Ο υπολογισμός βάσει της εξίσωσης γίνεται σε οκτώ επίπεδα, με κάθε επίπεδο να υπολογίζει την εδαφική υγρασία σε διαφορετικά βάθη στο έδαφος, στο σύνολο των χρονικών διαστημάτων (από μια έως εκατό μέρες). Η τελική τιμή του δείκτη SWCI δίνεται σε κάθε ένα από τα οκτώ επίπεδα, με το βάθος να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο τους εδάφους. Η προτεινόμενη κατάταξη της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό βάσει των τιμών του SWCI απεικονίζεται στον Πίνακα 2.3 και είναι συνάρτηση της τιμής της τυπικής απόκλισης (σ).

Πίνακας 2.3. Κατάταξη της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό σύμφωνα με τον δείκτη ξηρασίας SWCI.

Τιμές του δείκτη SWCI	Περιεκτικότητα του Εδάφους σε Νερό
$\geq 2\sigma$	Πολύ Υψηλή (Very High Water)
$\sigma \text{ έως } 2\sigma$	Υψηλή (High Water)
$-\sigma \text{ έως } \sigma$	Κανονική (Normal Water)
$-2\sigma \text{ έως } -\sigma$	Χαμηλή (Low Water)
$\leq -2\sigma$	Πολύ Χαμηλή (Very Low Water)

2.4. ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ - VCI

Ο Δείκτης Κατάστασης Βλάστησης (Vegetation Condition Index - VCI) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κατάστασης μιας καλλιέργειας ή της συνολικής βλάστησης μια περιοχής σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και των συνθηκών ξηρασίας. Ο δείκτης VCI είναι ένας τηλεπισκοπικός δείκτης κατάλληλος για την παρακολούθηση της γεωργικής ξηρασίας, ειδικά κατά τις περιόδους μέγιστης ανάπτυξης της βλάστησης (Quiring and Ganesh 2010). Χρησιμοποιώντας την ανακλαστικότητα στο κόκκινο (Red) και στο εγγύς υπέρυθρο (Near-infrared) φάσμα,

ο δείκτης VCI χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των συνθηκών ξηρασίας και τον προσδιορισμό των χρόνων έναρξης, της διάρκειας και της σοβαρότητάς της, ειδικά σε περιοχές όπου τα συμβάντα ξηρασίας είναι εντοπισμένα και προκαθορισμένα.

Ο δείκτης VCI που είναι στην ουσία μια κανονικοποίηση του δείκτη NDVI, προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Kogan (1990, 1995) και υπολογίζεται ως εξής:

$$VCI_{yp} = \frac{NDVI_{yp} - MIN_p}{MAX_p - MIN_p} \quad \text{Εξ. (6)}$$

όπου $NDVI_{yp}$ είναι η παρατηρούμενη τιμή NDVI το έτος y και την περίοδο p , το MIN_p είναι το μακροπρόθεσμο ελάχιστο και το MAX_p είναι το μακροπρόθεσμο μέγιστο στην περίοδο p .

Ο δείκτης VCI εκφράζεται ως κλάσμα και υποδεικνύει πού βρίσκεται μια παρατήρηση μεταξύ των άκρων (ελάχιστο και μέγιστο) των προηγούμενων ετών. Μια μεγαλύτερη τιμή VCI υποδηλώνει καλή ανάπτυξη της βλάστησης και χαμηλό βαθμό ξηρασίας, ενώ μια μικρότερη τιμή VCI δείχνει κακή ανάπτυξη βλάστησης και υψηλότερο βαθμό ξηρασίας (Sha et al. 2013, Dutta et al. 2015). Η μέθοδος αυτή μπορεί να μειώσει ή και να εξαλείψει τις επιπτώσεις που σχετίζονται με διαφορετικές γεωργικές τοποθεσίες, οικολογικά συστήματα, συνθήκες εδάφους που έχουν εντοπιστεί στον δείκτη NDVI και να αντικατοπτρίζει καλύτερα τις ελλείψεις των καλλιεργειών σε υδατικά αποθέματα (Kogan 1995, Liu and Kogan 1996).

Ο δείκτης VCI έχει σχεδιαστεί για να αξιολογεί την υγεία της βλάστησης, ενώ διαχωρίζει τα στοιχεία του δείκτη NDVI που σχετίζονται με τις μετεωρολογικές συνθήκες από τα οικολογικά στοιχεία. Συγκεκριμένα, ο Δείκτης Κατάστασης Βλάστησης (VCI) συγκρίνει το τρέχον NDVI με το εύρος τιμών που παρατηρήθηκαν την ίδια στιγμή τα προηγούμενα χρόνια. Δεδομένου ότι ο VCI είναι παράγωγο του NDVI, η ποιότητά του εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την ποιότητα του NDVI και τη διάρκεια των διαθέσιμων ιστορικών χρονοσειρών. Συγκεκριμένα, είναι ευαίσθητο στον «θόρυβο» των νεφών στο αρχικό σύνολο δεδομένων NDVI. Οι κατηγορίες των συνθηκών βλάστησης βάσει των τιμών του δείκτη VCI και την κατηγοριοποίησή τους από τους Qian et al, το 2016 παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4. Συνθήκες βλάστησης σύμφωνα με τον δείκτη VCI.

Τιμές του δείκτη VCI	Συνθήκες Βλάστησης
0.7 έως 1.0	Κανονικές (Normal vegetation condition)
0.5 έως 0.69	Μέτριες (Moderate vegetation condition)
0.3 έως 0.49	Κακές (Poor vegetation growth)
0.0 έως 0.29	Πολύ κακές (Extremely poor growth condition)

2.5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η βάση των δεδομένων για την μελέτη της ξηρασίας στην Ν. Αφρική αποτελείται από 48 μηνιαίες τιμές των δεικτών SPEI (1,3 και 12) και 144 τιμές ανά δεκαήμερο (1^η, 11^η και 21^η κάθε μήνα) για τους δείκτες SWCI και VCI που αντιστοιχούν στη χρονική περίοδο από τον Ιανουάριο του 2017 έως τον Δεκέμβριο του 2020 για κάθε σημείο πλέγματος στην περιοχή μελέτης. Το πλέγμα της περιοχής των δεδομένων είναι 850×750 πάνω μόνο από ηπειρωτικές περιοχές.

Τα δεδομένα του Δείκτη Κατάστασης Βλάστησης (VCI) για την Αφρική ($30^{\circ}\text{W} - 60^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{N} - 40^{\circ}\text{S}$) προκύπτουν βάση των χρονοσειρών του SPOT-VEGETATION (Ιανουάριος 2013 - Μάιος 2014) και του PROBA-V (Ιούνιος 2014 – Ιούνιος 2020), του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI), και αφορούν την ευρωστία της φυλλικής επιφάνειας των φυτών. Είναι διαθέσιμα άμεσα από το Copernicus NDVI v2, συγκρίνοντας πραγματικές παρατηρήσεις με μακροπρόθεσμα στατιστικά στοιχεία, με βάση μια περίοδο 14 ετών από το 1999-2012. Τα βήματα που εκτελούνται από την ομάδα Copernicus Land Services για την εξαγωγή του VCI από τις τιμές NDVI είναι ο υπολογισμός των ελάχιστων και μέγιστων τιμών του Copernicus NDVI v2 κάθε 10 ημέρες στις χρονοσειρές των δεδομένων PROBA-V και SPOT-VEGETATION ($\text{NDVI}_{\min}$, $\text{NDVI}_{\max}$), η σύγκριση του τρέχοντος NDVI με τις ιστορικές τιμές αναφοράς κάθε 10 ημέρες, και ο υπολογισμός του δείκτη VCI από την εξίσωση του Kogan (1990). Η χωρική κάλυψη των τιμών του δείκτη VCI στην παρούσα εργασία αφορά την περιοχή της Ν. Αφρικής, με χωρική διακριτική ικανότητα 1 km και χρονική ανάλυση 10 ημερών.

Τα δεδομένα του Δείκτη Κατάστασης Εδαφικής Υγρασίας SWCI προέρχονται από την υπηρεσία Copernicus Global Land και την χρήση του δορυφόρου πολικής

τροχιάς Metop της EUMETSAT και του αισθητήρα του ASCAT βάσει των οποίων προκύπτουν οι τιμές του δείκτη SWI σε ημερήσια βάση και παγκόσμια κάλυψη. Η χωρική διακριτική ικανότητα είναι $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (10km). Η βάση των δεδομένων της υπηρεσίας είναι από το 2007 έως σήμερα. Στην συνέχεια σύμφωνα με τις εξισώσεις (2) και (5) υπολογίζεται πρώτα ο δείκτης SWI μέσω του SSM και στην συνέχεια ο SWI_10 σαν μέση τιμή δεκαήμερου του SWI και έτσι προκύπτει ο SWCI ο οποίος παρέχεται από την υπηρεσία. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν οι τιμές του δείκτη SWCI που προκύπτουν από το επίπεδο $T = 40$ (days), το οποίο παραπέμπει στον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας σε βάθος εδάφους ~ 40 cm (Paulik et al. 2014). Η περίοδος αναφοράς των δεδομένων του δείκτη SWCI_040 που αναλυθήκαν στην παρούσα εργασία είναι η δεκαετία 2007-2016.

Τέλος, τα επίγεια δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για τον υπολογισμό των δεικτών SPEI (1, 3 και 12) προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πρόγνωσης Καιρού (ECMWF) και είναι δεδομένα επανάλυσης ERA5 (ERA5 Reanalysis) παγκόσμιας κάλυψης όπως παρέχονται από την υπηρεσία Copernicus (Climate Change Service). Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) παρέχεται επίσης από τα ERA5 και ο υπολογισμός της αναφέρεται για γεωργική γη καλά ποτισμένη, υιοθετώντας την συνθήκη ότι η ατμόσφαιρα δεν επηρεάζεται από αυτή την τεχνική επιφάνεια. Η χωρική διακριτική ικανότητα των δεδομένων είναι $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ και με περίοδο αναφοράς την τριακονταετία 1981-2010.

2.6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για την μελέτη της ξηρασίας στην Ν. Αφρική στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν οι χωρικές και χρονικές κατανομές πέντε δεικτών ξηρασίας. Οι δείκτες που επιλέχθηκαν είναι ο μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας επίγειων δεδομένων SPEI χρονικής κλίμακας ενός μηνός (εφεξής SPEI_1), ο μετεωρολογικός δείκτης SPEI χρονικής κλίμακας τριών μηνών (εφεξής SPEI_3), ο μετεωρολογικός δείκτης SPEI χρονικής κλίμακας δώδεκα μηνών (εφεξής SPEI_12), ο γεωργικός δείκτης ξηρασίας δορυφορικών δεδομένων VCI και ο υδρολογικός δείκτης ξηρασίας δορυφορικών δεδομένων SWCI.

Επιλέχθηκαν έξι σημεία της περιοχής μελέτης από έξι διαφορετικές επαρχίες της Ν. Αφρικής, όπου βάσει των τιμών των δεικτών ξηρασίας κατασκευάστηκαν διαγράμματα για το σύνολο της χρονοσειράς (1/1/2017 – 31/12/2020) και για κάθε

έτος ξεχωριστά για κάθε σημείο. Για κάθε επαρχία, και για κάθε περίοδο μελέτης, αντιστοιχούν τρία διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τους δείκτες SWCI και VCI με έναν από τους τρεις δείκτες SPEI σε κάθε ένα διάγραμμα (π.χ. Σχήμα 3.3). Τα διαγράμματα αποτελούνται από έναν πρωτεύοντα άξονα που οι τιμές του αντιστοιχούν στις τιμές των δεικτών SPEI και SWCI και έναν δευτερεύοντα άξονα όπου οι τιμές του αντιστοιχούν στις τιμές του δείκτη VCI. Μέσω των διαγραμμάτων ο εκάστοτε δείκτης αναλύεται ποσοτικά για κάθε διαθέσιμη τιμή του, διερευνάται ως προς τις τάσεις του και εξετάζονται πιθανές συμφωνίες του ή μη με τους άλλους δείκτες, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Επιπρόσθετα, μέσω των διαγραμμάτων γίνεται σύγκριση των τάσεων και των τιμών των δεικτών μεταξύ διαφορετικών περιοχών, με σκοπό την χωρική μελέτη των δεικτών ξηρασίας στις έξι επαρχίες.

Μέσω τις ποσοτικής ανάλυσης των τιμών των πέντε δεικτών προσδιορίζεται η πιθανή έναρξη και λήξη των επεισοδίων ξηρασίας, καθώς και η διάρκεια του εκάστοτε επεισοδίου. Μέσω της ανάλυσης των τάσεων των δεικτών επισημαίνονται οι μεταβολές σε πιο υγρές ή ξηρές συνθήκες, ενώ η σύγκριση των δεικτών υλοποιείται για την εξέταση του βαθμού συμφωνίας τους, καθώς και για τον εντοπισμό συγκεκριμένων μοτίβων διαφοροποίησής τους.

Για την καλύτερη χωρική και χρονική ανάλυση των επεισοδίων ξηρασίας στην Ν. Αφρική κατασκευάστηκαν χάρτες, ένας για κάθε δείκτη, όπου απεικονίζονται οι στιγμιαίες τιμές των δεικτών για το μέσο κάθε εποχής (2^ο δεκαήμερο Ιανουαρίου για το αυστραλιανό καλοκαίρι, 2^ο δεκαήμερο Απριλίου για το φθινόπωρο, 2^ο δεκαήμερο Ιουλίου για τον χειμώνα και 2^ο δεκαήμερο του Οκτωβρίου για την άνοιξη) και για τα τέσσερα έτη μελέτης (2017-2020) για όλη την χώρα.

Τα επεισόδια ξηρασίας που αναλύονται στην παρούσα εργασία αφορούν την ξηρασία του 2017 στα νοτιοδυτικά κυρίως της χώρας και την περιοχή του Cape Town, την ξηρασία του δεύτερου εξαμήνου του 2018 που εντοπίζεται κυρίως στις κεντρικές και ανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής, και την ξηρασία του 2019 που απασχόλησε όλη την χώρα. Τα τρία προαναφερθέντα επεισόδια για την τριετία 2017-2019 στην Ν. Αφρική αναλύθηκαν σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές στο Κεφ. 3. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι η επιλογή ανάλυσης της πρώτης μελέτης περίπτωσης (2017 - Cape Town) έγινε βάσει των βιβλιογραφικών αναφορών. Αντίθετα, η ανάγκη μελέτης των δύο άλλων περιπτώσεων (2018 και 2019) προήλθε από την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας και οι βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις τους υλοποιήθηκαν

μεταγενέστερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ – ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Κατά την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας που διαπραγματεύεται η συγκριμένη εργασία την τετραετία 2017 – 2020 εντοπίζεται μεγάλος αριθμός επεισοδίων ξηρασίας με έντονα χαρακτηριστικά και με μεγάλη χωρική έκταση και διάρκεια. Τρεις μελέτες περίπτωσης (case study) που αφορούν την ξηρασία στην Ν. Αφρική την περίοδο 2017-2020 ξεχωρίζουν από την ανάλυση των δεικτών. Στην αρχή, πριν την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας, για κάθε περίπτωση αναφέρονται επιγραμματικά οι αναφορές από την βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις.

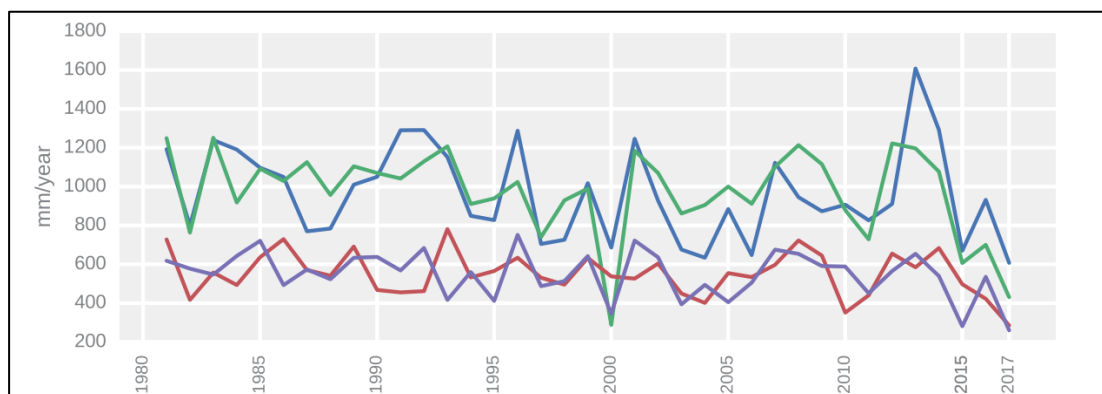
3.1. 1^η ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΞΗΡΑΣΙΑ 2017 - «ZERO DAY», CAPE TOWN

3.1.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση του «ZERO DAY»

Η κρίση νερού «Zero Day» στο Cape Town στη Ν. Αφρική ήταν μια περίοδος σοβαρής λειψυδρίας στην επαρχία του Western Cape, που επηρέασε κυρίως την πόλη του Cape Town. Κατά τη διάρκεια του 2017, η ξηρασία επιδεινώθηκε σημαντικά στην περιοχή Cape Province της Ν. Αφρικής. Το 2015 και το 2016, οι βροχοπτώσεις κυμάνθηκαν κάτω του μέσου όρου, 325 mm και 221 mm αντίστοιχα, και στη συνέχεια το 2017 αποτέλεσε για το Cape Town το πιο ξηρό καταγεγραμμένο έτος, με συνολική βροχόπτωση 157 mm (47% χαμηλότερη του μέσου όρου για την περίοδο 1981-2010).

Η τριετία 2015-2017, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, ήταν επίσης η ξηρότερη καταγεγραμμένη (36% χαμηλότερη του μέσου όρου). Οι ξηρές συνθήκες οδήγησαν

σε σοβαρή εξάντληση των τοπικών αποθεμάτων νερού των έξι φραγμάτων που τροφοδοτούν με νερό την περιοχή και τα οποία το 2014 βρίσκονταν στο 100% της χωρητικότητάς τους.

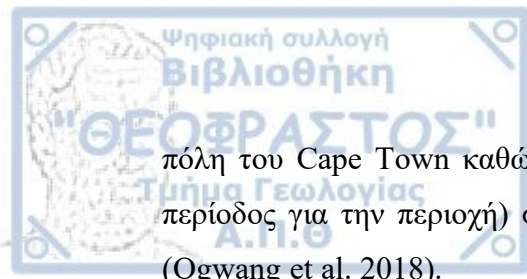


Σχήμα 3.1. Συνολικές ετήσιες βροχοπτώσεις που καταγράφηκαν από τους τέσσερις σταθμούς της Αρχής Υδάτων και Αποχέτευσης της Νοτίου Αφρικής στα φράγματα **Vogel**, **Vallij**, **Zacharahoek**, **Threewaterskloof** και **Kogelbaai** στην επαρχία του Δυτικού Ακρωτήριου από το 1981 έως το 2017. Τα έτη τελειώνουν τον Οκτώβριο (ετήσιος υδρολογικός κύκλος) (Wolski 2018).

Αντίθετα, ήδη από τις αρχές του 2017 ισχυρές βροχές επηρεάζουν τις επαρχίες Limpopo και Mpumalanga στα βόρεια και ανατολικά της χώρας, οι οποίες συνεχίστηκαν μέχρι τον Απρίλιο του 2017, με αποτέλεσμα την απώλεια τουλάχιστον 7 ανθρώπων και τις σοβαρές ζημιές στις υποδομές και στην γεωργία από την υπερχειλίση των ποταμών.

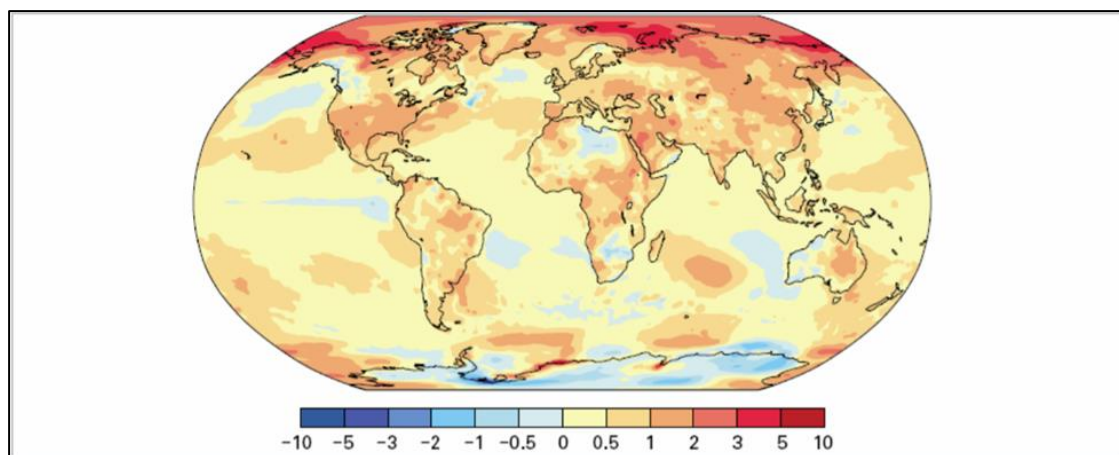
Ενώ η στάθμη του νερού των φραγμάτων μειώνονταν από το 2015, η υδατική κρίση του Cape Town κορυφώθηκε από τα μέσα του 2017 έως τα μέσα του 2018, όταν τα επίπεδα του νερού κυμαίνονταν μεταξύ 15% και 30% της συνολικής χωρητικότητας των φραγμάτων. Ως Ημέρα Μηδέν "ορίστηκε" η 16η Απριλίου 2018, δηλαδή η ημέρα κατά την οποία το μέσο επίπεδο όλων των ταμιευτήρων που εξυπηρετούν την πόλη του Cape Town θα έπεφτε κάτω από το 13.5% και κατά συνέπεια θα διακοπτόταν η παροχή νερού για τα 4.000.000 κατοίκους της πόλης (Richman & Leslie 2018).

Εντέλει, η εμφάνιση ορισμένων βροχοπτώσεων τον Φεβρουάριο του 2018, πριν από την κλιματικά κανονική περίοδο βροχοπτώσεων για την περιοχή (WRZ), και η πρόωμη έναρξη της υετικής περιόδου τον Απρίλιο του 2018, μετατόπισαν την «Ημέρα Μηδέν» για τον Αύγουστο του 2018, και τελικά δεν διακόπηκε η παροχή νερού στην



πόλη του Cape Town καθώς κατά την περίοδο του χειμώνα του 2018 (JJA - υγρή περίοδος για την περιοχή) σημειώθηκαν βροχοπτώσεις κοντά στις κλιματικές τιμές (Ogwang et al. 2018).

Η κρίση του νερού είχε εκτεταμένες επιπτώσεις στην οικονομία της περιοχής, καθώς επίσης στην υγεία και την επισιτιστική ασφάλεια, με αποτέλεσμα την απώλεια 37.000 θέσεων εργασίας στην επαρχία του Western Cape και εκτιμάται ότι 50.000 άνθρωποι οδηγήθηκαν κάτω από το όριο της φτώχειας λόγω της απώλειας θέσεων εργασίας, του πληθωρισμού και της αύξησης των τιμών των τροφίμων. Ταυτόχρονα, υπήρξαν σημαντικές επιπτώσεις στην γεωργία καθώς επιβλήθηκαν περιορισμοί στην κατανάλωση νερού τόσο στη γεωργική όσο και στην αστική χρήση του δημοτικού νερού. Κατά μέσο όρο, ο γεωργικός τομέας στο Western Cape χρειάστηκε να μειώσει τη χρήση του νερού κατά 60% από το 2017. Οι περιορισμοί νερού κυμαίνονταν από 50% στην κοιλάδα Breede, 60% στον ποταμό Berg και την περιοχή Riviersonderend και 87% στην κοιλάδα του ποταμού Lower Olifants (Ziervogel 2019).



Σχήμα 3.2. Απόκλιση θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια για το 2017, σε σχέση με το μέσο όρο της περιόδου 1981-2010 (WMO 2018: ERA-Interim data, European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) Copernicus Climate Change Service).

Το έτος 2017 ήταν σαφώς το θερμότερο καταγεγραμμένο έτος για την Ν. Αφρική, το οποίο δεν επηρεάστηκε από το φαινόμενο El Niño, προηγήθηκαν όμως δύο χρονιές (2015-2016) έντονου El Niño. Συγκεκριμένα, ουδέτερες συνθήκες ENSO επικράτησαν για το μεγαλύτερο διάστημα του 2017, με ένα ασθενές φαινόμενο La Niña να αναπτύσσεται στο τέλος του χρόνου. Εντούτοις όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 η ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή της Ν. Αφρικής, για το 2017, εμφάνισε απόκλιση

από την κλιματική τιμή από $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, πολύ κοντά στην μέση κλιματική απόκλιση παγκοσμίως ($+0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$) (WMO 2018).

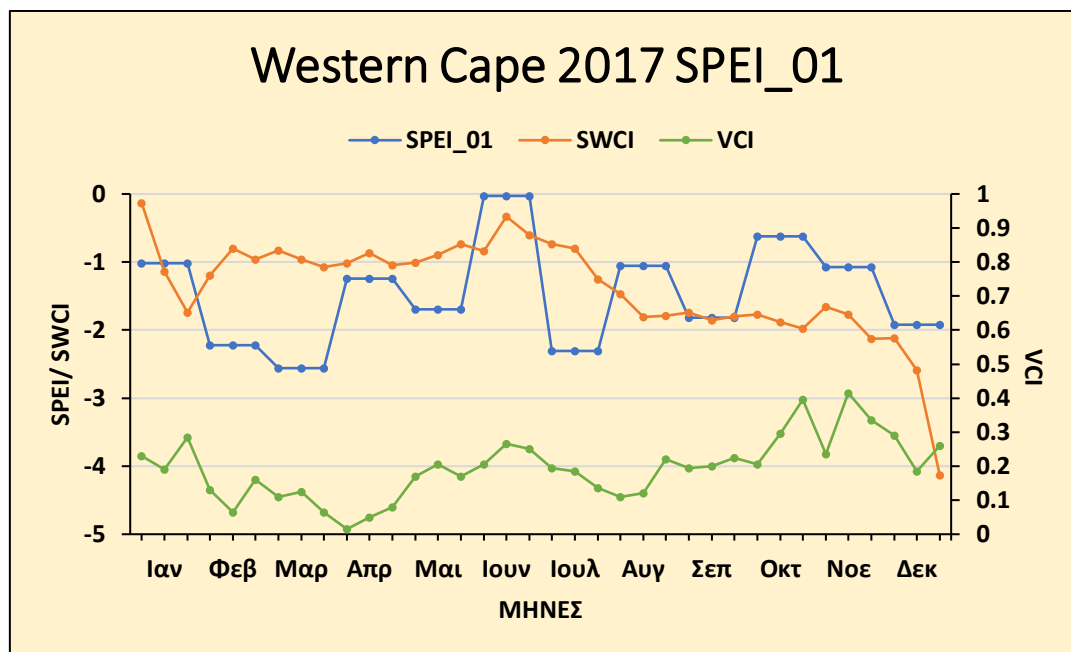
Γίνεται αντιληπτό ότι η κύρια αιτία για την εμφάνιση του συγκεκριμένου σοβαρού επεισοδίου ξηρασίας στην Ν. Αφρική ήταν οι μειωμένες βροχοπτώσεις για μεγάλη χρονική περίοδο και δευτερευόντως η εμφάνιση θερμοκρασιών υψηλότερων των κλιματικών. Οι φθίνουσες τάσεις των βροχοπτώσεων της τριετίας 2015 - 2017 για το νοτιοδυτικό άκρο της Ν. Αφρικής συνδέονται με ευρύτερες αλλαγές στην ατμοσφαιρική και ωκεάνια κυκλοφορία στο Νότιο ημισφαίριο. Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της Ν. Αφρικής δέχεται τις βροχοπτώσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (DJF), η περιοχή του Cape Town και το παρακείμενο νοτιοδυτικό άκρο δέχονται το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων το χειμώνα (JJA), κυρίως από ψυχρά μέτωπα που σχετίζονται με κυκλώνες των μεσαίων γεωγραφικών πλατών που κινούνται ανατολικά κατά μήκος του Νότιου Ατλαντικού. Τοπογραφικά η πόλη βρίσκεται κοντά στην οροσειρά Cape Fold και οι ορογραφικές επιρροές αυξάνουν τις βροχοπτώσεις. Η ισχυρή περιφερειακή καθίζηση που προκαλείται από τον ηπειρωτικό αντικυκλώνα σημαίνει ότι η μετωπική βροχόπτωση δεν εκτείνεται ανατολικότερα και βορειότερα, αντίστοιχα, όπου βρίσκονται οι έρημοι Karoo και Namib. Η διαχρονική μεταβλητότητα, έτσι, στις χειμερινές βροχοπτώσεις στην περιοχή του Cape Town οφείλεται κυρίως στις διαφορές στον αριθμό και την ένταση των ψυχρών μετώπων που φτάνουν στην ξηρά.

Σε χρονιές που οι υποτροπικοί αντικυκλώνες του ηπειρωτικού κορμού της Νότιας Αφρικής ή του Νότιου Ατλαντικού είναι ασυνήθιστα ισχυροί ή πιο νότια από την κλιματική τους θέση, το jet stream και οι ροές υγρασίας του Νότιου Ατλαντικού μετακινούνται προς τον Νότιο Πόλο και τα ψυχρά μέτωπα εξασθενούν νοτιότερα από το Cape Town (Σχήμα 9 Παρ. Ι) (Sousa et al. 2018).

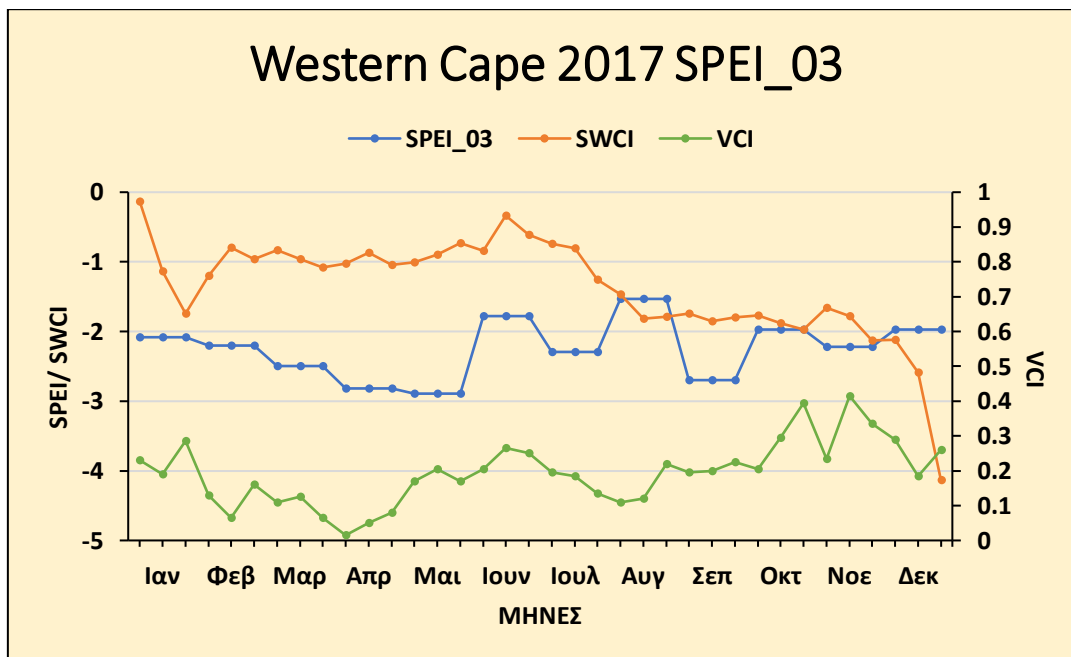
Ταυτόχρονα η πολική επέκταση του κυττάρου κυκλοφορίας Hadley και, ως εκ τούτου, η αυξημένη πίεση στη στάθμη της θάλασσας κατά μήκος της πολικής πλευράς του ημιμόνιμου αντικυκλώνα του Νότιου Ατλαντικού, καταστέλλει τις συνθήκες που προωθούν τις ορογραφικές βροχοπτώσεις και ευθύνεται για την παρατηρούμενη μείωση του αριθμού των ημερών βροχόπτωσης που σχετίζονται με τη διέλευση των μετωπικών συστημάτων για την περίοδο 2015 - 2017 στην δυτική και νότια Ν. Αφρική (Burls et al. 2019).

3.1.2 Ανάλυση των Δεικτών Ξηρασίας της 1^{ης} Μελέτης Περίπτωσης

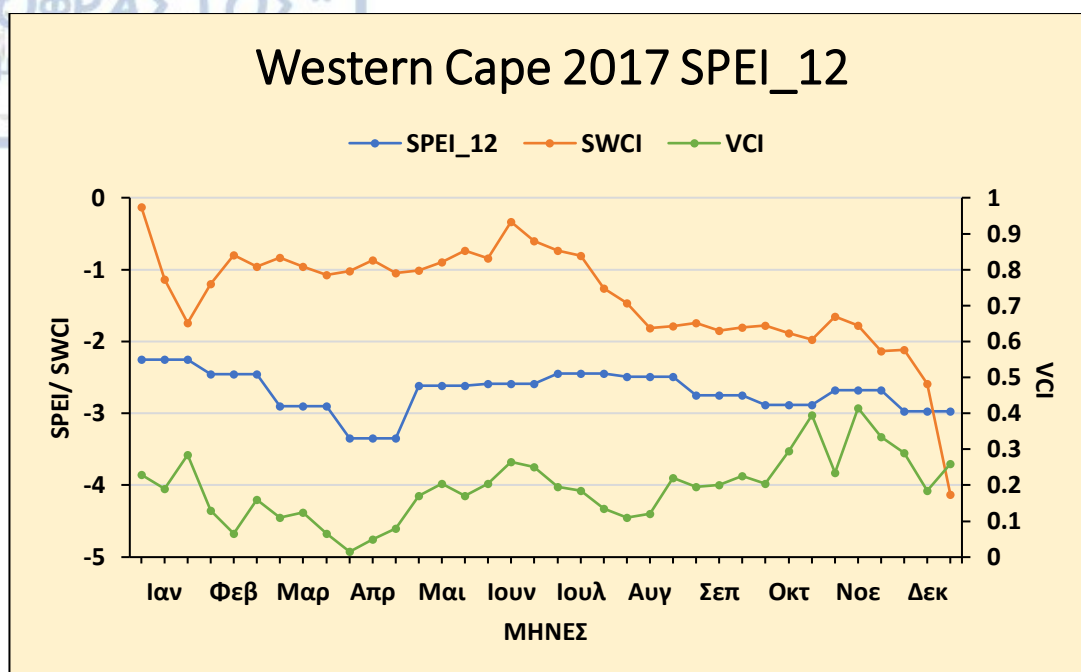
Στην έναρξη της περιόδου μελέτης (Ιανουάριος 2017), οι δείκτες στην πλειονηφία τους εμφανίζουν (Σχήματα 3.3 – 3.5) στην συγκεκριμένη περίοδο τιμές που παραπέμπουν σε συνθήκες έντονης ξηρασίας.



Σχήμα 3.3. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Cape Town (Western Cape) για το 2017.



Σχήμα 3.4. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Cape Town (Western Cape) για το 2017.



Σχήμα 3.5. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Cape Town (Western Cape) για το 2017.

Ειδικότερα οι δείκτες VCI (< 0.3), SPEI_3 (< -2) και SPEI_12 (< -2) τοποθετούν τον Ιανουάριο του 2017, για την περιοχή του Western Cape, στην χαμηλότερη κλίμακα κατάταξής τους, περιγράφοντας την περίοδο με εξαιρετικά ακραία ξηρασία και πολύ κακές συνθήκες βλάστησης, ενώ ο δείκτης SPEI_1 (< -1) εμφανίζει την αντίστοιχη περίοδο με μέτρια υγρασία και ο δείκτης SWCI (< 0) παρουσιάζει αρνητικές τιμές χαρακτηρίζοντας την περίοδο έντονα ξηρική (Σχήμα 1 Παρ. Ι).

Κατά την χρονική εξέλιξη των τιμών των δεικτών κατά το πρώτο τρίμηνο του 2017 (Ιανουάριος - Μάρτιος) το σύνολό τους εμφανίζει πτωτική πορεία παραπέμποντας, έτσι, σε επιδείνωση της έντασης της ξηρασίας κατά την περίοδο αυτή στην περιοχή του Western Cape. Συγκεκριμένα η έντονη πτωτική πορεία του δείκτη SWCI, που εμφανίζεται τον Ιανουάριο του 2017, εντοπίζεται μεταγενέστερα χρονικά και στους δείκτες SPEI_1 και VCI, ενώ στους δείκτες SPEI_3 και SPEI_12 η πτώση είναι λιγότερο έντονη αλλά σταδιακή και επεκτείνεται και στους φθινοπωρινούς μήνες του 2017 (SPEI_3 συνεχής πτωτική πορεία έως τον Μάιο του 2017 και SPEI_12 συνεχής πτωτική πορεία έως και τον Απρίλιο του 2017) (Σχήμα 2 Παρ. Ι).

Ταυτόχρονα, το φθινόπωρο 2017 (ΜΑΜ) τρεις από τους πέντε εξεταζόμενους δείκτες ξηρασίας εμφανίζουν τις ελάχιστες τιμές τους για την περίοδο μελέτης (Ιανουάριος 2017 - Αύγουστος 2018), φανερόντας έτσι ότι το υπό μελέτη



επεισόδιο ξηρασίας την περίοδο αυτή εμφάνισε τα πιο έντονα χαρακτηριστικά του την περίοδο αυτή. Αναλυτικότερα, ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζει για τον Μάρτιο του 2017 την χαμηλότερη τιμή του (< -2) παραπέμποντας σε συνθήκες εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας, ο δείκτης VCI εμφανίζει τιμές σχεδόν μηδενικές για το δίμηνο Μαρτίου – Απριλίου, χαρακτηρίζοντας τις συνθήκες βλάστησης για συγκεκριμένη περίοδο πολύ κακές, και ο δείκτης SPEI_3 εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή της χρονοσειράς τον Μάιο του 2017 (< -2) χαρακτηρίζοντας την περίοδο με εξαιρετικά ακραία ξηρασία. Επίσης, ο δείκτης SPEI_12 ναι μεν δεν εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή του για την εξεταζόμενη περίοδο (Ιανουάριος 2017 - Αύγουστος 2018), όμως παρουσιάζει τον Απρίλιο την χαμηλότερη τιμή του για το 2017, ένα έτος που χαρακτηρίζεται εξ ολοκλήρου από τον δείκτη SPEI_12 ως εξαιρετικά ξηρό.

Κατά την μετάβαση στην υγρή περίοδο του έτους για την περιοχή (Μάιος - Ιούνιος), οι δείκτες εμφανίζουν αυξητική πορεία στο σύνολο τους με εξαίρεση τον δείκτη SPEI_1 όπου περιγράφει το Ιούνιο του 2017 σαν περίοδο κανονικών συνθηκών ως προς την ξηρασία. Στο σύνολό τους οι υπόλοιποι δείκτες χαρακτηρίζουν το δίμηνο αυτό με συνθήκες μέτριας ή και έντονης (SWCI, SPEI_3 Ιουνίου) ή εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας (SPEI_12, SPEI_3 Μαΐου) και με συνθήκες πολύ κακής βλάστησης (VCI).

Η χρονική ανάλυση της προαναφερθείσας μεταστροφής της πορείας των δεικτών από πτωτική στις αρχές του 2017 σε ανοδική κατά την μετάβαση στην υγρή περίοδο του έτους (WRZ) προσδιορίζει ότι αυτή η αλλαγή συμπίπτει χρονικά για τρεις από τους πέντε δείκτες ξηρασίας (VCI, SPEI_1 και SWCI) και την οποία τοποθετούν στον Απρίλιο του 2017. Αντίθετα οι δείκτες SPEI_3 και SPEI_12 τοποθετούν την συγκεκριμένη μεταστροφή μεταγενέστερα (ο SPEI_3 στον Ιούνιο 2017 και ο SPEI_12 στον Μάιο 2017) φανερώνοντας μια πιθανή χρονική καθυστέρηση στην απόκριση των δύο συγκεκριμένων δεικτών σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ξηρασίας.

Στις αρχές της υγρής περιόδου για την περιοχή του Western Cape (Ιούνιος 2017) οι δείκτες SWCI και SPEI_1 εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους για το 2017 και ταυτόχρονα ο δείκτης SPEI_3 παρουσιάζει βελτίωση στην ένταση της ξηρασίας χαρακτηρίζοντάς την σημαντική σε σχέση με τους προηγούμενες μήνες του 2017 που περιγράφεται ως εξαιρετικά ακραία. Αντίθετα, οι δείκτες SPEI_12 και VCI συνεχίζουν να χαρακτηρίζουν τον Ιούνιο του 2017 σαν περίοδο με εξαιρετικά ακραία ξηρασία και πολύ κακές συνθήκες βλάστησης.



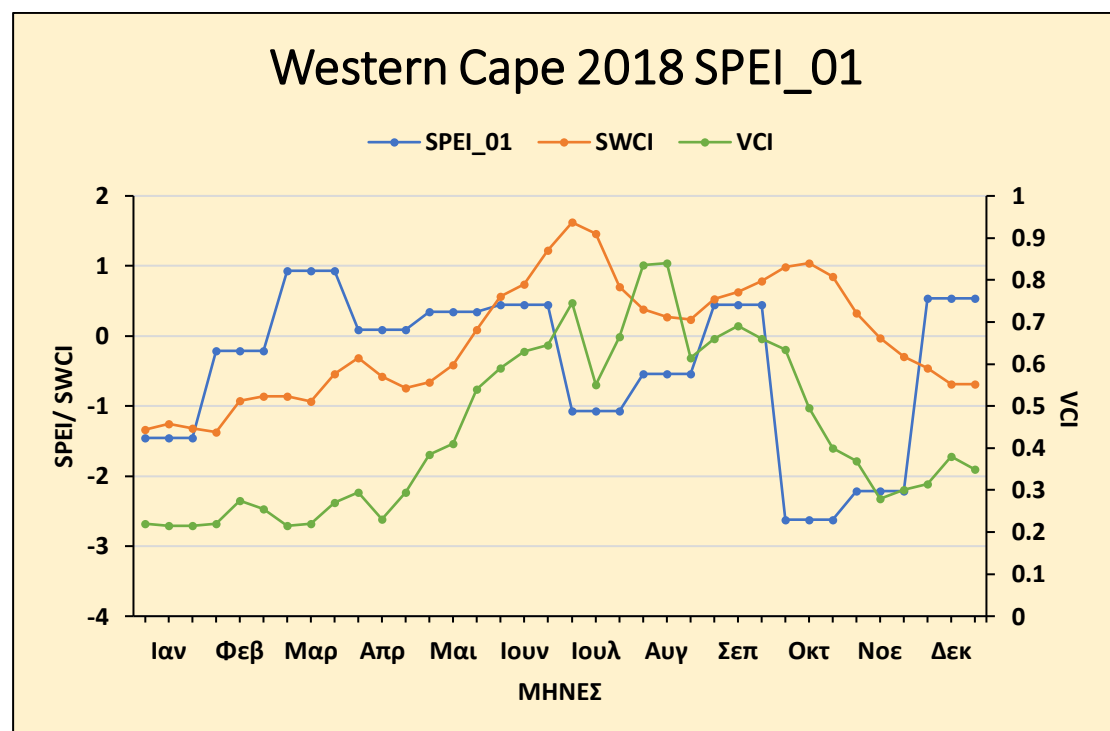
Κατά την διάρκεια του χειμώνα του 2017 (JJA) οι δείκτες εμφανίζουν νέα μεταστροφή της πορείας τους παρουσιάζοντας πτωτική διακύμανση στην πλειοψηφία τους. Συγκεκριμένα, οι δείκτες SWCI, VCI και SPEI_1 ελαττώνονται σταδιακά την συγκεκριμένη περίοδο επανερχόμενοι σε τιμές που αντιστοιχούν στο πρώτο τρίμηνο του 2017, περιγράφοντας εκ νέου συνθήκες σημαντικής ή έντονης ξηρασίας και πολύ κακές για την βλάστηση (Σχήματα 3.9 και 3.10). Ο δείκτης SPEI_12 στην υγρή περίοδο του έτους παρουσιάζεται αμετάβλητος, εμμένοντας έτσι στο προγενέστερο μοτίβο της εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας. Αντίθετα ο δείκτης SPEI_3 την περίοδο αυτή εμφανίζεται ανοδικός, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα την υψηλότερη τιμή του για το 2017, καταλήγοντας να περιγράψει το τέλος της περιόδου με σημαντική ξηρασία. Η διαφοροποίηση αυτή του δείκτη SPEI_3 σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες φαίνεται να οφείλεται στην καθυστερημένη χρονική αντίδραση του δείκτη η οποία εντοπίστηκε και στο πρώτο εξάμηνο του 2017, αλλά εμφανίζεται και στην συνέχεια της χρονοσειράς κατά την μετάβαση στην ξηρή περίοδο του 2017 όταν ο συγκεκριμένος δείκτης εμφανίζει πτωτική πορεία εν αντιθέσει με τους υπόλοιπους δείκτες ξηρασίας που παραμένουν αμετάβλητοι ή εμφανίζονται ελαφρώς ανοδικοί.

Την μεταβατική περίοδο από τον Σεπτέμβριο έως τον Νοέμβριο (Άνοιξη 2017) οι δείκτες SPEI_1 και VCI εμφανίζουν ανοδική πορεία, περιγράφοντας την περίοδο κανονική ως προς την ξηρασία ($SPEI_{1OCT} > -1$) και με κακές συνθήκες βλάστησης ($VCI_{OCT} \sim 0.4$), αντίστοιχα. Ειδικότερα ο δείκτης VCI το δίμηνο Οκτωβρίου – Νοεμβρίου παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές του για το 2017 μεταβάλλοντας τον χαρακτηρισμό των συνθηκών βλάστησης που ίσχυε για όλο το έτος από πολύ κακές σε κακές ($VCI > 0.3$). Ανοδική πορεία το δίμηνο Οκτωβρίου - Νοεμβρίου εμφανίζει και ο δείκτης SPEI_3 μετά την σημαντική πτώση που εμφανίζει στην αρχή της περιόδου (Σεπτέμβριος 2017), στην οποία έγινε αναφορά προηγουμένως, και η οποία έχει σαν αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από τον δείκτη, το σύνολο της περιόδου την άνοιξης ως εξαιρετικά ξηρή. Τέλος οι δείκτες SPEI_12 (< -2) και SWCI (< -1.5) στην αντίστοιχη περίοδο εμφανίζονται αμετάβλητοι εμμένοντας στο χαρακτηρισμό της ξηρασίας ως ακραία (Σχήμα 3 Παρ. Ι).

Στην αρχή της ξηρής περιόδου 2017-2018 (Δεκέμβριος 2017) ο δείκτης SWCI εμφανίζεται έντονα πτωτικός, παρουσιάζοντας τον συγκεκριμένο μήνα την χαμηλότερη τιμή του για την περίοδο μελέτης ($SWCI_{DEC} < -4$) ενώ περιγράφει ταυτόχρονα συνθήκες ακραίας ξηρασίας. Σε συμφωνία με το δείκτη SWCI πτωτικοί εμφανίζονται και οι δείκτες SPEI_1, SPEI_12 και VCI. Η μείωση στους

προαναφερθέντες δείκτες είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με τον SWCI (κυρίως για τον SPEI_12) αλλά βάσει των τιμών τους και οι τρεις δείκτες χαρακτηρίζουν τον Δεκέμβριο του 2017 σαν μια περίοδο επικράτησης εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας και πολύ κακών συνθηκών βλάστησης ($SPEI_{1DEC} = -2$, $SPEI_{12DEC} < -2$ και $VCI_{DEC} < -0.3$). Αντίθετα ο δείκτης SPEI_3 παρουσιάζει μια μικρή άνοδο τον Δεκέμβριο του 2017 παραπέμποντας όμως σε τιμές που περιγράφουν σημαντική και οριακά ακραία ξηρασία ($SPEI_{3DEC} \sim -2$).

Στην συνέχεια της ξηρής περιόδου 2017-2018 (Ιανουάριος – Φεβρουάριος 2018), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, οι δείκτες SPEI_1 και SWCI εμφανίζονται έντονα ανοδικοί ήδη από τα μέσα της ξηρής περιόδου ($SPEI_{1JAN} > -1,5$ και $SWCI_{JAN} > -1,5$), σε σχέση με τον Δεκέμβριο του 2017 ($SPEI_{1DEC} \sim -2$ και $SWCI_{DEC} < -4$) (Σχήμα 4 Παρ. Ι) κάτι που συνεχίζεται και τον Φεβρουάριο του 2018.

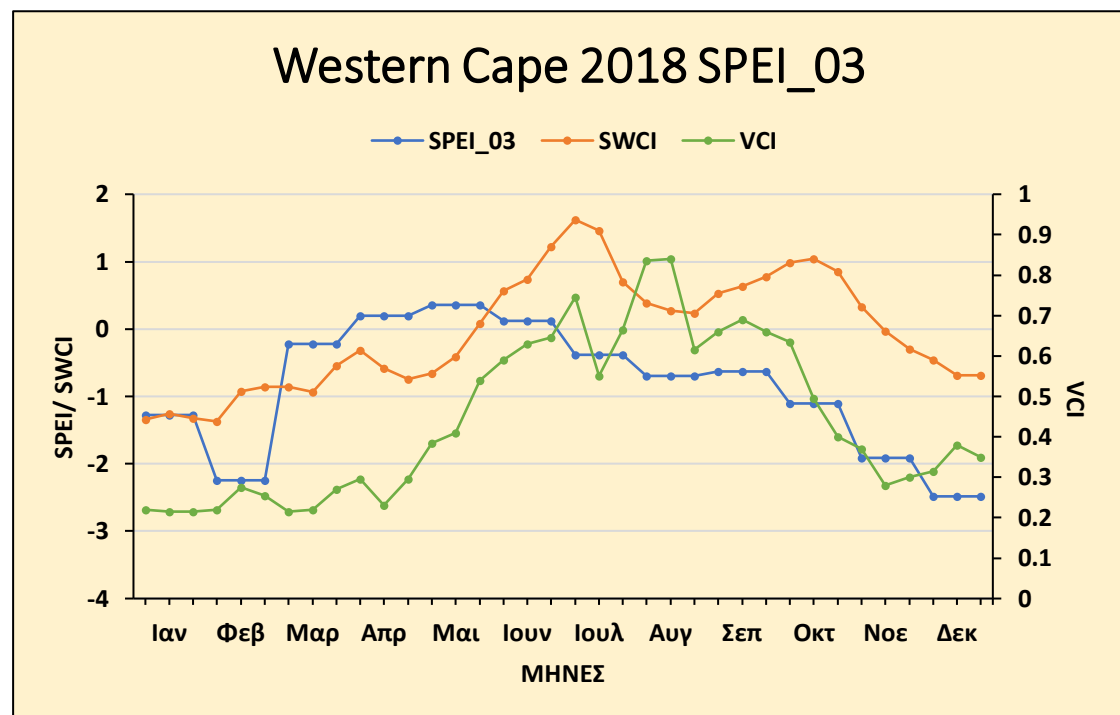


Σχήμα 3.6. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Cape Town (Western Cape) για το 2018.

Οι εν λόγω ανοδικές πορείες των δεικτών έχουν σαν αποτέλεσμα ο δείκτης SPEI_1 να μεταβάλει τον χαρακτηρισμό του καλοκαιριού από εξαιρετικά ξηρό στις αρχές του (Δεκέμβριος 2017) σε κανονικό στο τέλος του (Φεβρουάριος 2018). Όσον αφορά τους υπόλοιπους δείκτες ξηρασίας, ο δείκτης VCI φαίνεται να καθυστερεί

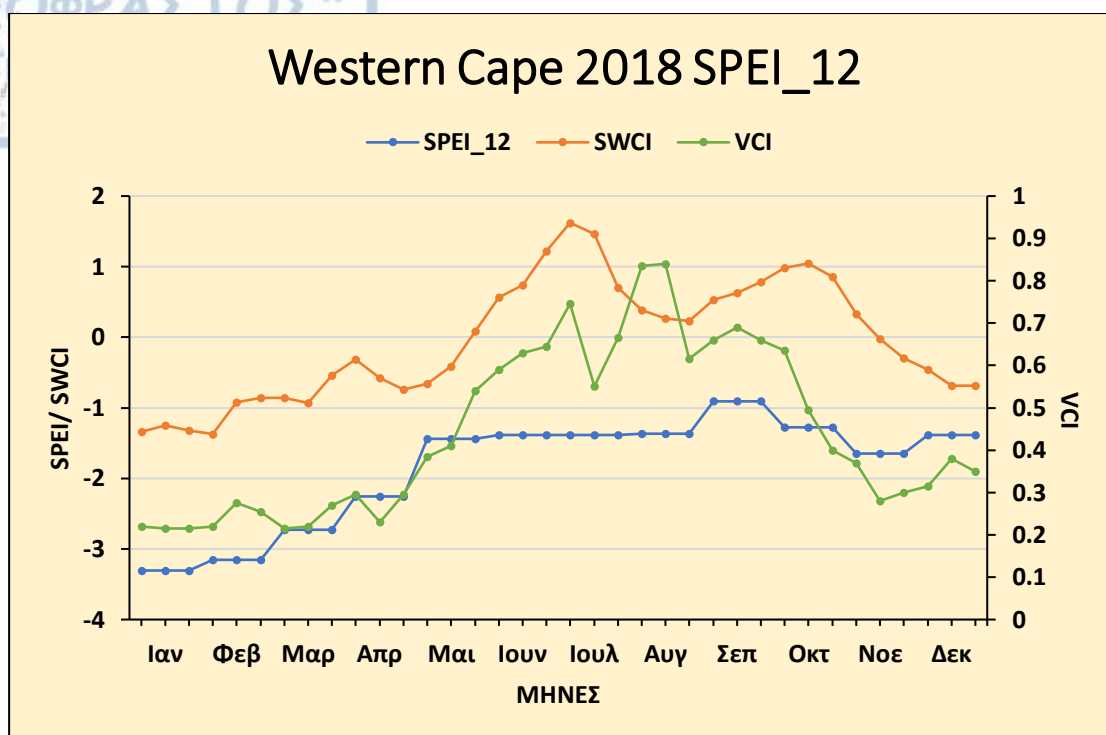
χρονικά στην εμφάνιση της προαναφερθείσας ανοδικής πορείας των δύο δεικτών (SWCI και SPEI_1) παραμένοντας σταθερός στο μεγαλύτερο μέρος του καλοκαιριού (Σχήμα 4 Παρ. Ι) και εμφανίζεται ανοδικός μόνο στο τέλος του (Φεβρουάριος 2018) μεταβάλλοντας έτσι τις συνθήκες βλάστησης από πολύ κακές σε κακές (> 0.3).

Αντίθετα ο δείκτης SPEI_3, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, παρά την μικρή άνοδο που παρουσιάζει τον Ιανουάριο του 2018, εμφανίζοντας τον μήνα αυτό μέτρια ξηρασία, στην συνέχεια (Φεβρουάριος 2018) ακολουθεί έντονα πτωτική πορεία επαναφέροντας την εξαιρετικά ακραία ξηρασία για την περιοχή. Βάσει αυτού μπορεί να λεχθεί ότι και σε αυτή την μεταστροφή που εμφανίζεται στην πλειοψηφία των δεικτών ο δείκτης SPEI_3 εμφανίζει έντονη χρονική καθυστέρηση.



Σχήμα 3.7. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Cape Town (Western Cape) για το 2018.

Αντίστοιχη συμπεριφορά με τον δείκτη VCI, παραμένοντας σταθερός στο μεγαλύτερο μέρος του καλοκαιριού και κινούμενος ανοδικά μόνο στο τέλος του (Φεβρουάριος 2018), παρουσιάζει ο δείκτης SPEI_12 (Σχήμα 3.8) με δύο σημαντικές όμως διαφοροποιήσεις. Πρώτον ο δείκτης SPEI_12 συνεχίζει να χαρακτηρίζει την ξηρασία ακραία σε όλη την διάρκεια της περιόδου του καλοκαιριού και δεύτερον τον Ιανουάριο του 2018 εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή του στο σύνολο της περιόδου μελέτης ($\text{SPEI}_{12\text{JAN}} < -3$).



Σχήμα 3.8. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Cape Town (Western Cape) για το 2018.

Κατά την έναρξη του Φθινοπώρου του 2018 και καθ' όλη την διάρκειά του (Μάρτιος- Μάιος) το σύνολο των υπό μελέτη δεικτών ξηρασίας εμφανίζονται ανοδικοί με εξαίρεση τον δείκτη SPEI_1 ο οποίος μετά την σημαντική αύξηση τους κατά την έναρξη της περιόδου (Μάρτιος 2018), όπου εμφανίζει και την μεγαλύτερη τιμή του στο σύνολο της χρονοσειράς μελέτης, παρουσιάζει μικρή πτωτική πορεία η οποία εντοπίζεται πρόσκαιρα και στον δείκτη SWCI στο μέσα του Φθινοπώρου (Απρίλιος 2018). Πέραν όμως αυτού, η ποιοτική βελτίωση των δεικτών συνολικά την περίοδο αυτή είναι σημαντική καθώς από το καθεστώς της έντονης και εξαιρετικής ξηρασίας με πολύ κακές συνθήκες βλάστησης, που περιέγραφαν το σύνολο των δεικτών στις αρχές του 2018, μεταβαίνουν σε κανονικές και μέτριες συνθήκες ξηρασίας και βλάστησης (Σχήμα 5 Παρ. Ι). Οι δείκτες με την συγκεκριμένη διακύμανσή τους φαίνεται να εντοπίζουν ικανοποιητικά τις πρώιμες βροχές του 2018 στην περιοχή του Cape Town, πριν την υγρή περίοδο, που αναφέρονται στις βιβλιογραφικές αναφορές.

Στην πρώτη, σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, περίοδο (Ιούνιος - Αύγουστος 2018), που το φαινόμενο της ξηρασίας για την περιοχή του Cape Town, για το διάστημα 2017-2018, σταμάτησε να αποτελεί πρόβλημα για την ευρύτερη περιοχή του Western Cape, η ανάλυση εμφανίζει τρεις από τους πέντε δείκτες να

παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους την περίοδο αυτή (Σχήματα 3.9 και 3.10). Συγκεκριμένα ο δείκτης SWCI εμφανίζει την μέγιστη τιμή τον Ιούλιο ($SWCI_{JUL} > 1$) περιγράφοντας την περίοδο κανονική ως προς την ξηρασία, ο δείκτης VCI εμφανίζει την μέγιστη τιμή του τον Αύγουστο περιγράφοντας αντίστοιχα την περίοδο με κανονικές συνθήκες βλάστησης ($VCI_{AUG} > 0.7$) και ο δείκτης SPEI_12 τον Ιούνιο ($SPEI_{12JUN} > -1.5$) παραμένοντας πολύ κοντά σε αυτή την τιμή καθ' όλη την διάρκεια της υγρής περιόδου και περιγράφοντας την ξηρασία σαν μέτρια. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ότι οι άλλοι δύο δείκτες ($SPEI_1$ και $SPEI_3$), που δεν εμφανίζουν την μέγιστη τιμή τους το τρίμηνο Ιουνίου – Αυγούστου, έχουν ήδη εμφανίσει την μέγιστη τιμή της χρονοσειράς στην περίοδο μελέτης το αμέσως προηγούμενο διάστημα.

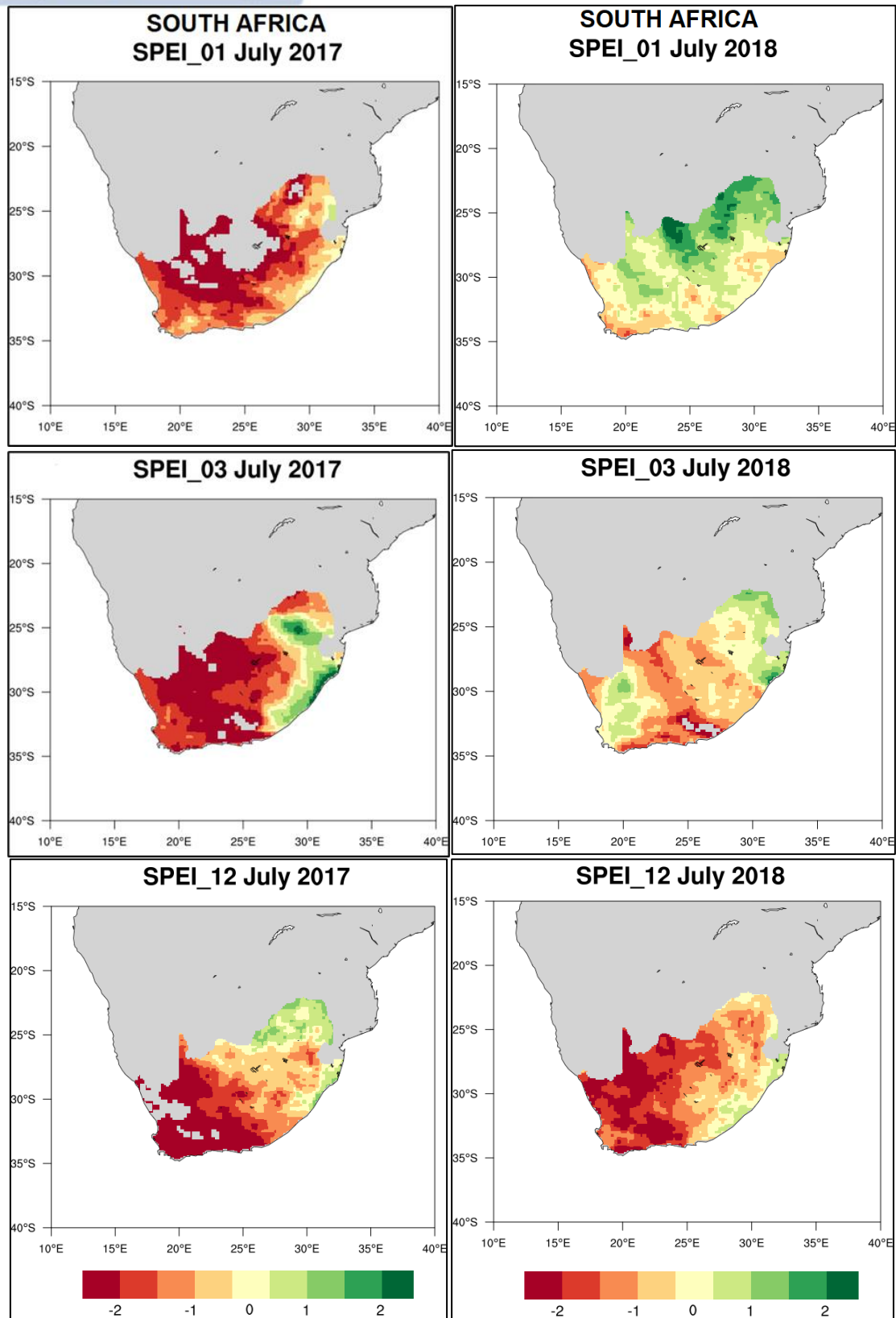
Χωρική Ανάλυση της ξηρασίας για το 2017: Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 3.9 - 3.10 και τα Σχήματα 1 – 3 του Παραρτήματος I, το έντονο επεισόδιο της ξηρασίας του 2017 που επηρέασε την περιοχή του Cape Town δεν περιορίστηκε μόνο στην επαρχία του Western Cape, αλλά επηρέασε καθ' όλη την διάρκεια του έτους και τις δυτικές (Northern Cape) και νότιες περιοχές της χώρας (Eastern Cape).

Αντίθετα, ανεπηρέαστες φαίνεται να έμειναν οι ανατολικές και βορειοανατολικές περιοχές (KwaZulu Natal, Limpopo και Mpumalanga), αλλά και οι κεντρικές και βόρειες επαρχίες (Free State, North – West και Gauteng) τουλάχιστον για το πρώτο μισό του 2017.

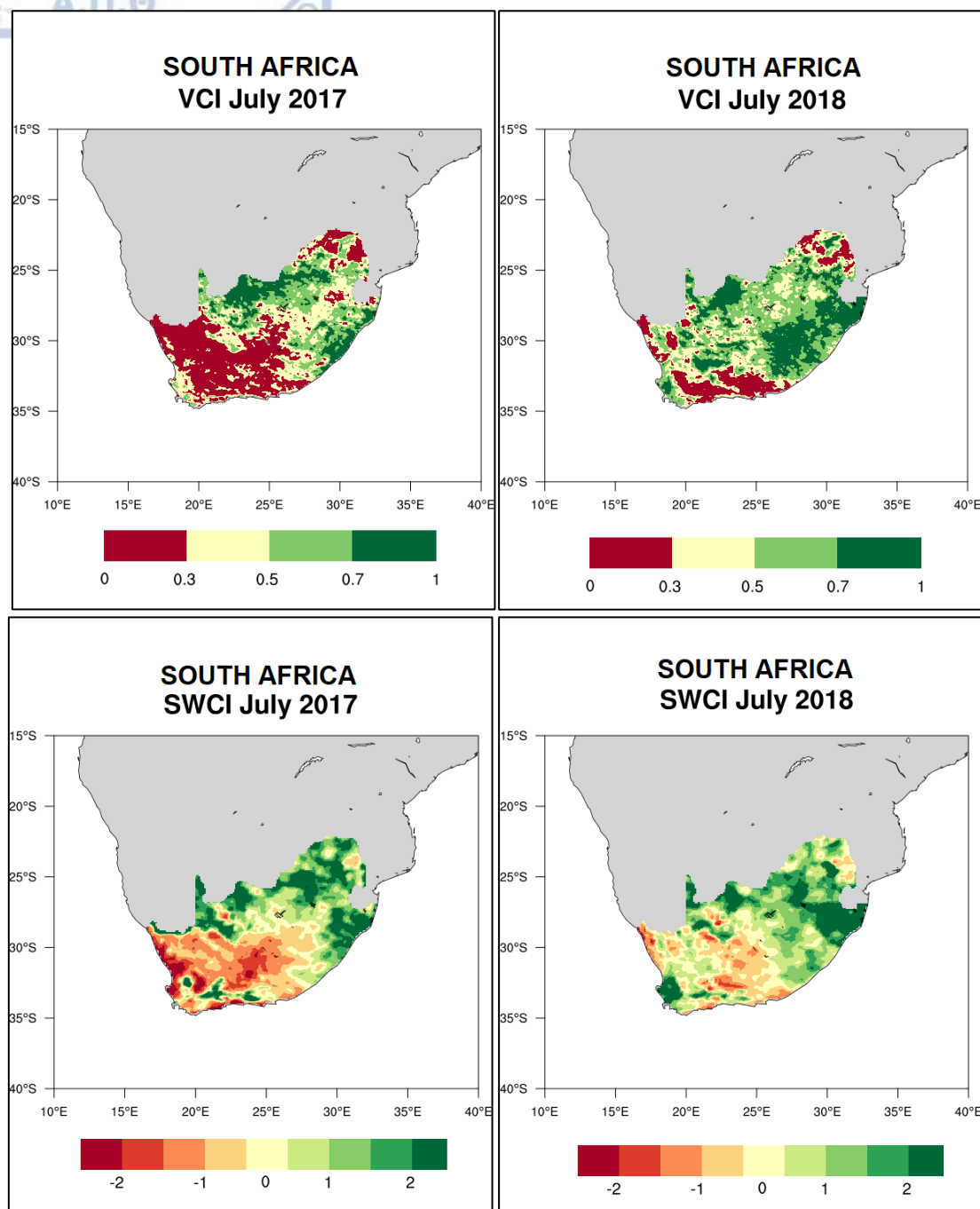
Από τον Ιούλιο όμως και μετά, πρώτα οι δείκτες $SPEI_1$ και $SPEI_3$ εμφανίζουν έντονη ξηρασία στις βόρειες και κεντρικές περιοχές, η οποία στις αρχές του 2018 επηρεάζει και τα βορειοανατολικά της χώρας (Σχήμα 4 Παρ. I). Η τάση επιδείνωσης των συνθηκών και η χωρική εξάπλωση της ξηρασίας από τα μέσα του 2017 και έπειτα, περιγράφεται από όλους τους δείκτες μελέτης με διαφορετικά χρονικά μοτίβα και χαρακτηριστικά στην έντασή της. Αντίθετα, από την άνοιξη του 2018 (Σχήμα 5 Παρ. I) η βελτίωση των συνθηκών ως προς την ξηρασία είναι καθολική σε όλη την Ν. Αφρική και εμφανής σε όλους τους δείκτες – με εξαίρεση τον $SPEI_{12}$ που επιμένει στην επικράτηση ακραίων συνθηκών ξηρασίας στις δυτικές περιοχές της χώρας – σηματοδοτώντας έτσι την λήξη του συγκεκριμένου επεισοδίου ξηρασίας.

Η βελτιωμένη εικόνα ως προς τις περιοχές που εμφανίζουν ακραίες συνθήκες ξηρασίας το 2017 φαίνεται από την σύγκριση των τιμών των δεικτών με το 2018 στο

Σχήμα 3.9 για τους δείκτες SPEI τον Ιούλιο και στο Σχήμα 3.10 για τους δείκτες SWCI και VCI το 2^ο δεκαήμερο του ίδιου μήνα.



Σχήμα 3.9. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω), SPEI_3 (κέντρο) και SPEI_12 (κάτω) για τον Ιούλιο 2017 (αριστερά) και τον Ιούλιο 2018 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.

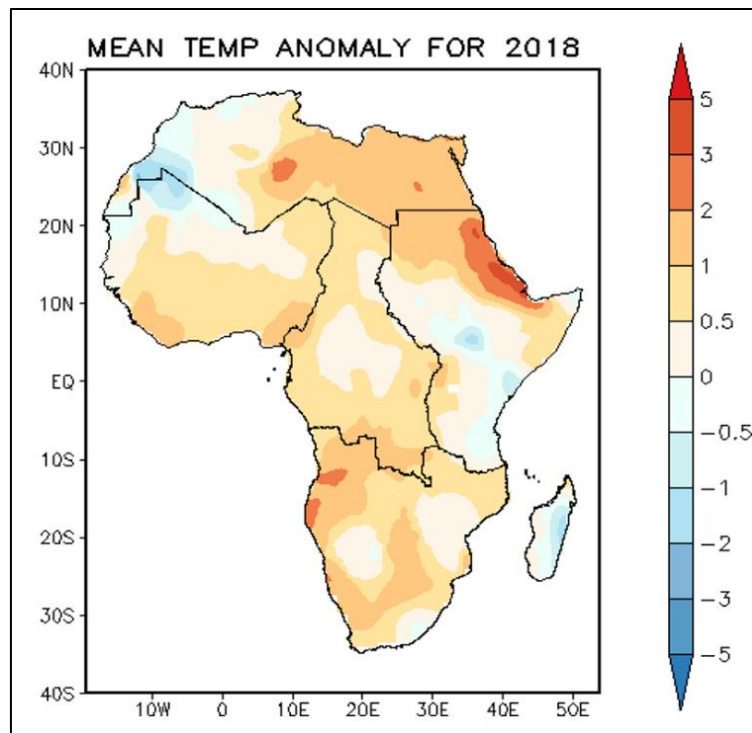


Σχήμα 3.10. Απεικόνιση των δεικτών VCI (πάνω) και SWCI (κάτω) για το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουλίου 2017 (αριστερά) και το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουλίου 2018 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.

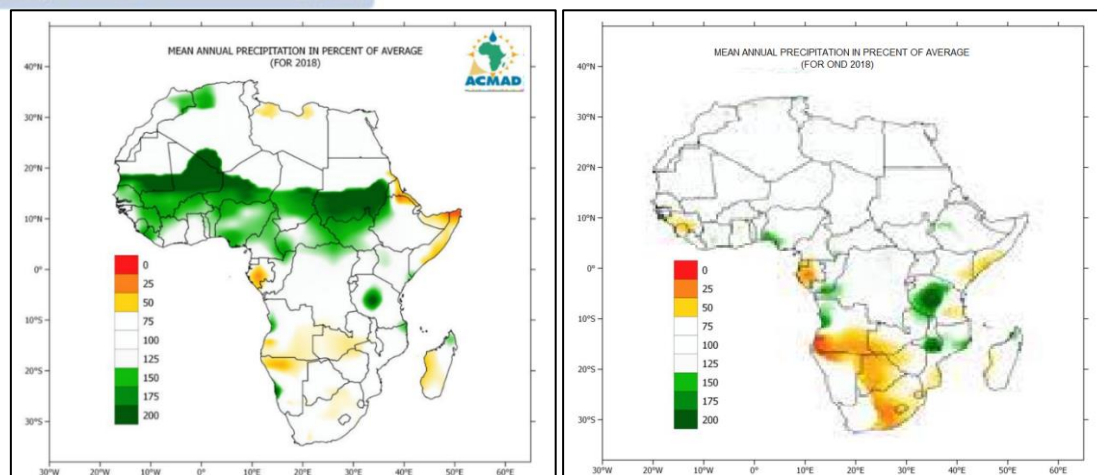
3.2. 2^η ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΞΗΡΑΣΙΑ ΙΟΥΛΙΟΥ - ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2018

3.2.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την Ξηρασία Ιουλίου - Δεκεμβρίου 2018

Στην ετήσια επισκόπηση του κλίματος της Ν. Αφρικής για το 2018 από την Μετεωρολογική Υπηρεσία της Ν. Αφρικής (SAWS 2019) αναφέρεται ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία για την χώρα το 2018 ήταν συνολικά 0.52°C (Σχήμα 3.11) επάνω από τις κλιματικές τιμές (περίοδος αναφοράς 1981-2010). Επίσης το 2018 ήταν η τέταρτη θερμότερη χρονιά τα τελευταία 68 χρόνια (1951 – 2018) και η θερμότερη χρονιά σε έτος με ουδέτερο El Niño για την ίδια περίοδο. Στην ίδια επισκόπηση επισημαίνεται ότι το 2018 ήταν το θερμότερο καταγεγραμμένο έτος από το 1981 στις βόρειες και ανατολικές επαρχίες της Ν. Αφρικής (Mpumalanga και Limpopo). Αντίστοιχα, ο ετήσιος νετός για το 2018 κυμάνθηκε κοντά στο 80% σε σχέση με τις κλιματικές τιμές της περιόδου αναφοράς (1981 – 2010) στο σύνολο των επαρχιών της χώρας, με εξαίρεση τις επαρχίες North West και Northern Cape όπου κινήθηκε κάτω του 75% (Σχήμα 3.12-α). Σε γενικές γραμμές, φαίνεται η Ν. Αφρική να έλαβε σχεδόν φυσιολογικές έως κάτω από το κανονικό βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια του 2018 στο μεγαλύτερο μέρος της με αποτέλεσμα το έτος να μην χαρακτηρίζεται στο σύνολό του ξηρό.



Σχήμα 3.11. Ετήσια μέση ανωμαλία της θερμοκρασίας (°C) στην Αφρική το 2018 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1981-2010 (Ogwang et al. 2019).

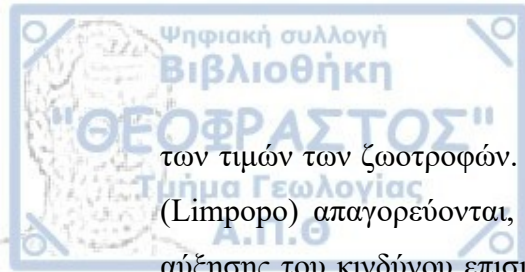


Σχήμα 3.12. Ετήσια μέση ανωμαλία του νετού (%) στην Αφρική (α) το 2018 (αριστερά) και (β) το τρίμηνο Οκτωβρίου - Δεκεμβρίου 2018 (δεξιά) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1981-2010 (ACMAD 2019).

Ειδικότερα όμως, για το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND) στην ετήσια έκθεση του Αφρικανικού κέντρου Μετεωρολογικών Εφαρμογών για την Ανάπτυξη (ACMAD, African Centre of Meteorological Application for Development) (Ogwang et al. 2019), για το κλίμα της Αφρικής του 2018 τονίζεται ότι το τελευταίο τρίμηνο του έτους (OND) ο νετός κυμάνθηκε κάτω του 75% σε σχέση με τις κλιματικές τιμές της περιόδου αναφοράς (1981 – 2010) (Σχήμα 3.12-β) κυρίως στις κεντρικές και ανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής.

Τον Ιανουάριο του 2019 η υπηρεσία Copernicus εκδίδει, μέσω του Παγκόσμιου Παρατηρητηρίου Ξηρασίας (GDO), έκτακτη αναλυτική μελέτη για το σύνολο της Νότιας Αφρικής (SAF) εξαιτίας της έντονης ξηρασίας που παρατηρείται σε πολλές χώρες γύρω από τον Τροπικό του Αιγόκερω στην Αφρικανική Ήπειρο κατά την υγρή περίοδο του έτους. Πέρα από την Ν. Αφρική, άλλες χώρες που πλήττονται από ξηρασία, το δεύτερο μισό του 2018, είναι η Μποτσουάνα, η Ζιμπάμπουε, η Ζάμπια, η Μοζαμβίκη και η Αγκόλα. Ειδικότερα για την Ν. Αφρική αναφέρεται στην έκθεση ότι υπάρχει ένα σαφές και ισχυρό μοτίβο ελλείμματος νετού κατά τη διάρκεια του τελευταίου τριμήνου (OND) του 2018 στο μεγαλύτερο μέρος της.

Ταυτόχρονα, άλλες πηγές για την Ν. Αφρική, αναφέρουν σημαντικά προβλήματα στην γεωργία και την κτηνοτροφία, με την ξηρασία να οδηγεί στην καθυστέρηση των προγραμματισμένων σπορών των καλλιεργειών την περίοδο αυτή και στην αύξηση



των τιμών των ζωοτροφών. Επιπρόσθετα, στις βορειοανατολικές περιοχές της χώρας (Limpopo) απαγορεύονται, από την κυβέρνηση, οι εξαγωγές βόειου κρέατος λόγω αύξησης του κινδύνου επισιτιστικής κρίσης (Reuters 2019). Από τον Δεκέμβριο του 2018 έως τα μέσα του Ιανουαρίου 2019, ο κίνδυνος πυρκαγιάς για τις κεντρικές περιοχές της Ν. Αφρικής φτάνει στο υψηλότερο επίπεδο συναγερμού (SAWS Warnings 2019). Το Υπουργείο Νερού και Υγείας της Ν. Αφρικής αναφέρει προβληματικές συνθήκες στους ταμιευτήρες στο σύνολο της χώρας, με τα επίπεδα του νερού να εμφανίζουν πτωτική τάση και στους περισσότερους η χωρητικότητα να βρίσκεται στο 50%, τον Ιανουάριο του 2019. Τέλος, στην επαρχία Free State στα κεντρικά της χώρας, επιβάλλονται περιορισμοί στην χρήση του νερού (DWS 2019).

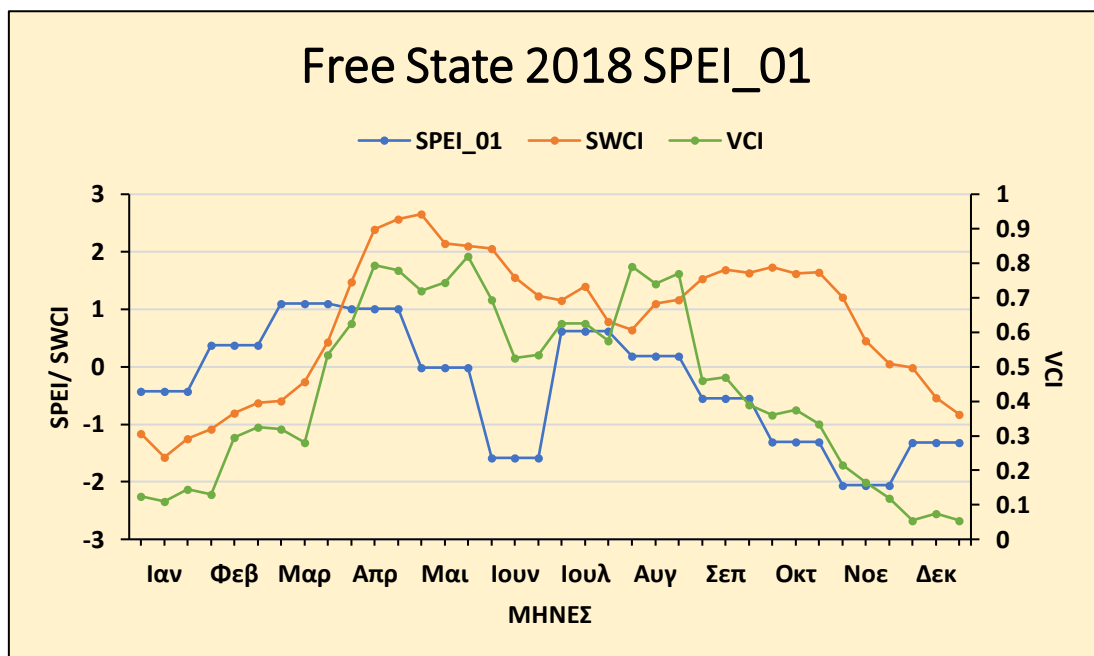
Όσον αφορά τα συνοπτικά αίτια της ξηρασίας που εμφανίζεται το τελευταίο τρίμηνο του 2018 στην Ν. Αφρική, οι αναφορές συνδέουν το επεισόδιο με την θετική τάση που παρουσιάζει ο δείκτης ENSO ήδη από τον Μάιο του 2018 και οδηγούν στην επικράτηση του El Niño τον Δεκέμβριο του 2018 ($ENSO_{DEC} > 1$). Τα ισχυρά φαινόμενα El Niño, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της κλιματικής ανάλυσης, συνδέονται συχνά με ξηρασίες στη Ν. Αφρική. Δεύτερο αίτιο που φαίνεται να ευθύνεται για το συγκεκριμένο επεισόδιο ξηρασίας στην Ν. Αφρική είναι η μετατόπιση της ενδοτροπικής ζώνης σύγκλισης (ITCZ) σε βορειότερα γεωγραφικά πλάτη καθ' όλη την διάρκεια του 2018 σε σχέση με την μέση κλιματική της θέση (Σχήμα 10 Παρ. Ι). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρών βροχοπτώσεων στις υποσαχάριες χώρες που βρίσκονται βόρεια του Ισημερινού και την επικράτηση εντόνων επεισοδίων ξηρασίας στις χώρες που βρίσκονται κοντά στον Τροπικό του Αιγόκερω κατά το 2018.

3.2.2 Ανάλυση των Δεικτών Ξηρασίας της 2^{ης} Μελέτης Περίπτωσης

Συνεχίζοντας την ανάλυση των τιμών των δεικτών ξηρασίας για την Ν. Αφρικής, παρατηρείται ότι κατά την περίοδο λήξης του έντονου επεισοδίου ξηρασίας στην περιοχή του Cape Town και την ταυτόχρονη εμφάνιση ανοδικών τάσεων στους δείκτες για την περιοχή του Western Cape τον χειμώνα του 2018 (υγρή περίοδος - JJA), οι τάσεις που παρουσιάζουν οι δείκτες είναι τελείως διαφορετικές για τις κεντρικές, ανατολικές και βορειοανατολικές περιοχές της χώρας (ξηρή περίοδος - JJA). Για τον λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω διερεύνηση των δεικτών για

το δεύτερο μισό του 2018 (Ιούλιος – Δεκέμβριος) στο σύνολο της Ν. Αφρικής, για την πιθανότητα επανεμφάνισης ξηρασίας στην χώρα.

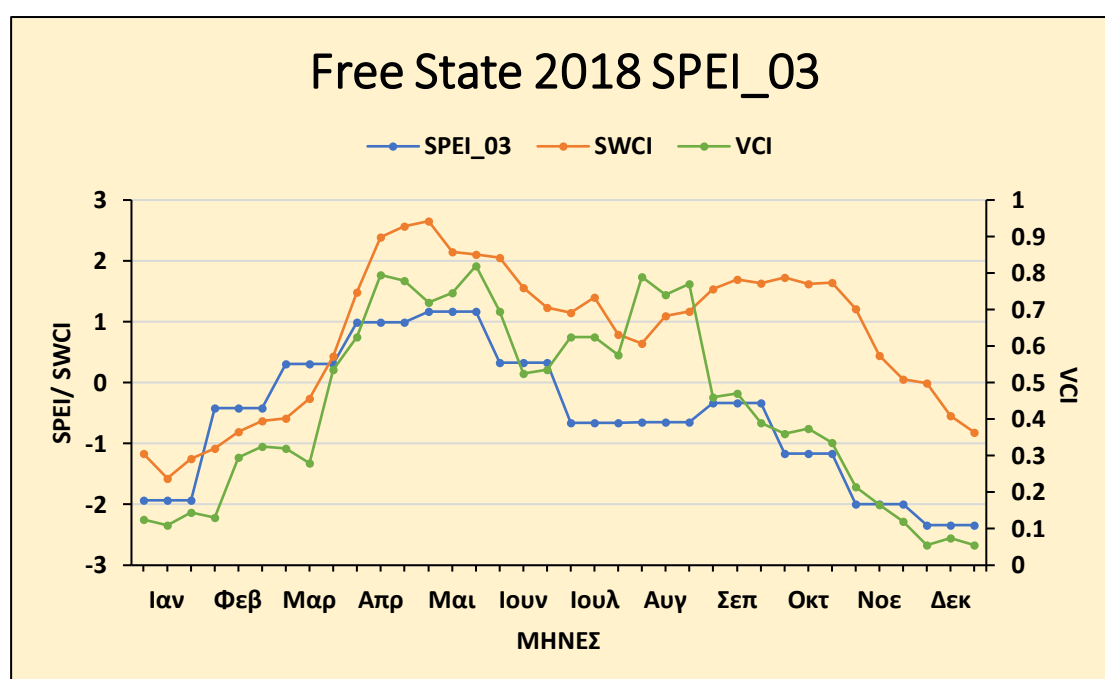
Free State: Ξεκινώντας την ανάλυση από την επαρχία του Free State, στα κεντρικά της Ν. Αφρικής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, ο δείκτης SPEI_1 παρουσιάζει πτωτική πορεία από τον Ιούλιο έως το Νοέμβριο του 2018 και μόνο τον τελευταίο μήνα του έτους εμφανίζει μια μικρή ανάκαμψη στις τιμές του. Η πτωτική αυτή πορεία έχει σαν αποτέλεσμα την διαφοροποίηση στον χαρακτηρισμό της περιόδου από κανονική για περιοχή στην αρχή της ($SPEI_{1JUL} > 0$) σε ακραία ξηρή στο τέλος της ($SPEI_{1NOV} < -2$).



Σχήμα 3.13. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Free State (κεντρικά) για το 2018.

Παρόμοια πτωτική πορεία με τον SPEI_1 εμφανίζει και ο δείκτης VCI, η οποία ξεκινά τον Αύγουστο του 2018 και συνεχίζει μέχρι το τέλος του έτους. Εντοπίζεται, και στην συγκεκριμένη περίπτωση, η μικρή χρονική καθυστέρηση του δείκτη VCI σε σύγκριση με τον δείκτη SPEI_1 ως προς την απόκριση στις μεταβολές των συνθηκών. Η χρονική διαφοροποίηση, όμως, είναι αρκετά μικρή και φαίνεται περισσότερο να σχετίζεται με την πραγματική χρονική καθυστέρηση μεταξύ της εμφάνισης μια μετεωρολογικής ξηρασίας, που εξετάζει ο δείκτης SPEI_1, και της γεωργικής ξηρασίας, που εξετάζει ο δείκτης VCI, και λιγότερο σε μια πιθανή αδυναμία απόκρισης του δείκτη VCI σε σχέση με τον SPEI_1.

Η παραπάνω διαπίστωση φαίνεται να ισχύει και στην μεταβολή του δείκτη SWCI για το δεύτερο μισό του 2018 στην περιοχή του Free State, καθώς η πτωτική πορεία που εμφανίζουν οι δείκτες SPEI_1 και VCI τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, αντίστοιχα, ο δείκτης SWCI την εμφανίζει από τον Οκτώβριο ($SWCI_{OCT} > 1$, κανονική περίοδος) έως το τέλος του έτους ($SWCI_{DEC} < 0$, ξηρασία). Ταυτόχρονα, όσον αφορά τον δείκτη SWCI πρέπει να υπολογιστεί και η εποχικότητα της περιοχής, καθώς η εξεταζόμενη περίοδος αφορά την μετάβαση από τον χειμώνα και τις υφιστάμενες ξηρές και ψυχρές κλιματικές συνθήκες της περιοχής στο καλοκαίρι που αποτελεί την υγρή και θερμή περίοδο τους έτους για την περιοχή.

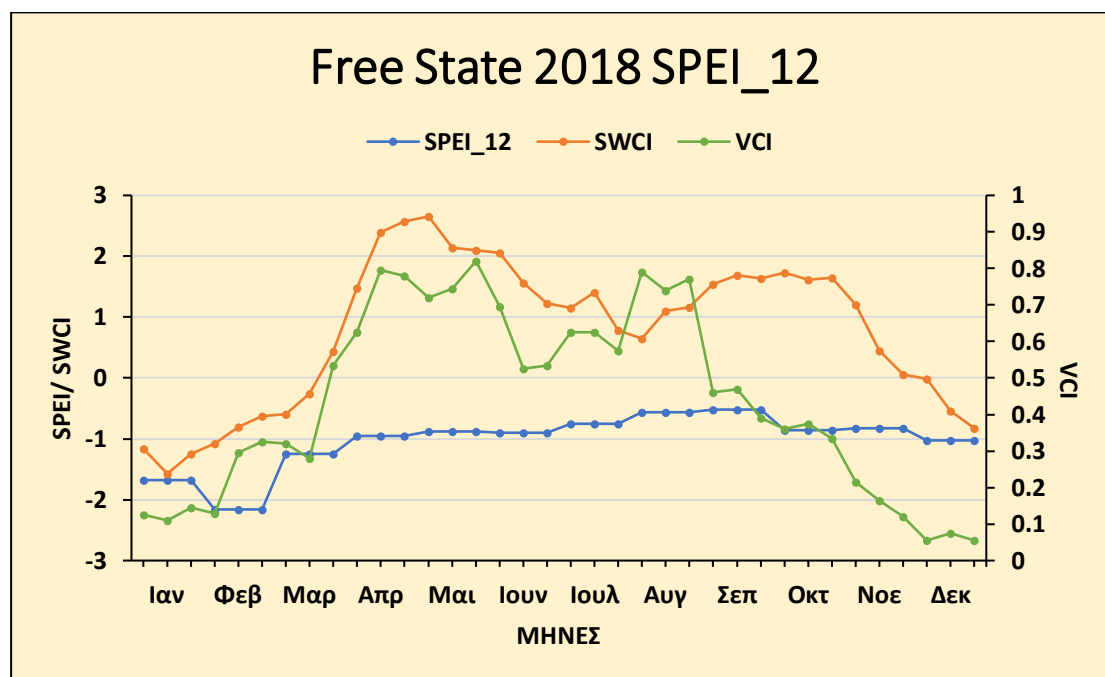


Σχήμα 3.14. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Free State (κεντρικά) για το 2018.

Όσον αφορά τον δείκτη SPEI_3 (Σχήμα 3.14), στην αρχή της περιόδου (Ιούλιος – Αύγουστος 2018) παρουσιάζεται αμετάβλητος σε τιμές που παραπέμπουν σε κανονικές συνθήκες ($SPEI_{3JJA} > -1$), ενώ από το Σεπτέμβριο και μετά εμφανίζει πτωτική πορεία, κάτι που βρίσκεται σε συμφωνία με τους άλλους δείκτες μελέτης, με αποτέλεσμα το τέλος της περιόδου να χαρακτηρίζεται από τον δείκτη ως ακραία ξηρό ($SPEI_{3DEC} < -2$).

Τέλος, όσον αφορά την περιοχή του Free State για το δεύτερο μισό του 2018, ο δείκτης SPEI_12 (Σχήμα 3.15) δεν εμφανίζει την έντονα πτωτική πορεία που παρουσιάζουν οι άλλοι δείκτες για την περιοχή. Αναλυτικότερα, οι τιμές του δείκτη

παραμένουν σταθερές (με μικρή άνοδο έως τον Σεπτέμβριο) για το μεγαλύτερο διάστημα περιγράφοντας τις συνθήκες για την περιοχή κανονικές ως προς την ξηρασία. Η πτωτική πορεία του δείκτη εμφανίζεται από τον Οκτώβριο του 2018 (χρονική συμφωνία στην κύμανση των SPEI_12 και SWCI) η οποία συνεχίζεται τον Δεκέμβριο με αποτέλεσμα την εμφάνιση μέτριας ξηρασίας για την περιοχή στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου ($SPEI_{12DEC} < -1$).

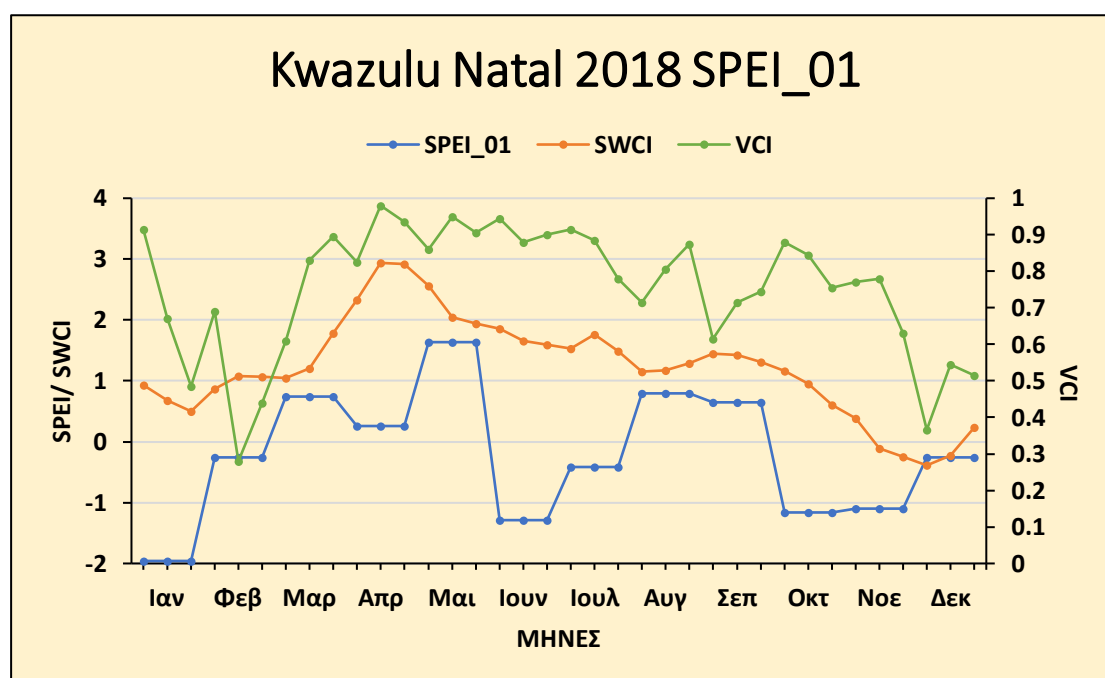


Σχήμα 3.15. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Free State (κεντρικά) για το 2018.

Συνοψίζοντας, η ανάλυση των δεικτών ξηρασίας για την επαρχία Free State, στα κεντρικά της Ν. Αφρικής, εμφανίζει συνολικά μια επιδείνωση των συνθηκών σε πιο ξηρικές, κατά την μετάβαση από την ξηρή περίοδο (JJA 2018) στην περίοδο έναρξης των βροχών για την περιοχή (OND 2018). Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι το δίμηνο Δεκέμβριος 2018 – Ιανουάριος 2019 οι δείκτες VCI και SPEI_3 εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές στο σύνολο της χρονοσειράς μελέτης (2017-2020) παραπέμποντας σε συνθήκες ακραίας ξηρασίας και πολύ κακές για την βλάστηση (Σχήματα 3.31 και 3.32).

KwaZulu - Natal: Εξετάζοντας την κύμανση των δεικτών ξηρασίας για την ίδια περίοδο στα ανατολικά της χώρας και συγκεκριμένα στην επαρχία KwaZulu - Natal διαπιστώνεται η ίδια πτωτική πορεία στο σύνολο των δεικτών μελέτης κατά το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND). Αναλυτικότερα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16 ο

δείκτης SWCI εμφανίζεται έντονα πτωτικός από τα μέσα του Σεπτεμβρίου κάτι που συνεχίζεται μέχρι το πρώτο δεκαήμερο του Δεκεμβρίου, ενώ στο τελευταίο εικοσαήμερο του έτους παρατηρείται αντιστροφή της πορείας του, με τον δείκτη να κινείται ανοδικά. Παρόμοια κύμανση με τον δείκτη SWCI εμφανίζει και ο δείκτης VCI από τον Οκτώβριο έως το τέλος του 2018, η οποία συμπίπτει χρονικά τόσο με την έναρξη (με καθυστέρηση 10 ημέρου) όσο και με την μεταστροφή των δεικτών σε πιο υγρά μοτίβα (δεύτερο δεκαήμερο Δεκεμβρίου). Τέλος, και ο δείκτης SPEI_1 συμφωνεί χρονικά με τους δείκτες VCI και SWCI ως προς την επιδείνωση των συνθηκών ξηρασίας στην περιοχή από τον Οκτώβριο και την σταδιακή βελτίωσή τους στο τέλος την χρονιάς (Δεκέμβριος 2018).

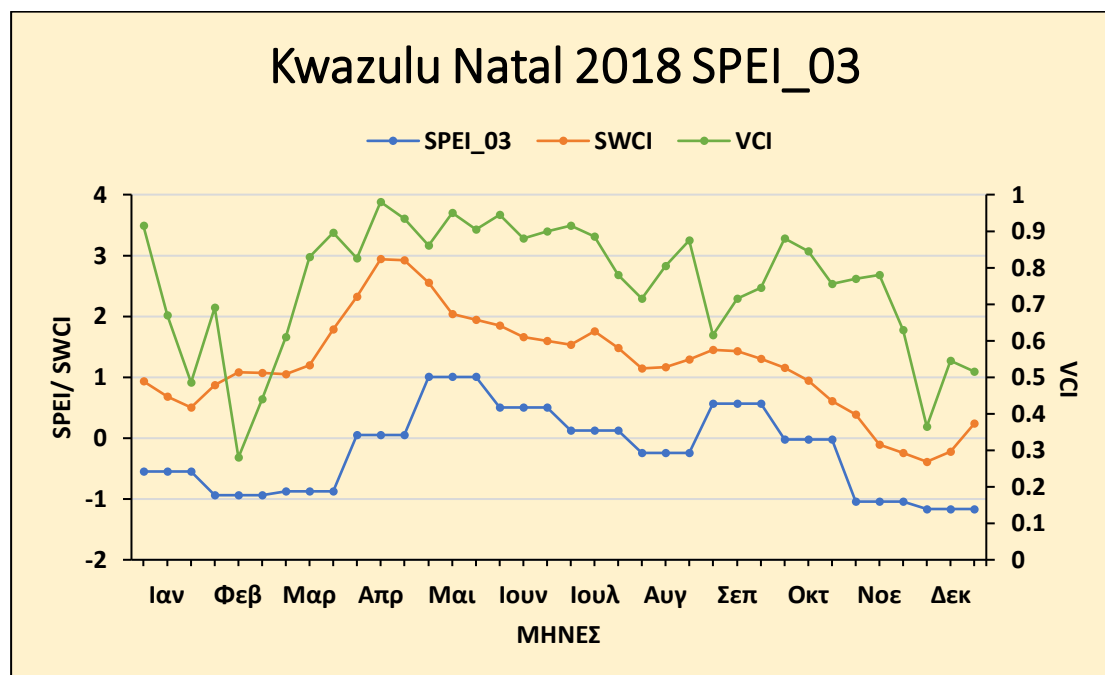


Σχήμα 3.16. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του KwaZulu Natal (ανατολικά) για το 2018.

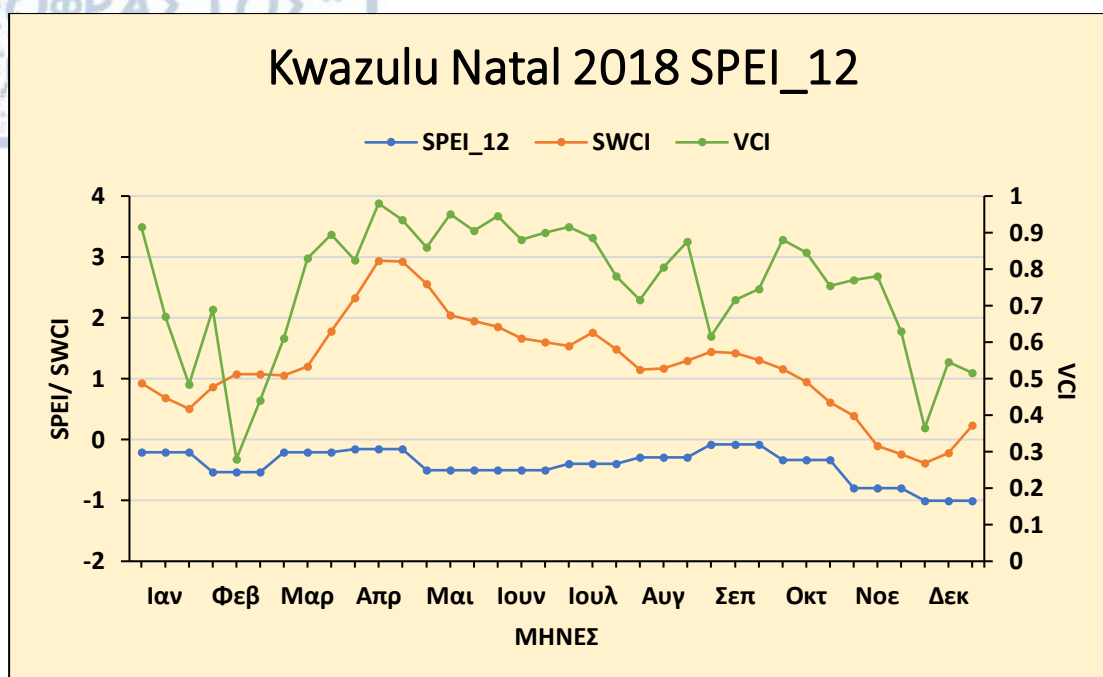
Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.17 και 3.18, οι δείκτες SPEI_3 και SPEI_12 συμφωνούν με τους υπόλοιπους δείκτες (SPEI_1, VCI και SWCI) στην εμφάνιση πτωτικής διακύμανσης από τον Οκτώβριο του 2018, στην περίπτωση τους όμως η πτωτική τους πορεία συνεχίζεται και τον Δεκέμβριο με αποτέλεσμα ο μήνας αυτός να παρουσιάζει τις ελάχιστες τιμές για το σύνολο του έτους.

Αναλύοντας ποσοτικά την πτωτική πορεία που παρατηρείται στο σύνολο των δεικτών για την επαρχία KwaZulu - Natal στο δεύτερο μισό του 2018 διαπιστώνεται ότι οι δείκτες SPEI_1, SPEI_3 και SPEI_12 παρουσιάζουν επιδείνωση των συνθηκών

από κανονικές στην αρχή της περιόδου σε μέτριας έντασης ξηρασίας το τελευταίο δίμηνο (Νοέμβριος – Δεκέμβριος 2018). Ταυτόχρονα, ο δείκτης SWCI από θετικές τιμές που περιγράφουν κανονικές συνθήκες ως προς την ξηρασία μεταβαίνει σε αρνητικές στο τέλος της περιόδου, τιμές που αποτελούν και τις ελάχιστες στο σύνολο της χρονοσειράς μελέτης (2017-2020). Ο δείκτης VCI μεταβαίνει από ένα κανονικό καθεστώς βλάστησης, στην αρχή της περιόδου, σε κακές συνθήκες βλάστησης στο τέλος της.



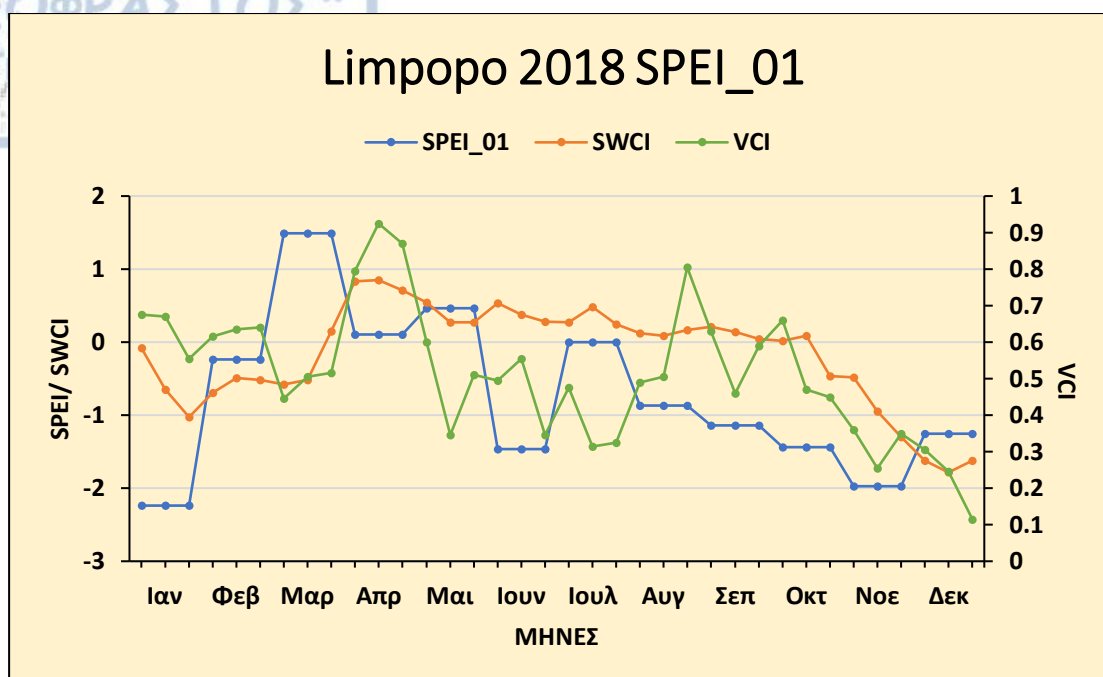
Σχήμα 3.17. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του KwaZulu Natal (ανατολικά) για το 2018.



Σχήμα 3.18. Απεικόνιση των δεικτών SPEI₁₂, SWCI και VCI στην περιοχή του KwaZulu Natal (ανατολικά) για το 2018.

Διαπιστώνεται από την ανάλυση των τιμών των δεικτών για το δεύτερο μισό του 2018 (Ιούλιος – Δεκέμβριος), ότι και στα ανατολικά της Ν. Αφρικής και συγκεκριμένα στην επαρχία KwaZulu Natal εμφανίζεται έντονη ξηρασία, με μια δίμηνη χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τις κεντρικές περιοχές της χώρας και συγκεκριμένα την επαρχία Free State.

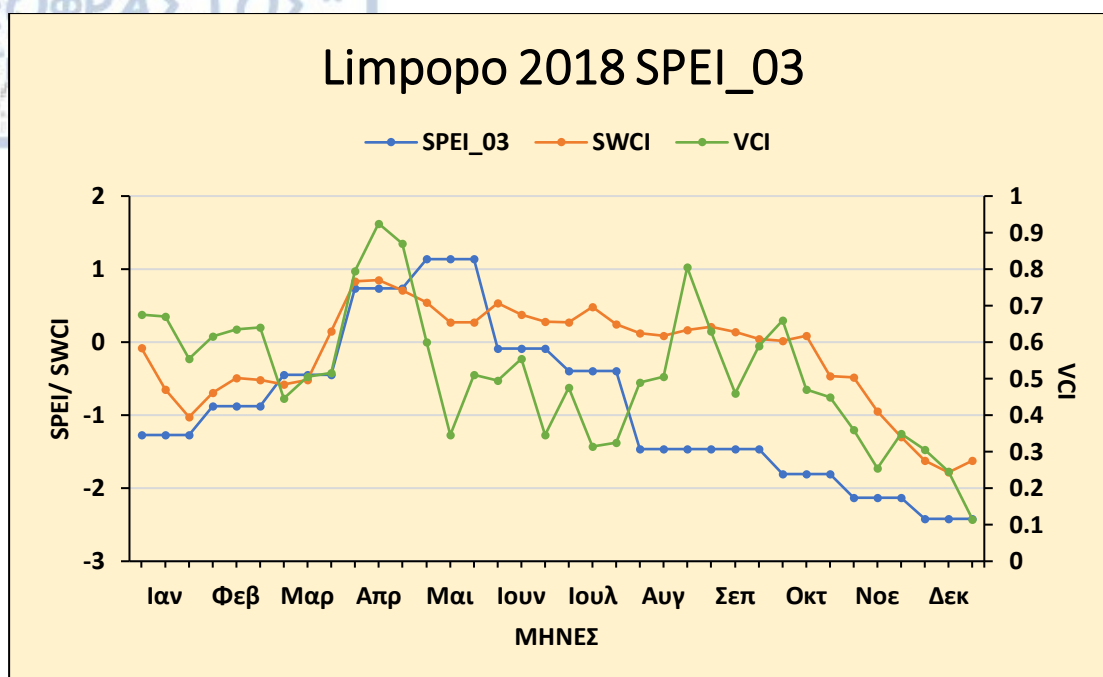
Limpopo: Την ίδια εικόνα με τα ανατολικά και κεντρικά της Ν. Αφρικής, για το τελευταίο εξάμηνο του 2018, εμφανίζουν οι δείκτες ξηρασίας και στα βορειοανατολικά της χώρας και συγκεκριμένα στην επαρχία Limpopo. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19, ο δείκτης SPEI₁ παρουσιάζει πτωτική πορεία από τον Ιούλιο του 2018 έως τον Νοέμβριο του 2018 και μόνο στο τέλος του έτους εμφανίζει αύξηση των τιμών του (Δεκέμβριος 2018). Ελαφριά πτωτική πορεία, και σε χρονική συμφωνία με τον δείκτη SPEI₁, ακολουθεί και ο δείκτης SWCI από τον Ιούλιο η οποία μεταβάλλεται σε ισχυρά πτωτική από τον Οκτώβριο έως το δεύτερο δεκαήμερο του Δεκεμβρίου.



Σχήμα 3.19. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Limporo (βορειοανατολικά) για το 2018.

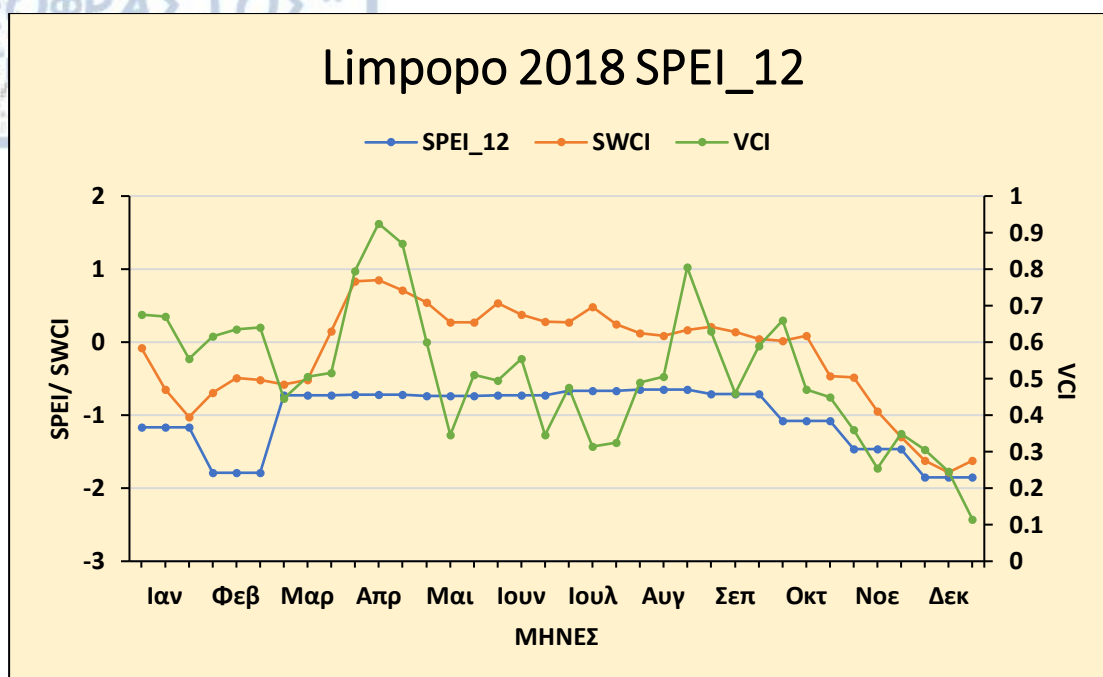
Η πορεία του SWCI το τελευταίο δεκαήμερο του Δεκεμβρίου μεταστρέφεται σε θετική. Τέλος, ο δείκτης VCI, παρουσιάζει και πάλι μικρή χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες, και εμφανίζει πτωτική πορεία από τον Αύγουστο του 2018 έως το τέλος του έτους. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι οι δείκτες VCI και SWCI τον Δεκέμβριο παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές για το 2018. Το ίδιο παρατηρείται, όπως θα δούμε στην συνέχεια της ανάλυσης, και στους δείκτες SPEI_3 και SPEI_12 για τον μήνα Δεκέμβριο.

Αντίστοιχα, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.20, και ο δείκτης SPEI_3 εμφανίζει έντονα πτωτική πορεία η οποία μάλιστα χρονικά προηγείται των άλλων δεικτών και ξεκινά από την αρχή της εξεταζόμενης περιόδου (Ιούνιος 2018) και συνεχίζει μέχρι το τέλος της χρονιάς (Δεκέμβριος 2018). Μάλιστα η πτώση του δείκτη είναι τόσο έντονη μέσα στην περίοδο όπου οι υγρές συνθήκες που περιγράφονται για την περιοχή στην αρχή της βάσει των τιμών του ($SPEI_{3MAY} > 1$), μεταβάλλονται σε συνθήκες ακραίας ξηρασίας στο τέλος του 2018 ($SPEI_{3DEC} < -2$).



Σχήμα 3.20. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Limporo (βορειοανατολικά) για το 2018.

Όσον αφορά τον δείκτη SPEI_12, για την περιοχή του Limporo, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21 μετά από μια σταθερή έως ελαφριά πτωτική κύμανση που εμφανίζεται το πρώτο τρίμηνο της περιόδου ανάλυσης (Ιούλιο έως Σεπτέμβριο), με καταγραφόμενες τιμές του δείκτη που παραπέμπουν σε κανονικές συνθήκες ως προς την ξηρασία ($\text{SPEI}_{12} > -1$), από τον Οκτώβριο και μετά εμφανίζει την ίδια έντονη πτωτική πορεία των άλλων δεικτών, με καταγραφόμενες τιμές που παραπέμπουν σε σημαντική ξηρασία ($\text{SPEI}_{12\text{DEC}} < -1.5$).



Σχήμα 3.21. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Limpopo (βορειοανατολικά) για το 2018.

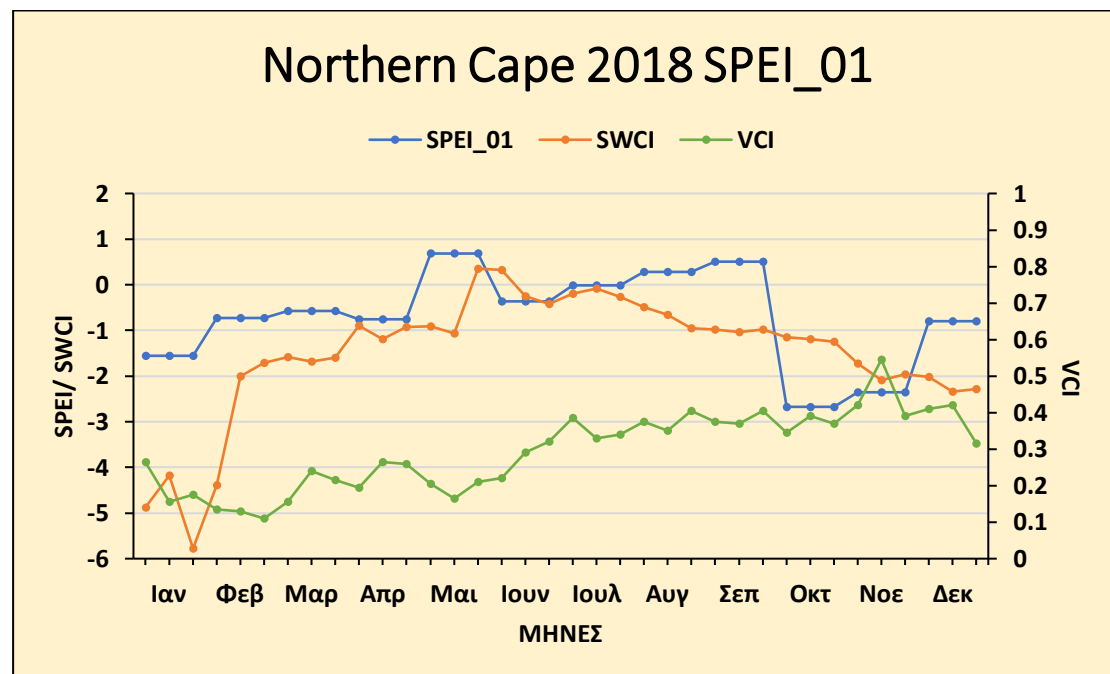
Πέρα από την συμφωνία των δεικτών, τόσο στην διακύμανση όσο και στην χρονική εκδήλωση της ξηρασίας για τα βορειοανατολικά της Ν. Αφρικής, η ποσοτική ανάλυση των τιμών τους αποκαλύπτει τη συμφωνία τους και ως προς την ένταση της ξηρασίας. Συγκεκριμένα, σε συνέχεια όσων αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους για την περιγραφή της περιόδου ως σημαντικά ή ακραία ξηρή στο τέλος αυτής από τους δείκτες SPEI_12 και SPEI_3 αντίστοιχα, ο δείκτης VCI μεταβάλλει την περιοχή από ένα καθεστώς κανονικών συνθηκών βλάστησης τον Αύγουστο ($VCI_{AUG} > 0.7$) σε πολύ κακές συνθήκες βλάστησης τον Δεκέμβριο ($VCI_{DEC} < 0.3$). Ταυτόχρονα, ο δείκτης SWCI από οριακά θετικές τιμές στην αρχή της περιόδου, που παραπέμπουν σε κανονικές συνθήκες εμφανίζει έντονα αρνητικές τιμές στο τέλος του 2018 ($SWCI_{DEC} < -1.5$) περιγράφοντας συνθήκες έντονης ξηρασίας για την περιοχή του Limpopo.

Περαιτέρω χωρική ανάλυση για το δεύτερο μισό του 2018 των δεικτών ξηρασίας αποκαλύπτει ότι και στις επαρχίες του Northern Cape και Eastern Cape, περιοχές που δεν έμειναν ανεπηρέαστες από την ξηρασία που έπληξε το Cape Town την προηγούμενη χρονιά, εμφανίζουν παρόμοια μοτίβα προς ξηρότερες συνθήκες κατά το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND).

Northern Cape: Αρχικά, όσον αφορά τις βορειοδυτικές περιοχές της Ν. Αφρικής και συγκεκριμένα την επαρχία του Northern Cape, όπως φαίνεται και στο Σχήμα

3.22, ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζει μεγάλη πτώση τον Οκτώβριο και από κανονικές συνθήκες τον Σεπτέμβριο ($SPEI_{1SEP} \sim 0.5$) μεταβαίνει σε τιμές που παραπέμπουν σε εξαιρετικά ακραίες συνθήκες ξηρασίας ($SPEI_{1OCT-NOV} < -2$). Αντίθετα, τον Δεκέμβριο παρατηρούνται και πάλι κανονικές συνθήκες ($SPEI_{1DEC} > -1$).

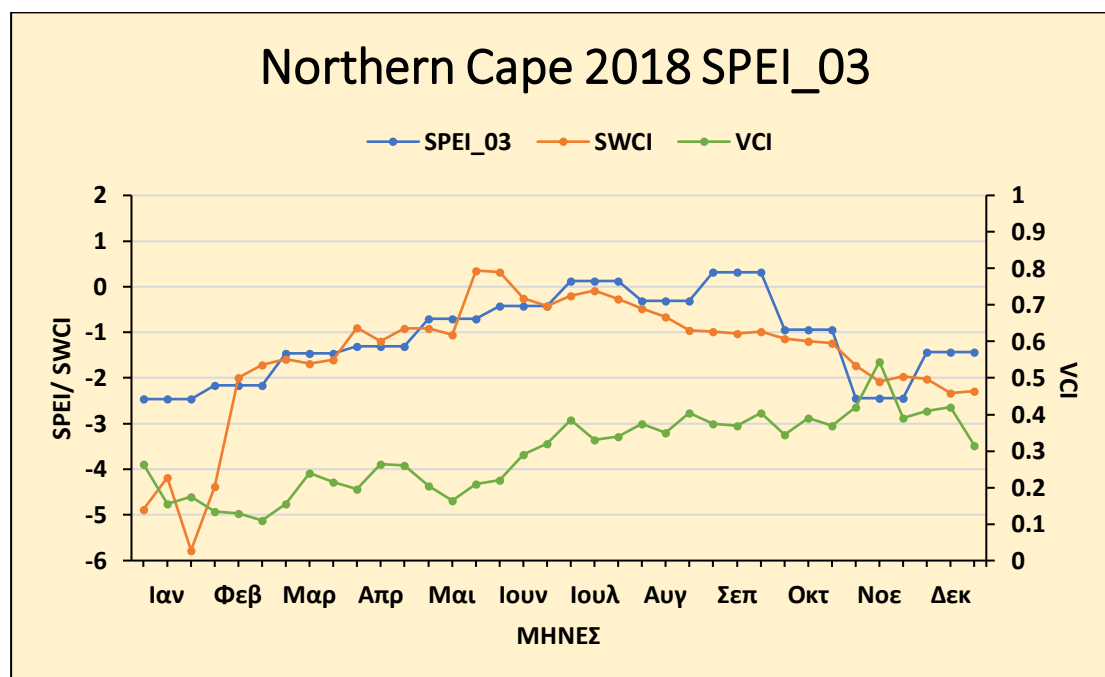
Ο δείκτης VCI, αντίθετα, την περίοδο αυτή εμφανίζει ανοδική πορεία καταγράφοντας τις υψηλότερες τιμές του 2018 το τελευταίο δίμηνο (Νοέμβριος – Δεκέμβριος), περιγράφοντας όμως την περίοδο με κακές συνθήκες βλάστησης στο σύνολό της. Όπως αναφέρθηκε και στην πρώτη μελέτη περίπτωσης, ο δείκτης VCI φαίνεται να εμφανίζει μια δυσκολία στην απεικόνιση των μεταβολών των ξηρικών ή μη μοτίβων σε περιοχές που εμφανίζουν ερημικό και ημι-ερημικό κλίμα όπως είναι η περιοχή του Northern Cape.



Σχήμα 3.22. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Northern Cape (βορειοδυτικά) για το 2018.

Αντίθετα, ο δείκτης SWCI, σε συμφωνία με τον SPEI_1, εμφανίζει πτωτική πορεία σε όλη την διάρκεια του δεύτερου μισού του 2018 με αποτέλεσμα το τελευταίο δίμηνο του έτους να παίρνει τιμές που παραπέμπουν σε ακραίες συνθήκες ξηρασίας ($SWCI_{NOV-DEC} < -2$). Ακόμη μεγαλύτερη συμφωνία εμφανίζει ο δείκτης SWCI με τον SPEI_3 (Σχήμα 3.23) τόσο χρονικά (Οκτώβριος – Νοέμβριος) όσο και ποιοτικά περιγράφοντας τον Νοέμβριο σαν μήνα με εξαιρετικά ακραία ξηρασία. Ταυτόχρονα ο δείκτης SPEI_3 εμφανίζει την μεταστροφή της πορείας του σε θετική

που παρατηρήθηκε και στον δείκτη SPEI_1 τον Δεκέμβριο. Η συμφωνία αυτή των δύο δεικτών παραπέμπουν σε κάποιες πιθανές βροχοπτώσεις κατά την θερμή περίοδο του έτους στην περιοχή οι οποίες μετέβαλλαν πρόσκαιρα τις συνθήκες της μετεωρολογικής ξηρασίας σε βάθος μηνός (SPEI_1) και τριμήνου (SPEI_3) αντίστοιχα, αλλά επί της ουσίας δεν επηρέασαν τις συνθήκες της γεωργικής και υδρολογικής ξηρασίας.

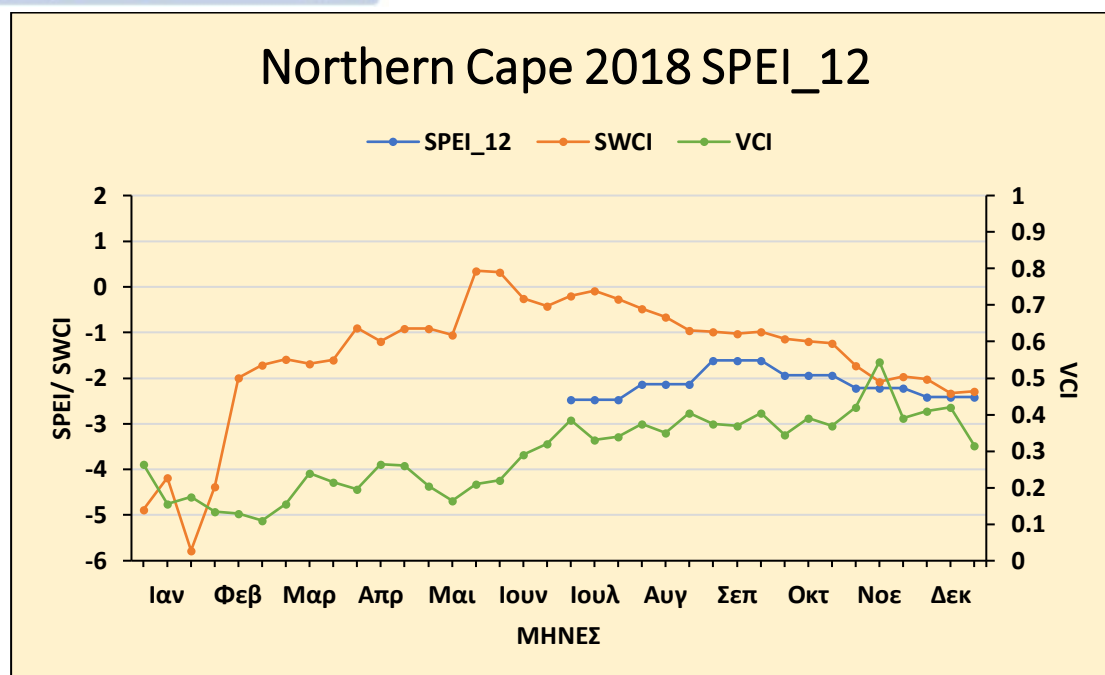


Σχήμα 3.23. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Northern Cape (βορειοδυτικά) για το 2018.

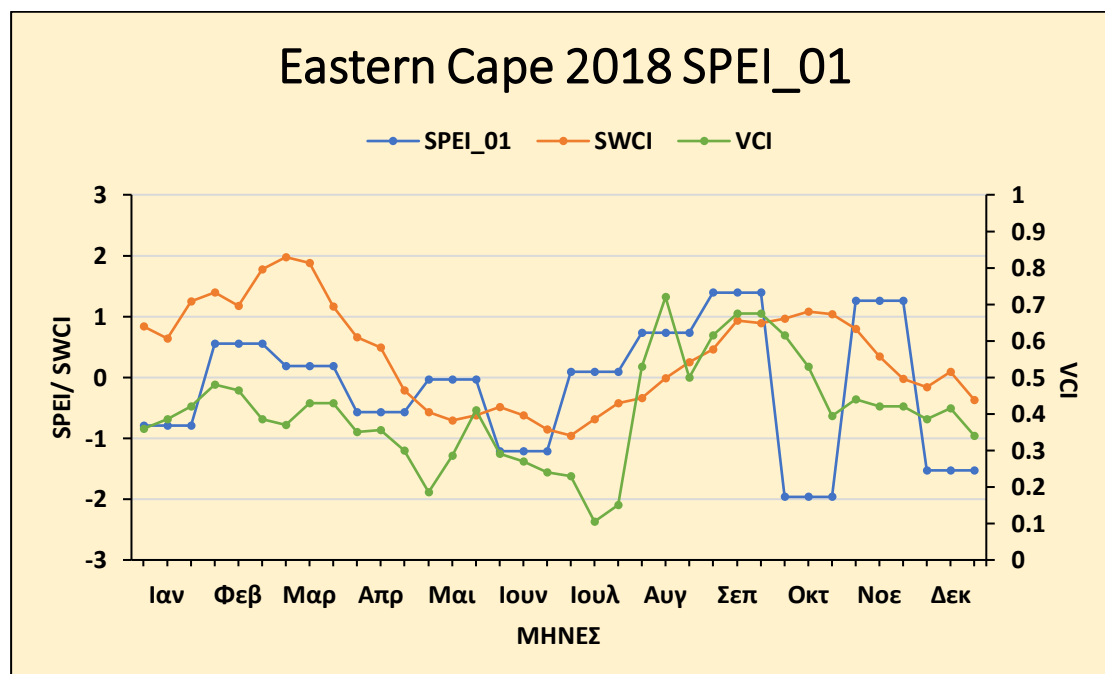
Τέλος, για την περιοχή του Northern Cape ο δείκτης SPEI_12 (Σχήμα 3.24) εμφανίζει πτωτική πορεία το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND) επαναφέροντας το μοτίβο των ακραίων συνθηκών ξηρασίας στην περιοχή, ενώ η έναρξη της πτώσης στις τιμές του δείκτη εντοπίζεται τον Οκτώβριο του 2018 και βρίσκεται σε χρονική συμφωνία με τους υπόλοιπους δείκτες που αναλύθηκαν για την συγκεκριμένη επαρχία, με εξαίρεση τον δείκτη VCI. Η πορεία του δείκτη SPEI_12 παραμένει πτωτική και τον Δεκέμβριο του 2018. Έτσι επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση ότι οι πιθανές βροχοπτώσεις τον μήνα αυτό ήταν περιορισμένες και δεν μπόρεσαν να βελτιώσουν τις συνθήκες της υδρολογικής ξηρασίας.

Eastern Cape: Κλείνοντας την ανάλυση των δεικτών, για το δεύτερο μισό του 2018 με την επαρχία του Eastern Cape, διαπιστώνεται ότι και στα νότια της Ν.

Αφρικής υπάρχει επιδείνωση των δεικτών προς ξηρότερες συνθήκες κατά το τελευταίο τρίμηνο του έτους (OND 2018).



Σχήμα 3.24. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Northern Cape (βορειοδυτικά) για το 2018.

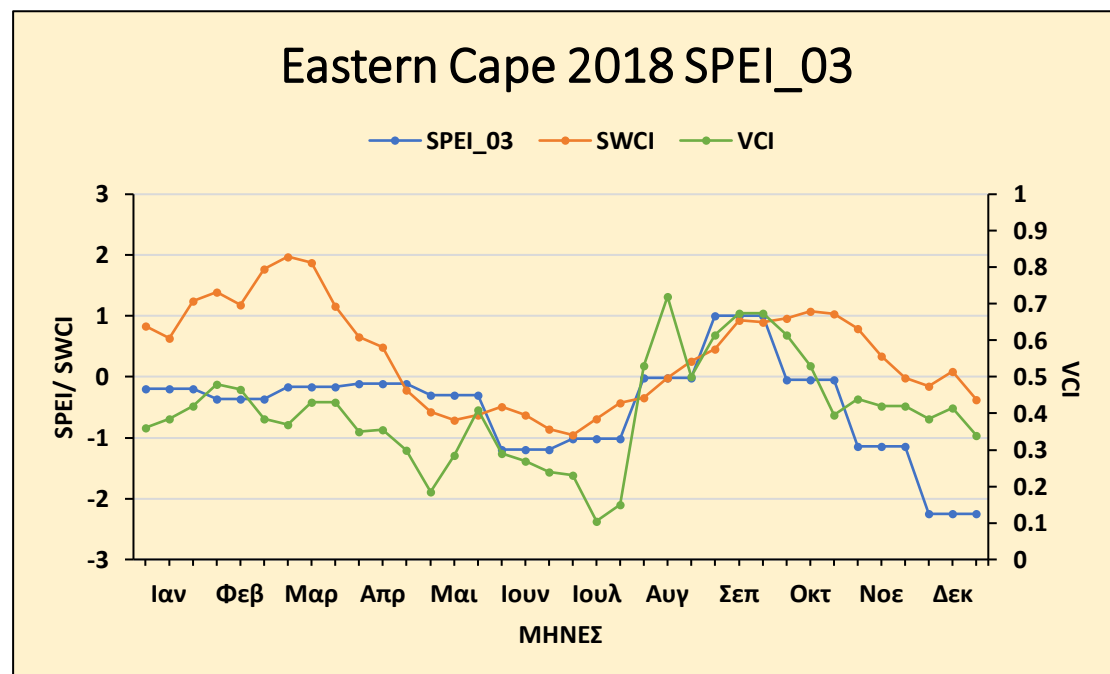


Σχήμα 3.25. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Eastern Cape (νότια) για το 2018.

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.25, ο δείκτης SPEI_1 παρουσιάζει έντονα πτωτική πορεία τον Οκτώβριο μεταβάλλοντας το καθεστώς της περιοχής από

υγρό για τον Σεπτέμβριο ($SPEI_{1SEP} > 1$) σε σημαντικά ξηρό ($SPEI_{1OCT} < -1.5$). Στην συνέχεια, ο δείκτης $SPEI_1$ εμφανίζεται έντονα ανοδικός παρουσιάζοντας εκ νέου τον Νοέμβριο ($SPEI_{1NOV} > 1$) σαν υγρό μήνα, επανέρχεται όμως στην συνέχεια στις τιμές του Οκτωβρίου περιγράφοντας το τέλος της περιόδου σαν σημαντικά ξηρό ($SPEI_{1DEC} < -1.5$).

Οι διακυμάνσεις αυτές του δείκτη $SPEI_1$ δεν εμφανίζονται από τους υπόλοιπους δείκτες, οι οποίοι στο σύνολο τους, από τον Οκτώβριο και μέχρι το τέλος τους έτους, εμφανίζουν πτωτική πορεία. Έχουμε δηλαδή, και στην περίπτωση αυτή την εμφάνιση της ευαισθησίας του δείκτη $SPEI_1$ σε βροχοπτώσεις που στην ουσία δεν επηρεάζουν το υφιστάμενο καθεστώς ξηρασίας στην περιοχή.



Σχήμα 3.26. Απεικόνιση των δεικτών $SPEI_3$, $SWCI$ και VCI στην περιοχή του Eastern Cape (νότια) για το 2018.

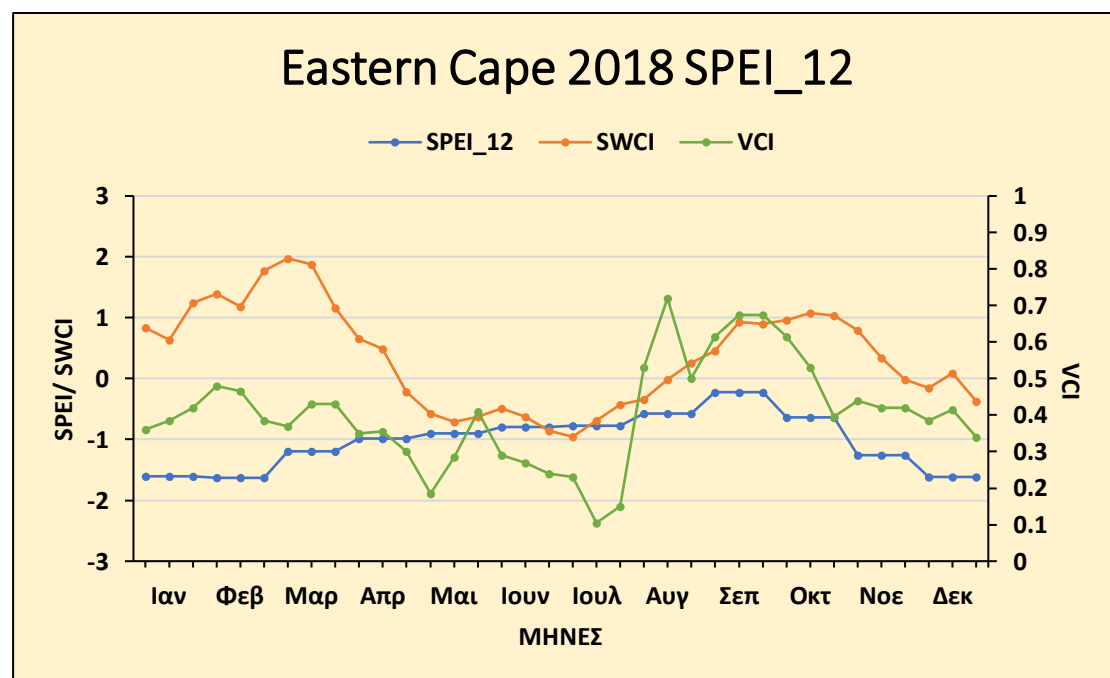
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.26, ο δείκτης $SPEI_3$ παρουσιάζει έντονα πτωτική πορεία από το Οκτώβριο του 2018 (χρονική συμφωνία κύμανσης με τον $SPEI_1$), η οποία μεταβάλλει τις υγρές συνθήκες που περιγράφει ο δείκτης για το Σεπτέμβριο ($SPEI_{3SEP} > 1$) σε ακραία ξηρές τον Δεκέμβριο ($SPEI_{3DEC} < -2$).

Η έντονα πτωτική πορεία από τον Οκτώβριο και έως το τέλος του 2018 εμφανίζεται και στον δείκτη VCI , όπου σύμφωνα με τις τιμές του, οι μέτριες συνθήκες βλάστησης τον Σεπτέμβριο ($VCI_{SEP} > 0.5$) μεταβάλλονται σε κακές για το

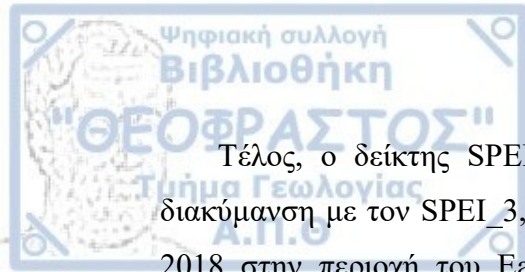
τελευταίο τρίμηνο του 2018 ($VCI_{OND} < 0.5$). Ο δείκτης VCI επιτυγχάνει να εμφανίσει και την αναστροφή της πτωτικής πορείας που εμφανίζει ο δείκτης SPEI_1 για τον Νοέμβριο σε μικρότερο βαθμό όμως.

Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση των δύο δεικτών (SPEI_1, VCI), η οποία δεν εμφανίζεται στους υπόλοιπους δείκτες, έχει εντοπιστεί και σε άλλα σημεία μελέτης και, όπως επισημάνθηκε, η ικανότητα μεταστροφής των μοτίβων της μετεωρολογικής ξηρασίας σε επίπεδο μηνός που εντοπίζει ο δείκτης SPEI_1 περιγράφονται ικανοποιητικά και από τον δείκτη VCI με την εύλογη χρονική καθυστέρηση που σχετίζεται με τον χρόνο απόκρισης μεταξύ της μετεωρολογικής και γεωργικής ξηρασίας σε μια περιοχή.

Με την ίδια εντοπισμένη χρονική καθυστέρηση στις μεταστροφές των μοτίβων, σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες, εμφανίζεται και ο δείκτης SWCI και για την περιοχή του Eastern Cape στο τελευταίο τρίμηνο του 2018. Συγκεκριμένα η έναρξη της πτωτικής πορείας του δείκτη εντοπίζεται στο τελευταίο δεκαήμερο του Οκτωβρίου (χρονική καθυστέρηση εικοσαημέρου) και συνεχίζει μέχρι το τέλος του έτους. Έτσι, από τις θετικές τιμές του δείκτη για τον Οκτώβριο και τις κανονικές συνθήκες, καταλήγει σε αρνητικές τιμές τον Δεκέμβριο περιγράφοντας τον μήνα ως ξηρό.



Σχήμα 3.27. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Eastern Cape (νότια) για το 2018.

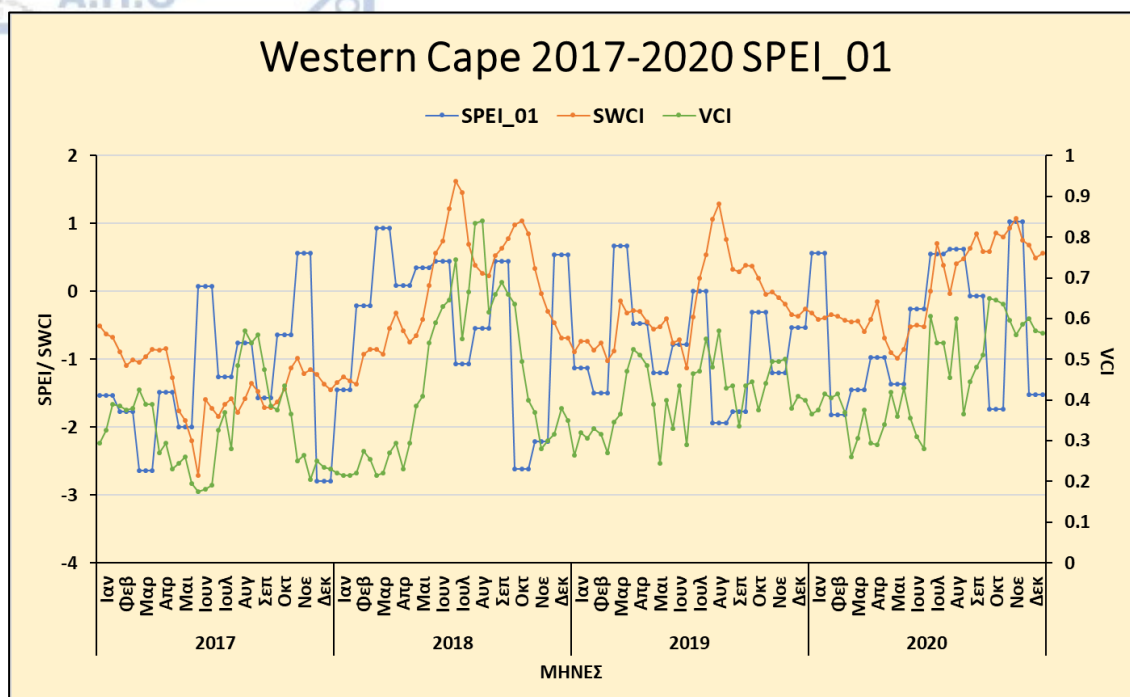


Τέλος, ο δείκτης SPEI₁₂ (Σχήμα 3.27), σε πλήρη συμφωνία ως προς την διακύμανση με τον SPEI₃, εμφανίζεται πτωτικός για όλο το τελευταίο τρίμηνο του 2018 στην περιοχή του Eastern Cape. Οι κανονικές συνθήκες που περιγράφει ο δείκτης τον Σεπτέμβριο ($\text{SPEI}_{12\text{SEP}} > 0.5$) μεταβάλλονται σε συνθήκες σημαντικής ξηρασίας για την περιοχή τον Δεκέμβριο ($\text{SPEI}_{12\text{DEC}} < -1.5$).

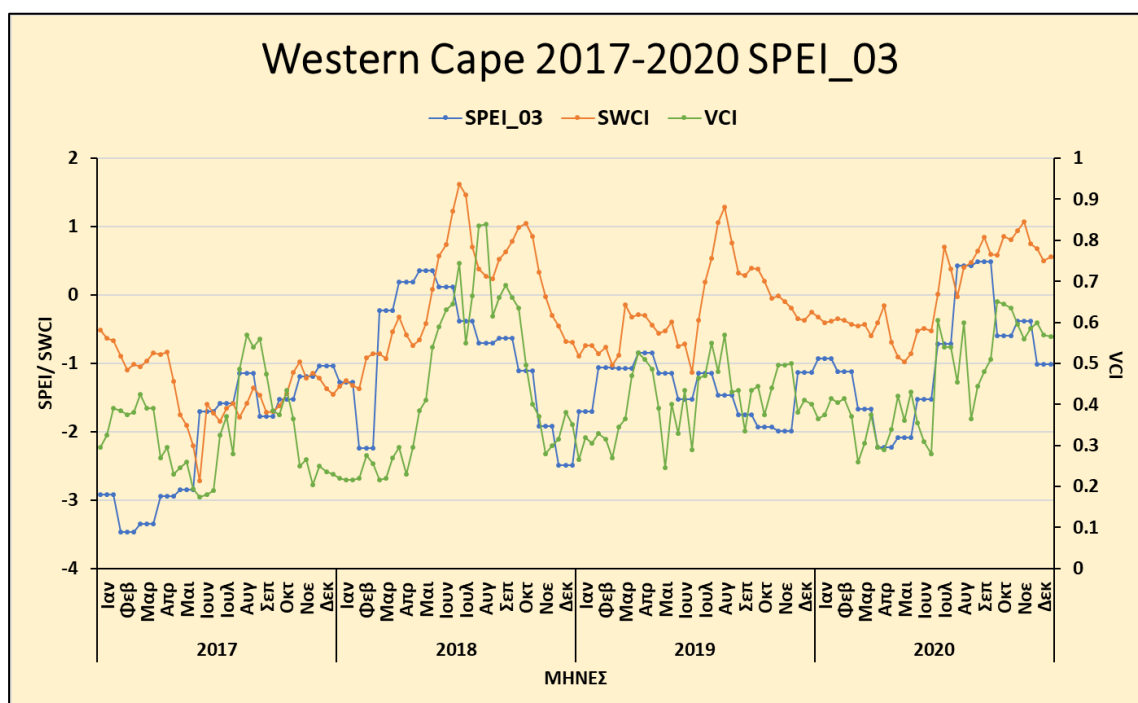
Από την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας στο δεύτερο μισό του 2018 για την Ν. Αφρική, διαπιστώνεται η εμφάνιση συνθηκών μέτριας έως και σημαντικής ξηρασίας, η οποία αρχικά εμφανίζεται στα κεντρικά (Free State) και βορειοανατολικά της χώρας (Limpopo) τον Ιούλιο (Σχήματα 3.9 και 3.10) με συνεχή επιδείνωση των τιμών των δεικτών σε συνθήκες σημαντικής έως και ακραίας ξηρασίας στο τέλος του έτους (Σχήματα 3.31 και 3.32). Τον Οκτώβριο του 2018 το συγκεκριμένο επεισόδιο ξηρασίας επεκτείνεται χωρικά και στις υπόλοιπες επαρχίες της Ν. Αφρικής στα ανατολικά (KwaZulu Natal) και νοτιοανατολικά (Eastern Cape) της χώρας εμφανίζοντας επίσης χαρακτηριστικά ακραίας ξηρασίας, ενώ και τα βορειοδυτικά δεν φαίνεται να μένουν ανεπηρέαστα καθώς στην επαρχία του Northern Cape ο Οκτώβριος του 2018 σηματοδοτεί την έναρξη ενός ακραίου επεισοδίου ξηρασίας που απασχόλησε την περιοχή όλο το 2019, όπως θα δούμε στην τελευταία περίοδο ανάλυσης των δεικτών.

Western Cape: Δύο είναι οι λόγοι για τους οποίους η επαρχία Western Cape εξετάζεται ξεχωριστά από την συνολική μελέτη της περιοχής για το τελευταίο εξάμηνο του 2018. Πρώτον, η μετάβαση από την υγρή και ψυχρή περίοδο του χειμώνα του 2018 (JJA) στην ξηρή και θερμή περίοδο (OND) για την περιοχή συμπίπτει με την έναρξη και την λήξη της περιόδου που αναλύεται. Οπότε η εμφάνιση πτωτικών τάσεων, στο σύνολο των δεικτών, για την περίοδο αυτή είναι κάτι κλιματικά αναμενόμενο λόγω της εποχιακής μεταβλητότητας των μετεωρολογικών συνθηκών στην περιοχή. Δεύτερον, όπως αναφέρθηκε και στη πρώτη μελέτη περίπτωσης που αφορούσε την ξηρασία του 2017 για το Western Cape, η υγρή περίοδος του 2018 (JJA) αποτέλεσε την επίσημη ημερομηνία λήξης του «Zero Day» για την πόλη του Cape Town. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι οι τιμές των δεικτών ξηρασίας, τουλάχιστον στην αρχή της υφιστάμενης περιόδου μελέτης, θα εμφανίζουν κατά κανόνα υψηλότερες τιμές από το κανονικό και ο χαρακτηρισμός μιας μικρής πτωτικής πορείας των δεικτών στο δεύτερο μισό του έτους ως εκδήλωση ξηρασίας στην περιοχή μπορεί να είναι αναληθής. Για τους λόγους αυτούς, η ανάλυση των δεικτών ξηρασίας για το τελευταίο εξάμηνο του 2018

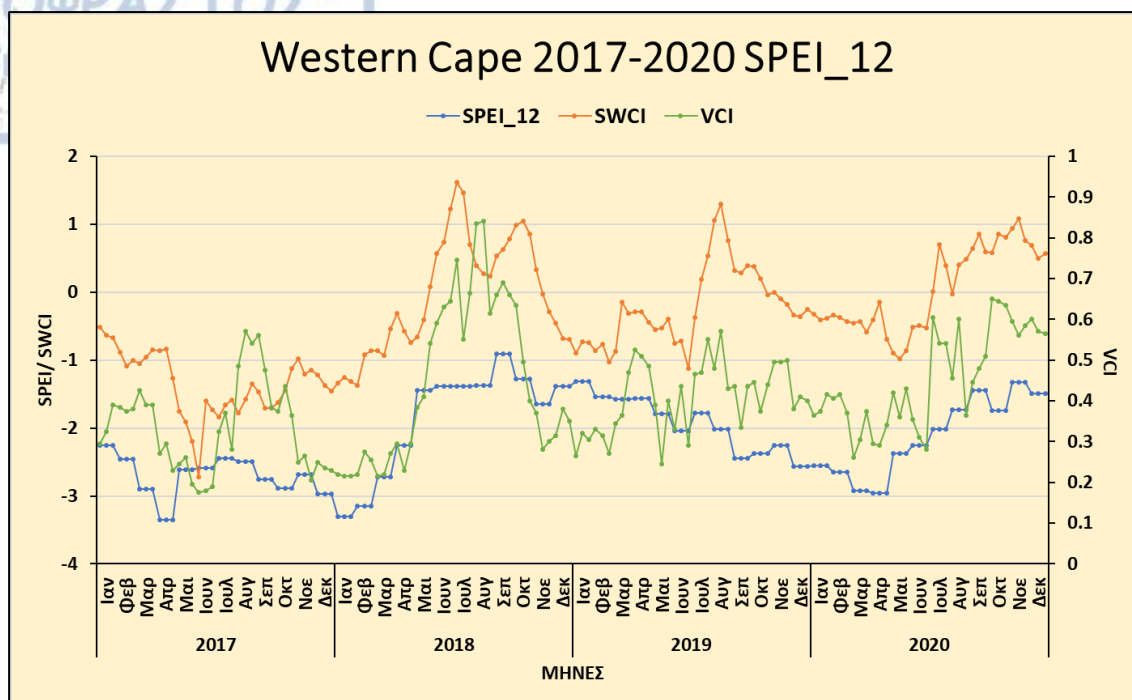
για την επαρχία του Western Cape (Σχήματα 3.28 – 3.30) γίνεται κατά περίπτωση στο σύνολο της χρονοσειράς μελέτης (2017-2020).



Σχήμα 3.28. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Western Cape (νοτιοδυτικά) για την περίοδο 2017-2020.



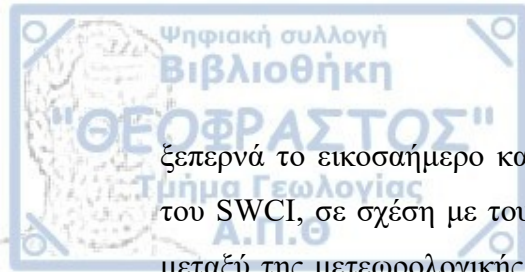
Σχήμα 3.29. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Western Cape (νοτιοδυτικά) για την περίοδο 2017-2020.



Σχήμα 3.30. Απεικόνιση των δεικτών SPEI₁₂, SWCI και VCI στην περιοχή του Western Cape (νοτιοδυτικά) για την περίοδο 2017-2020.

Τον Οκτώβριο του 2018, που αποτελεί τον μήνα εμφάνισης έντονης ξηρασίας στις περισσότερες περιοχές της Ν. Αφρικής, ο δείκτης SPEI₁ εμφανίζει μια από τις μεγαλύτερες πτώσεις στο σύνολο της χρονοσειράς μελέτης. Οι συνθήκες από κανονικές που περιγράφονται από τον δείκτη τον Σεπτέμβριο ($SPEI_{1SEP} > 0$) μεταβάλλονται σε συνθήκες εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας ($SPEI_{1OCT} < -2$). Ταυτόχρονα, και ο δείκτης VCI την περίοδο αυτή εμφανίζει την μεγαλύτερη πτωτική του πορεία στην τετραετία, μεταβαίνοντας από κανονικές συνθήκες ($VCI_{SEP} \sim 0.7$) σε πολύ κακές συνθήκες βλάστησης ($VCI_{NOV} < 0.3$). Την ίδια έντονη πτωτική πορεία των προαναφερθέντων δεικτών (SPEI₁ και VCI) εμφανίζει και ο δείκτης SPEI₃ το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND) μεταβάλλοντας τις συνθήκες για το Western Cape από κανονικές τον Σεπτέμβριο ($SPEI_{3SEP} > -1$) σε συνθήκες ακραίας ξηρασίας στο τέλος τους έτους ($SPEI_{3DEC} < -2$).

Πτωτικά κινείται και ο δείκτης SWCI κατά το τελευταίο τρίμηνο, όπου από τις θετικές τιμές του δείκτη τον Οκτώβριο ($SWCI_{OCT} \sim 1$) και τις κανονικές συνθήκες εδάφους, ο δείκτης καταλήγει σε αρνητικές τιμές το τελευταίο δίμηνο του έτους περιγράφοντας έτσι ξηρικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, ο δείκτης SWCI εμφανίζει την χρονική καθυστέρηση στην μεταστροφή της κύμανσης, η οποία έχει παρατηρηθεί και σε άλλα σημεία της ανάλυσης των δεικτών, άλλα και πάλι το διάστημα αυτό δεν



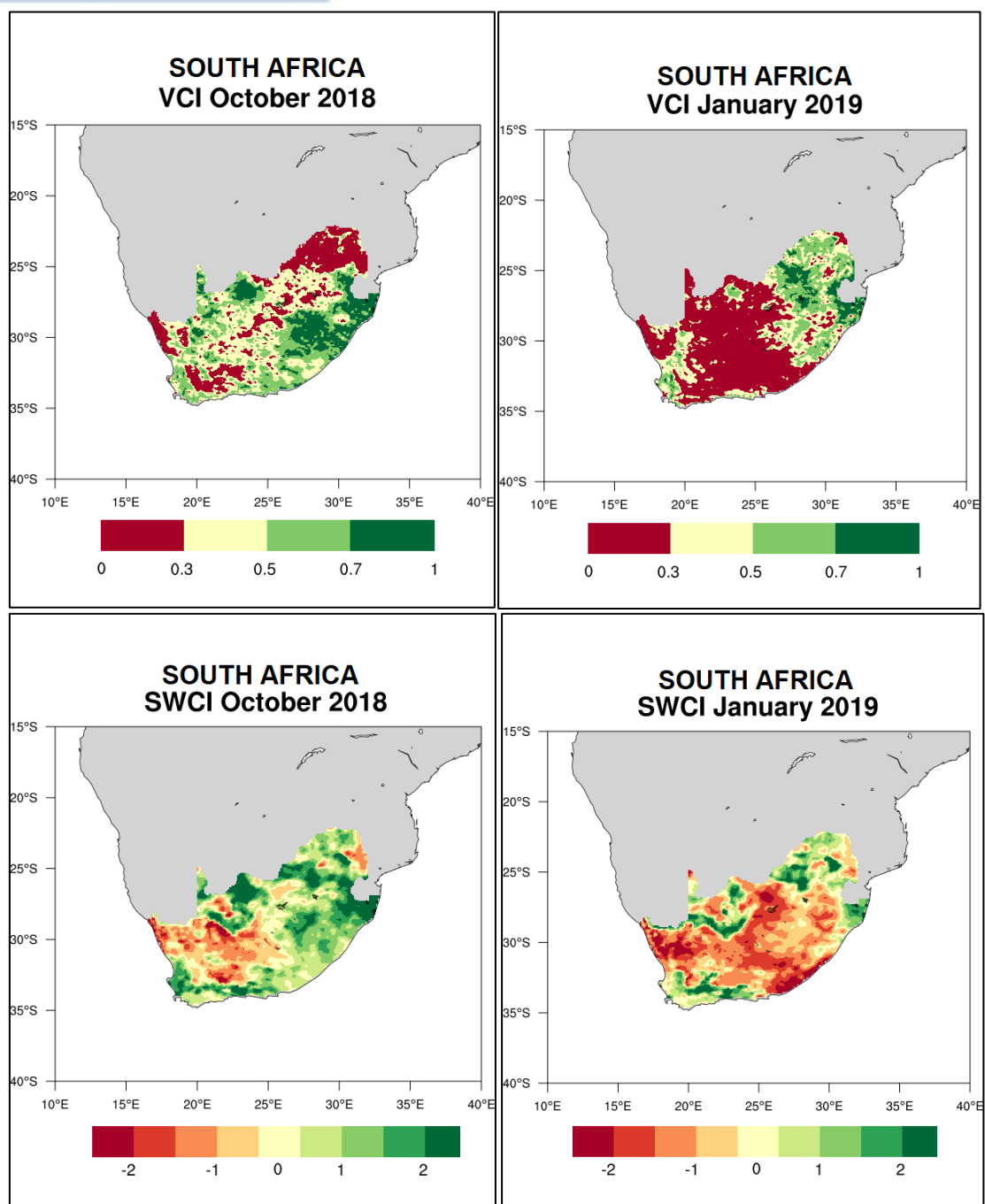
ξεπερνά το εικοσαήμερο και δεχόμαστε αυτή την μεταγενέστερη χρονική απόκριση του SWCI, σε σχέση με τους άλλους δείκτες, ως την υφιστάμενη χρονική απόκριση μεταξύ της μετεωρολογικής και της γεωργικής ξηρασίας που περιγράφει ο εκάστοτε δείκτης.

Την διαφοροποίηση στην επαρχία Western Cape στην ανάλυση των δεικτών για την συγκεκριμένη περίοδο την κάνει ο δείκτης SPEI_12, ο οποίος εμφανίζεται στο τελευταίο εξάμηνο σχεδόν αμετάβλητος και μόνο το δίμηνο Οκτωβρίου - Νοεμβρίου κινείται ελαφρά πτωτικά, μετά από μια μικρή άνοδο τον Σεπτέμβριο, περιγράφοντας όλη την περίοδο με μέτρια ξηρασία. Αυτή η διαφοροποίηση του SPEI_12 μπορεί να οφείλεται είτε στην φύση του ίδιου του δείκτη, καθώς υπολογίζει την μετεωρολογική ξηρασία σε βάθος δωδεκάμηνου με αποτέλεσμα να συνυπολογίζει, στην παρούσα φάση της ανάλυσης, τις ακραία ξηρικές συνθήκες που επικράτησαν στο Western Cape μέχρι και τις αρχές του 2018, είτε στην ικανότητα του δείκτη να μην επηρεάζεται από την εποχικότητα μιας περιοχής που διατυπώθηκε σαν πιθανότητα επηρεασμού των δεικτών στην αρχή της ανάλυσης για την επαρχία αυτή. Οι δύο αυτοί παράγοντες μπορεί να επέδρασαν στις τιμές του δείκτη συνδυαστικά για την συγκεκριμένη περίοδο, άλλα και πάλι ο SPEI_12 πετυχαίνει να περιγράψει το δίμηνο Οκτωβρίου – Νοεμβρίου σαν μια περίοδο επιδείνωσης των συνθηκών ξηρασίας για τα νοτιοδυτικά της Ν. Αφρικής με την πτώση που εμφανίζει στις τιμές του το δίμηνο αυτό, ερχόμενος σε συμφωνία με τους υπολοίπους δείκτες ξηρασίας.

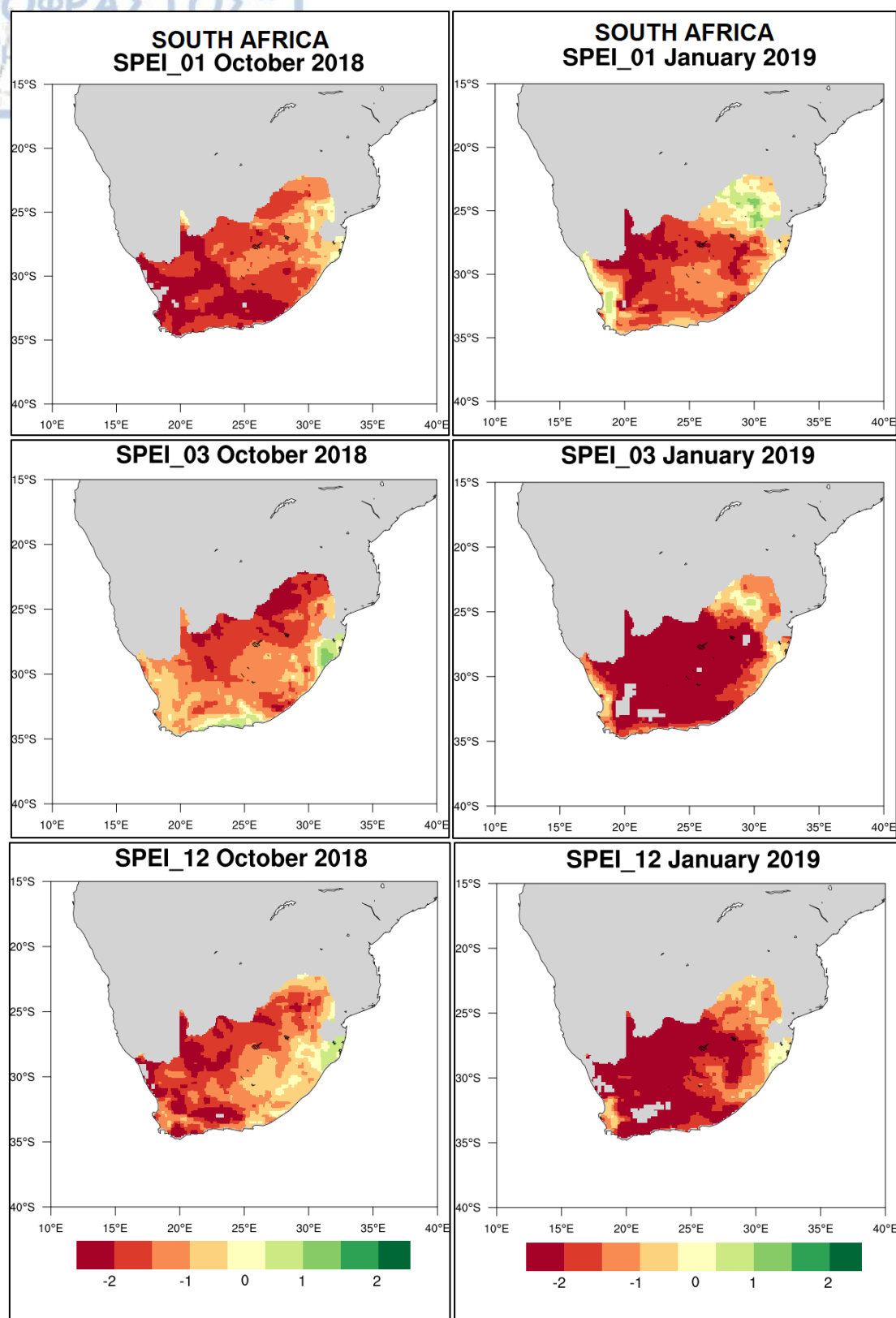
Χωρική Ανάλυση της ξηρασίας για το 2018: Στη χωρική ανάλυση της ξηρασίας του τελευταίου εξαμήνου του 2018 είναι χαρακτηριστική η επιδείνωση των τιμών σε ξηρότερες συνθήκες για όλη σχεδόν την Ν. Αφρική την άνοιξη του 2018 (SOM) (Σχήματα 3.31 - 3.32, σύγκριση Οκτωβρίου 2018 με τον Ιούλιο του 2018 στα Σχήματα 3.9 -3.10), με χαρακτηριστικότερη την έντονη μεταβολή του δείκτη SPEI_1 σε συνθήκες ακραίας ξηρασίας τον Οκτώβριο σε πολλές επαρχίες της Ν. Αφρικής στα δυτικά, κεντρικά και νότια.

Και ενώ ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζει μια βελτιωμένη εικόνα ως προς τις τιμές του τον Ιανουάριο του 2019 (Σχήμα 3.32), οι υπόλοιποι δείκτες εμφανίζουν σαφή επιδείνωση των συνθηκών ξηρασίας τον μήνα αυτό (Σχήμα 3.31 - 3.32). Το στοιχείο αυτό φανερώνει με εύλογο τρόπο αυτό που ειπώθηκε σε πολλά σημεία στην ποιοτική ανάλυση των δεικτών ότι, με εξαίρεση τον SPEI_1, οι υπόλοιποι δείκτες που αναλύονται στην παρούσα εργασία εμφανίζουν αδυναμία στον έγκαιρο εντοπισμό της έναρξης μιας μετεωρολογικής ξηρασίας. Ταυτόχρονα όμως, οι τέσσερις δείκτες

(SPEI_3, SPEI_12, SWCI και VCI) περιγράφουν πολύ καλύτερα τα επεισόδια των γεωργικών και των υδρολογικών ξηρασιών σε σχέση με τον δείκτη SPEI_1.



Σχήμα 3.31. Απεικόνιση των δεικτών VCI (πάνω) και SWCI (κάτω) για το δεύτερο δεκαήμερο του Οκτωβρίου 2018 (αριστερά) και το δεύτερο δεκαήμερο του Ιανουαρίου 2019 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.



Σχήμα 3.32. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω), SPEI_3 (κέντρο) και SPEI_12 (κάτω) για τον Οκτώβριο 2018 (αριστερά) και τον Ιανουάριο 2019 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.

Κλείνοντας το κομμάτι της χωρικής ανάλυσης για το επεισόδιο της ξηρασίας του τελευταίου εξαμήνου του 2018 στην Ν. Αφρική, τονίζεται ότι οι μόνες περιοχές που φαίνεται να μην επηρεάστηκαν από την έντονη ξηρασία είναι οι βόρειες περιοχές της επαρχίας Limpopo στα βορειανατολικά της χώρας. Η σημειακή ανάλυση της επαρχίας αφορούσε την περιοχή στα νότια του Limpopo, στα σύνορα με τις επαρχίες Mpumalanga και Gauteng, όπου οι μεταβολές των τιμών των δεικτών εμφάνισαν την περιοχή να επηρεάζεται από ξηρότερες συνθήκες την περίοδο αυτή. Καταδεικνύεται έτσι η χρησιμότητα των δεδομένων πλέγματος αντί των σημειακών παρατηρήσεων (όπως αυτών των μετεωρολογικών σταθμών) στις μελέτες που σχετίζονται με την ξηρασία, αλλά ταυτόχρονα και η αναγκαιότητα έκδοσης προειδοποιήσεων τοπικού χαρακτήρα από τις υπηρεσίες παρακολούθησης της ξηρασίας.

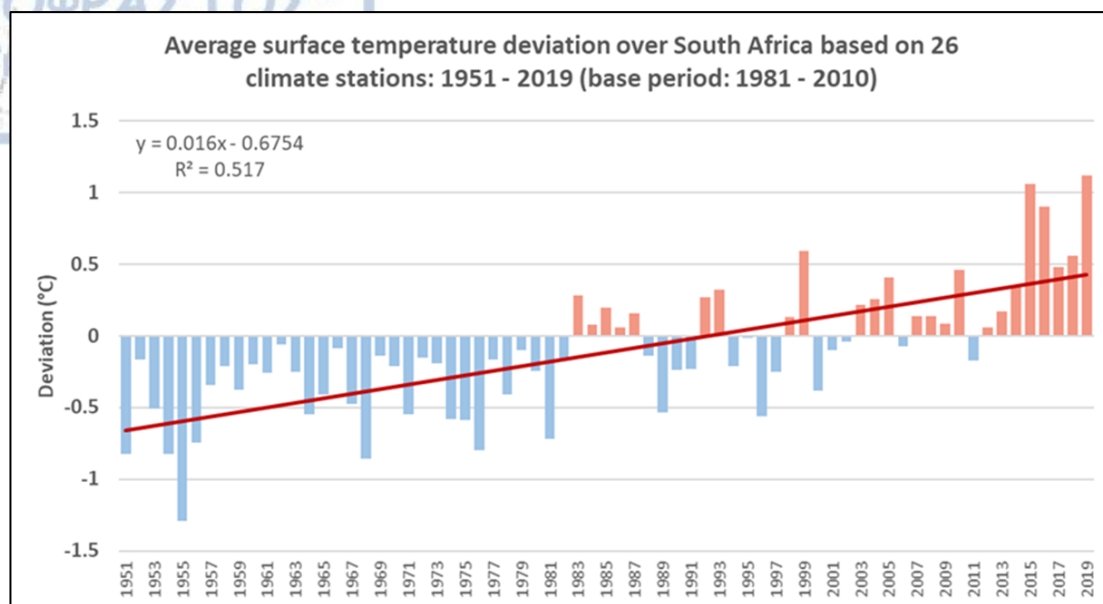
3.3. 3^η ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΞΗΡΑΣΙΑ 2019

3.3.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την Ξηρασία του 2019

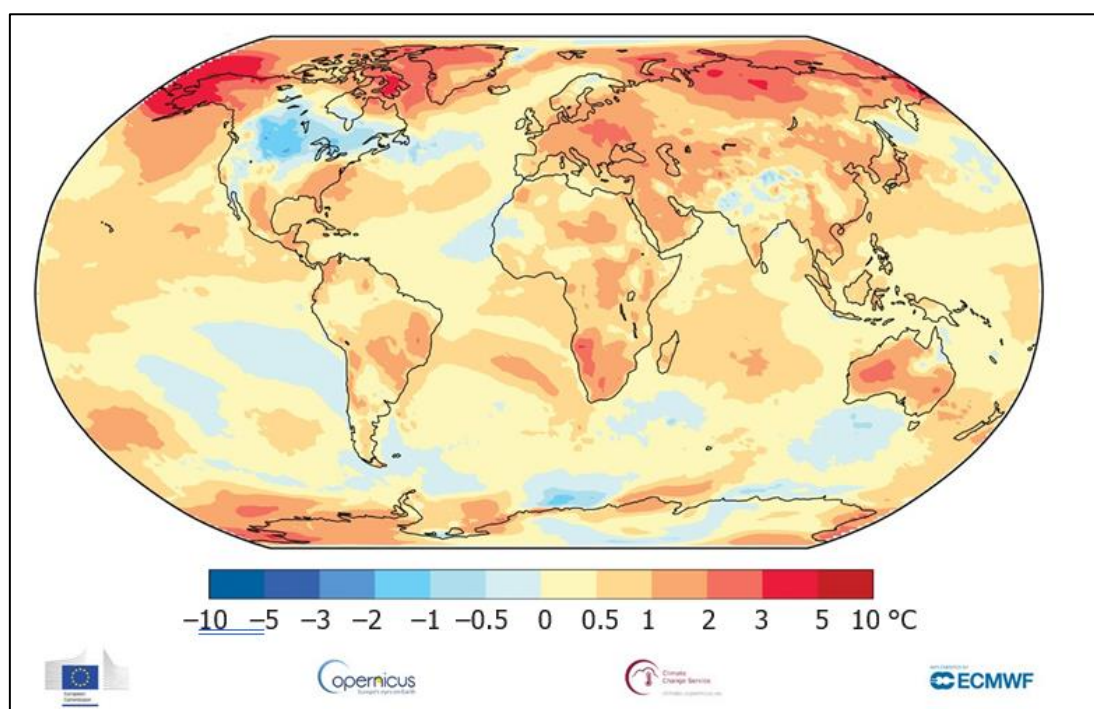
Η Μετεωρολογική Υπηρεσία της Ν. Αφρικής στην ετήσια επισκόπηση του κλίματος για το 2019 (SAWS 2020) τονίζει ότι, με βάση τα δεδομένα από 26 μετεωρολογικούς σταθμούς, η μέση ετήσια θερμοκρασία του 2019 ήταν κατά μέσο όρο 1.1 °C πάνω από την περίοδο αναφοράς (1981-2010), και το συγκεκριμένο έτος αποτέλεσε την θερμότερη χρονιά που έχει καταγραφεί από το 1951 για την Ν. Αφρική (Σχήμα 3.33).

Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον ετήσιο χάρτη (Σχήμα 3.34) του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας (WMO 2020), η απόκλιση αυτή της θερμοκρασίας εμφανίζεται χωρικά σε όλη την Ν. Αφρική με αποτέλεσμα το σύνολο των επαρχιών της χώρας να καταγράφουν το 2019 ως το θερμότερο (Limpopo, Northern Cape, Western Cape και Eastern Cape) ή το δεύτερο θερμότερο (Free State, KwaZulu-Natal) έτος από το 1951 (SAWS 2020).

Όσον αφορά τον υετό στην Ν. Αφρική για το 2019, στις περισσότερες επαρχίες εμφανίζεται κάτω από τις κλιματικές τιμές (~80%) χωρίς κάποια επαρχία να λαμβάνει σημαντικά περισσότερες από το κανονικό βροχοπτώσεις. Στα βορειοδυτικά (Northern Cape) σημειώνονται κάτω από το 50% των κλιματικών βροχοπτώσεων, ενώ και σε περιοχές στα νότια (Port Elizabeth, Eastern Cape) το 2019 εμφανίζει το χαμηλότερο ετήσιο υετό από το 1981 (SAWS 2020).

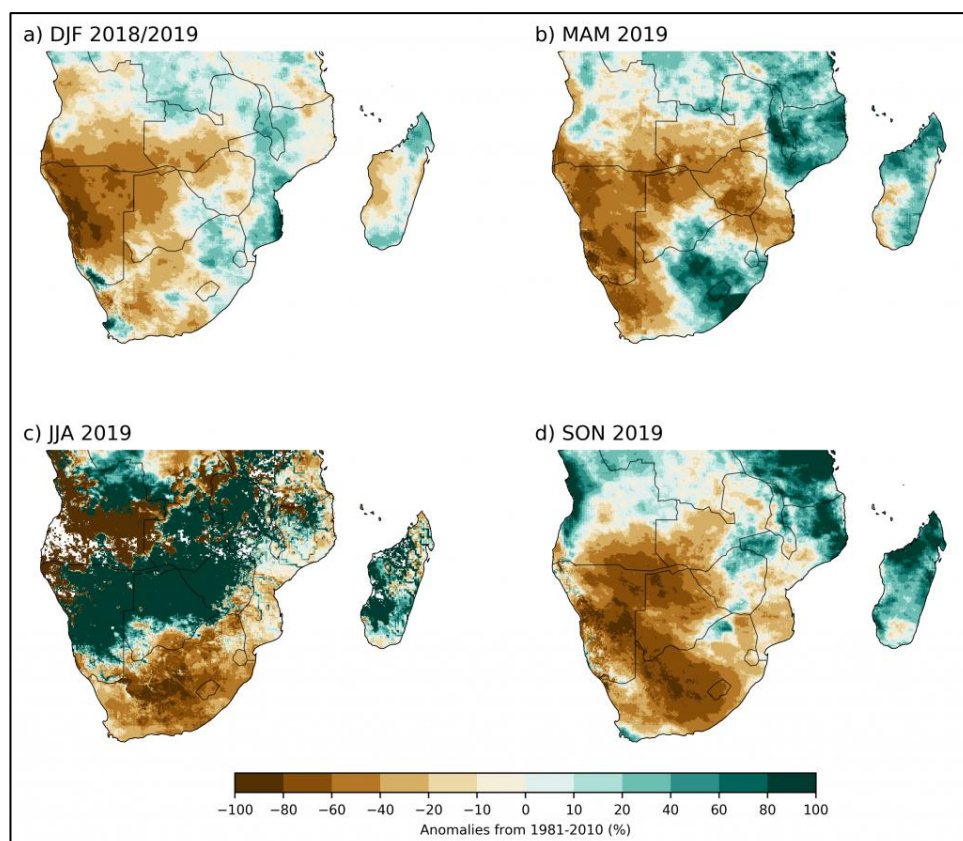


Σχήμα 3.33. Απόκλιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην επιφάνεια για την Ν. Αφρική από το 1951 έως το 2019 σύμφωνα με 26 μετεωρολογικούς σταθμούς της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της χώρας (περίοδος βάσης 1981 -2010). Η κόκκινη γραμμή εκφράζει την τάση ανόδου της θερμοκρασίας η οποία υπολογίζεται σε 1.6°C ανά δεκαετία (SAWS 2020).



Σχήμα 3.34. Απόκλιση θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια για το 2019, σε σχέση με το μέσο όρο της περιόδου 1981-2010 (WMO 2020: ERA-Interim data, European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) Copernicus Climate Change Service).

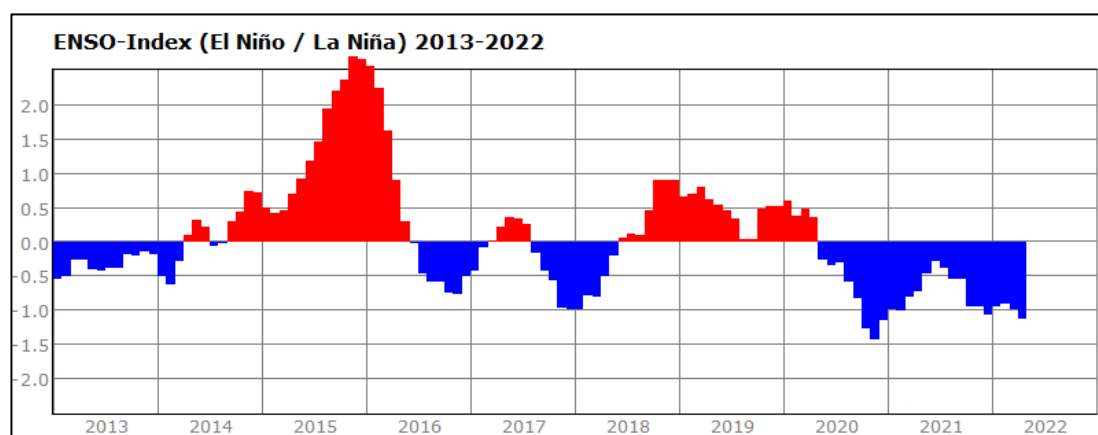
Όπως περιγράφεται από πολλές πηγές (WMO 2020, CHIRPS 2020, SAWS 2020), το 2019 ξεκινά με ξηρές συνθήκες (Σχήμα 3.35) στις κεντρικές και κυρίως στις δυτικές περιοχές της χώρας (Free State, Northern Cape), οι οποίες συνεχίζονται και το φθινόπωρο (MAM), ενώ αντίθετα την ίδια περίοδο τα ανατολικά (KwaZulu Natal, Απρίλιο) και τα βορειανατολικά (Limpopo, Μάρτιο) δέχονται σημαντικές βροχοπτώσεις, πολύ πάνω από τις κλιματικές τιμές. Κατά την διάρκεια του χειμώνα (JJA), βροχοπτώσεις κοντά στις κλιματικές τιμές σημειώνονται μόνο σε τμήματα του KwaZulu Natal, του Western Cape και του Limpopo με τις υπόλοιπες περιοχές να παρουσιάζουν έντονο υετικό έλλειμμα την εποχή αυτή. Η άνοιξη (SON) εμφανίζεται χωρίς σημαντικά υετικά γεγονότα στο σύνολο της Ν. Αφρικής οξύνοντας τα προβλήματα της ξηρασίας στις περισσότερες περιοχές (εξάιρεση η περιοχή του Cape Town στα νοτιοδυτικά). Στα τέλη Νοεμβρίου αναφέρονται πλημμύρες στις ανατολικές περιοχές (KwaZulu - Natal) και το Δεκέμβριο κανονικές βροχοπτώσεις σε όλη την Ν. Αφρική.



Σχήμα 3.35. Ανωμαλίες (%) του υετού σε σχέση με τις μέσες κλιματικές τιμές (περίοδος βάσης: 1981-2010) για a. το καλοκαίρι 2018-2019 (DJF), b. το φθινόπωρο 2019 (MAM), c. τον χειμώνα 2019 (JJA) και d. την άνοιξη 2019 (SON), για την Νότια Αφρική (SAF) (CHIRPS 2020).

Η υπηρεσία Copernicus μέσω του Παγκόσμιου Παρατηρητηρίου Ξηρασίας (GDO), εξέδωσε συνολικά τέσσερις έκτακτες αναλυτικές μελέτες μέσα στο 2019 (Μάρτιο, Αύγουστο, Οκτώβριο, Δεκέμβριο) για την ξηρασία στην Νότια Αφρική (SAF), σε συνέχεια της μελέτης του Ιανουαρίου του 2019, εκ των οποίων οι τρεις αφορούν την Ν. Αφρική. Στην έκθεση του Μαρτίου επισημαίνεται ότι ο κίνδυνος επιπτώσεων της ξηρασίας στην γεωργία παραμένει πολύ υψηλός για τις κεντρικές, τις νότιες και τις νοτιοανατολικές περιοχές της χώρας ενώ αντίστοιχα στην έκθεση του Αυγούστου οι ακραίες συνθήκες της ξηρασίας επεκτείνονται και στα δυτικά και βορειοδυτικά. Τέλος, στην έκθεση του Δεκεμβρίου περιγράφονται οι συνθήκες ξηρασίας που επιμένουν στις προαναφερθείσες περιοχές, αλλά ταυτόχρονα τονίζεται η επιδείνωση των ξηρικών συνθηκών στα νότια και νοτιοανατολικά (GDO March, August, December 2019).

Όσον αφορά τα συνοπτικά αίτια της ξηρασίας του 2019 στην Ν. Αφρική, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ανάλυση για το 2018, κύρια αιτία είναι η επανεμφάνιση θετικών τιμών του δείκτη ENSO κατά το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (Σχήμα 3.36). Ο δείκτης παρέμεινε σε θετικές τιμές καθ' όλη την διάρκεια του 2019 διατηρώντας το φαινόμενο El Niño για όλο το έτος. Για τις βροχοπτώσεις, κυρίως την περίοδο του φθινοπώρου, στα ανατολικά και βορειοανατολικά της Ν. Αφρικής ευθύνεται το δίπολο του Υποτροπικού Ινδικού Ωκεανού (IOSD), το οποίο εμφανίζεται έντονα θετικό στο πρώτο μισό του 2019 (WMO 2020).



Σχήμα 3.36. Η διακύμανση των τιμών του δείκτη ENSO (El Niño Southern Oscillation) από τον Ιανουάριο του 2013 έως το Απρίλιο του 2022 (Πηγή: weather.plus).

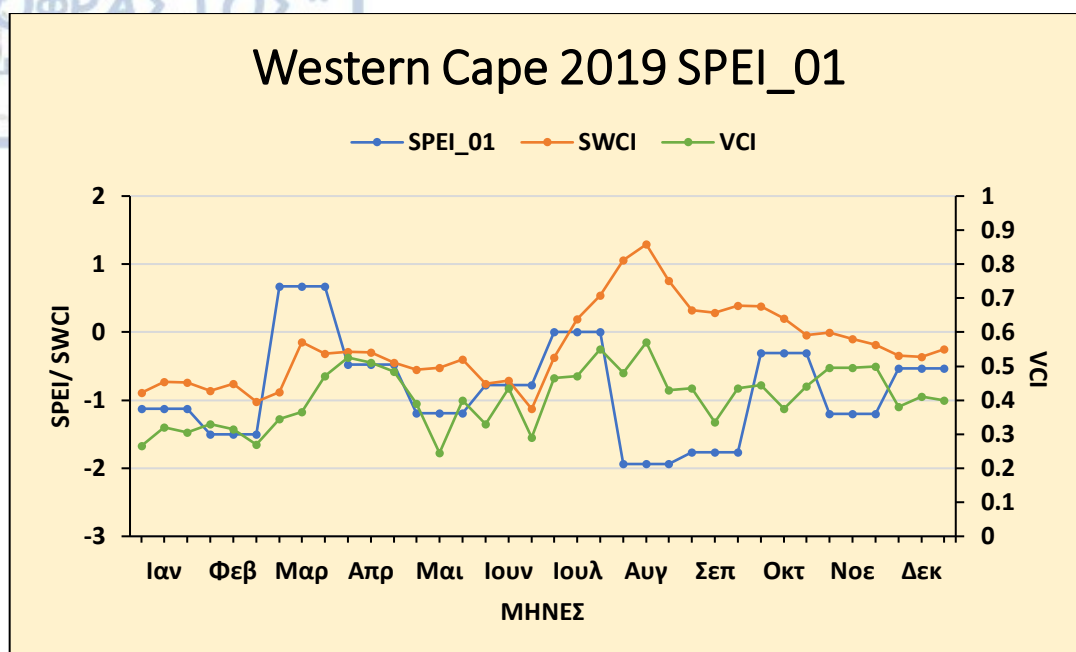
Στη Ν. Αφρική, οι επιπτώσεις των συνθηκών παρατεταμένης ξηρασίας του 2019 αφορούν κυρίως την γεωργία, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση στην παραγωγή

και τις επακόλουθες απολύσεις εργαζομένων στον αγροτικό τομέα. Ο κίνδυνος της επισιτιστικής ασφάλειας παραμένει υψηλός το 2019 στις υποσαχάριες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ν. Αφρικής από το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND) μέχρι την επόμενη συγκομιδή (MAM 2020), αρκετούς μήνες μετά (IFRC 2019).

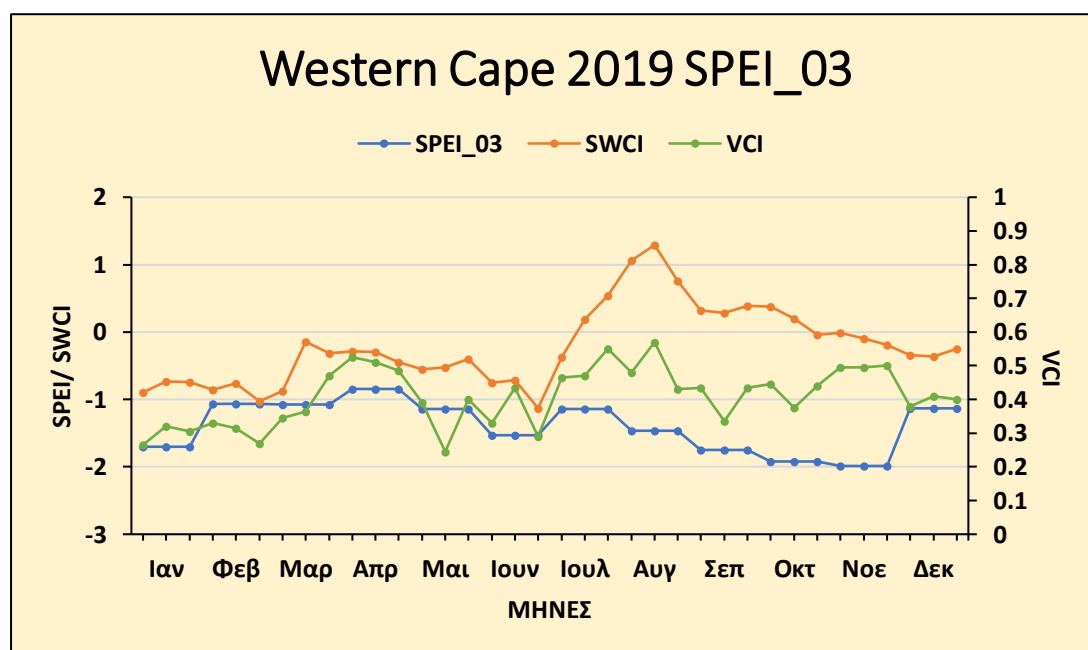
3.3.2 Ανάλυση των Δεικτών Ξηρασίας της 3^{ης} Μελέτης Περίπτωσης

Η τρίτη μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνει τις τιμές και τις διακυμάνσεις των δεικτών ξηρασίας για το 2019. Ήδη στην ανάλυση της πρώτης μελέτης που αφορούσε την ξηρασία στο Cape Town για το 2017 διαπιστώθηκε, μέσω της ποσοτικής προσέγγισης των τιμών των δεικτών για την τετραετία 2017-2020, ότι σε πολλές επαρχίες της Ν. Αφρικής (με εξαίρεση το Western Cape) το 2019 είναι το έτος που εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές τόσο στις ελάχιστες όσο και στις μέγιστες στο σύνολο των δεικτών, αλλά και οι μικρότεροι μέσοι όροι των τιμών τους για το έτος αυτό (Πίνακες 3.1 - 3.10). Αναλυτικά τα ευρήματα της ποσοτικής ανάλυσης των δεικτών παρουσιάζονται στην αμέσως επόμενη ενότητα (Ενότητα 3.4). Η ανάλυση, λοιπόν, τονίζει ότι είναι σημαντικό να διερευνηθεί το 2019 εξετάζοντας όλες τις επαρχίες της χώρας τόσο ως προς την χωρική έκταση της ξηρασίας στην Ν. Αφρική όσο και ως προς το χαρακτηριστικό της έντασής της.

Western Cape: Ξεκινώντας την ανάλυση των δεικτών από την επαρχία του Western Cape, την επαρχία που όπως προαναφέρθηκε φαίνεται να είναι η περιοχή που επηρεάστηκε λιγότερο από το συγκεκριμένο επεισόδιο ξηρασίας (ή το επεισόδιο του 2017 ήταν πολύ πιο έντονο για την συγκριμένη περιοχή), διαπιστώνεται, από τα Σχήματα 3.37 - 3.39, ότι οι τιμές των δεικτών σχεδόν στο σύνολο τους δεν εμφανίζουν συνθήκες ακραίας ξηρασίας. Εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα αποτελεί ο δείκτης SPEI_12 όπου από συνθήκες σημαντικής ξηρασίας το πρώτο επτάμηνο του 2019, περιγράφει το τελευταίο πεντάμηνο του έτους (Αύγουστος - Δεκέμβριος) ως ακραία ξηρό. Έτσι, ο SPEI_12 επιβεβαιώνει, με αυτή την διαφοροποίησή του, ότι υπολογίζοντας την ξηρασία σε βάθος δωδεκαμήνου το 2018 αποτέλεσε μια ξηρή χρονιά για την περιοχή, και το σημαντικότερο, που έχει λεχθεί για την συγκεκριμένη επαρχία με Μεσογειακό κλίμα, ότι η υγρή και ταυτόχρονα ψυχρή περίοδος (JJA) είναι αυτή που δρα καταλυτικά στις πιθανότητες ή μη εμφάνισης έντονα ξηρικών συνθηκών τις υπόλοιπες εποχές του έτους.



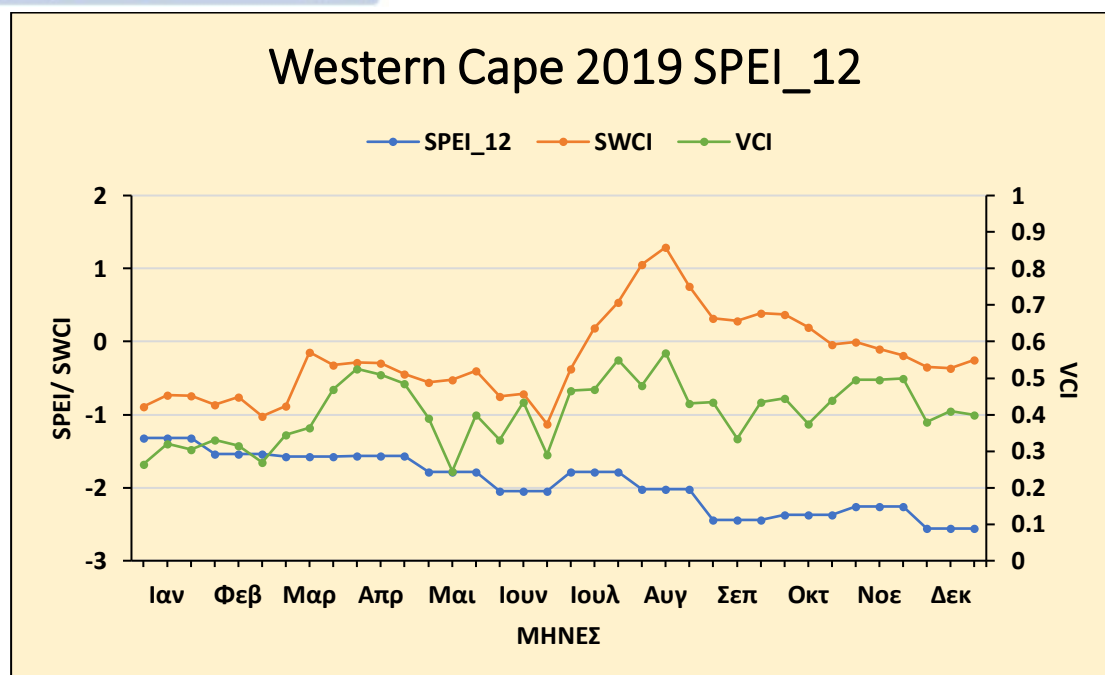
Σχήμα 3.37. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Western Cape (νοτιοδυτικά) για το 2019.



Σχήμα 3.38. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Western Cape (νοτιοδυτικά) για το 2019.

Το τελευταίο διαπιστώνεται και από τους υπόλοιπους δείκτες ξηρασίας για τον χειμώνα του 2019 (JJA) στην περιοχή του Western Cape. Αν και στην έναρξη της υγρής περιόδου (Ιούνιος – Ιούλιος) ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζεται ανοδικός τον Αύγουστο (ικανότητα του δείκτη να εντοπίζει σχεδόν κάθε υετικό επεισόδιο που λαμβάνει χώρα σε μια περιοχή εγκαίρως), κατά την διάρκεια της κλιματικά υγρής

περιόδου για την περιοχή εμφανίζει σημαντική πτώση περιγράφοντας τον μήνα σημαντικά ξηρό ($SPEI_{1AUG} < -1.5$).



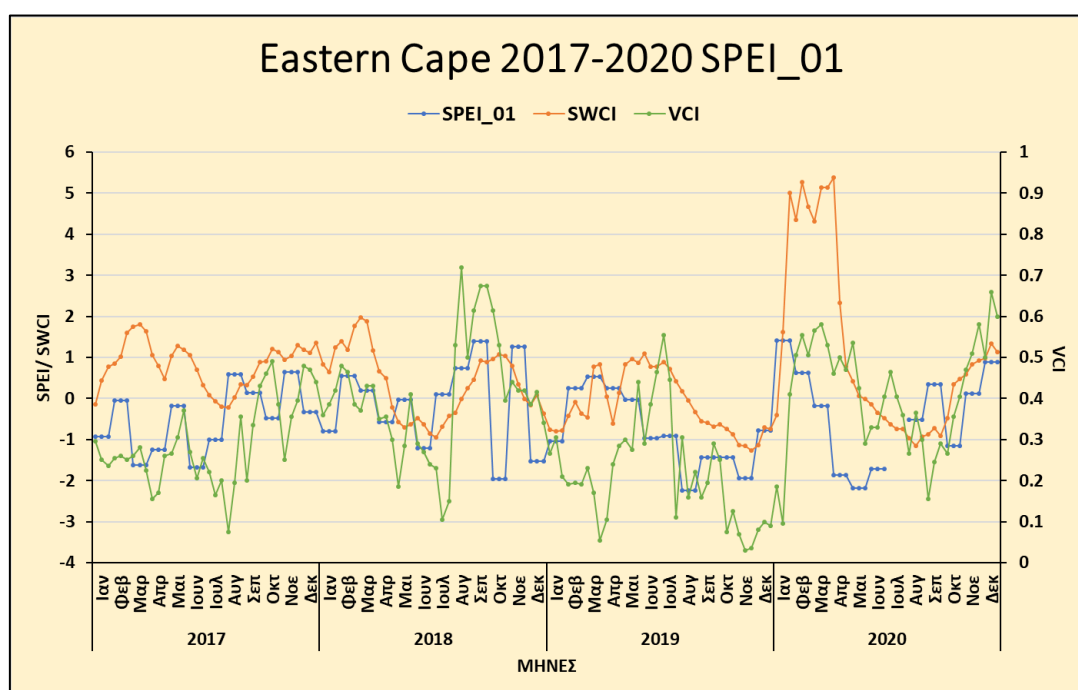
Σχήμα 3.39. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Western Cape (νοτιοδυτικά) για το 2019.

Από την άλλη πλευρά, και ο δείκτης SPEI_3 αντί να εμφανίζει μια αναμενόμενη ανοδική πορεία κατά την μετάβαση από την ξηρή και θερμή περίοδο του έτους στην υγρή και ψυχρή λόγω εποχικότητας της περιοχής, κινείται πτωτικά από τον Μάιο και καθ' όλη την διάρκεια της υγρής περιόδου, με εξαίρεση τον Ιούλιο, κατά τον οποίο εμφανίζονται υετικά επεισόδια (συμφωνία με τον SPEI_1), με αποτέλεσμα η μεταβατική περίοδος της άνοιξης (SON) να χαρακτηρίζεται από σημαντική ξηρασία ($SPEI_{3SON} < -1.5$). Από τον δείκτη VCI απουσιάζει η εποχιακή μεταβλητότητα της περιοχής για το 2019, καθώς παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις καθ' όλη την διάρκεια τους έτους, περιγράφοντας τις συνθήκες βλάστησης για την περιοχή από μέτριες έως κακές και πολύ κακές τον Μάιο ($VCI_{MAX2019} < 0.7$).

Αντίθετα, ο δείκτης SWCI από τα μέσα της υγρής περιόδου (Ιούλιος) εμφανίζει έντονη ανοδική πορεία, διαφοροποιημένος σε σχέση με τους άλλους δείκτες ξηρασίας, η οποία συνεχίζεται και τον Αύγουστο, ενώ έρχεται σε συμφωνία μαζί τους τον Σεπτέμβριο παραμένοντας πτωτικός έως το τέλος του 2019. Η διαφοροποίηση αυτή του SWCI αποκαλύπτει, σε πρώτη φάση, την ήδη εντοπισμένη χρονική καθυστέρηση στην απόκριση των μεταβολών των ξηρικών μοτίβων που εμφανίζει σε

σχέση με τους μετεωρολογικούς δείκτες της ανάλυσης (SPEI_1, 3, 12) και, όπως αναφέρθηκε ήδη στις προηγούμενες αναλύσεις, στην πράξη θεωρείται δικαιολογημένη. Σε δεύτερη φάση όμως οι μεταβολές του δείκτη SWCI στην συγκεκριμένη περίπτωση φανερώνουν μια πιθανή υπερευαισθησία του δείκτη σε υετικά επεισόδια κατά τις υγρές και ψυχρές περιόδους και την αδυναμία του έτσι να περιγράψει υδρολογικές ξηρασίες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε παρόμοιες συνθήκες. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο δείκτης επαναφέρει συνθήκες που θεωρούνται ξηρικές, βάσει των τιμών του, τον Οκτώβριο του 2019 ($SWCI_{Oct} < 0$), κατά την μετάβαση στην θερμή περίοδο για την περιοχή, μήνες μετά από τότε που οι άλλοι δείκτες, στο σύνολό τους περιγράφουν συνθήκες και έντονης ξηρασίας (Σχήματα 3.55 - 3.58).

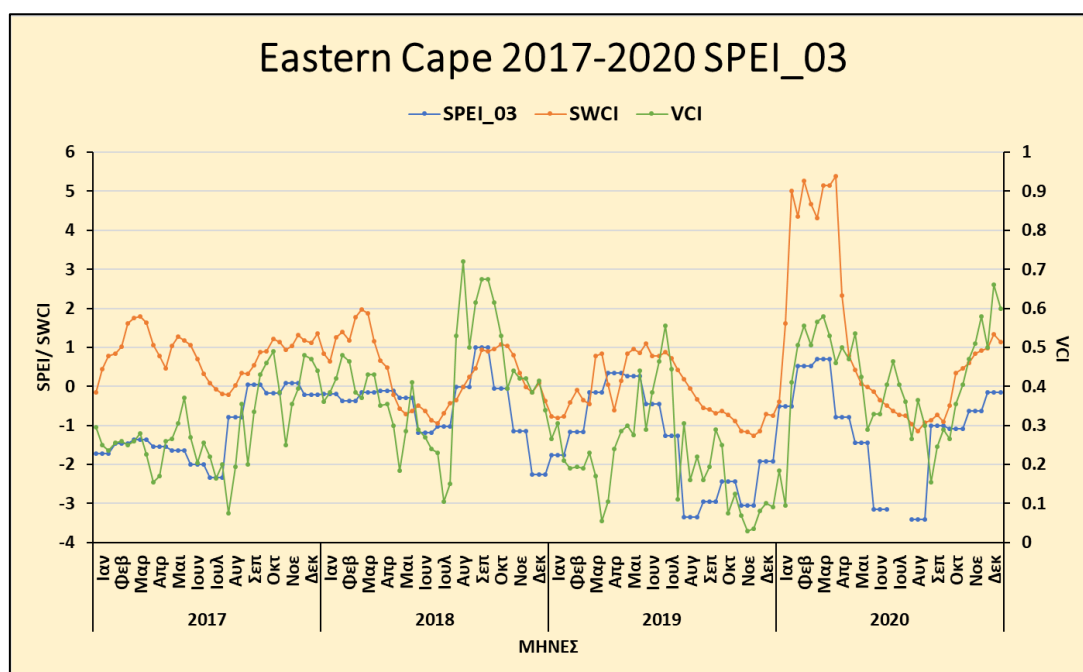
Στην συνέχεια της ανάλυσης των δεικτών εξετάζονται δύο επαρχίες (Eastern Cape και Free State) που, όπως έδειξε η πρώτη ανάλυση, το 2017 επηρεάστηκαν έστω και σε μικρό βαθμό από την ξηρασία που δημιουργήσε σοβαρά προβλήματα στις νοτιοδυτικές περιοχές της Ν. Αφρικής, και επηρεάστηκαν έντονα τόσο σε ένταση όσο και σε διάρκεια, από την ξηρασία του 2018.



Σχήμα 3.40. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Eastern Cape (νότια) για την περίοδο 2017-2020.

Eastern Cape: Αρχικά, όσον αφορά τα νότια και τα νοτιοανατολικά της χώρας (Eastern Cape), φαίνεται από τους δείκτες ξηρασίας ότι βροχοπτώσεις στις περιοχές

αυτές εμφανίζονται τελικά με καθυστέρηση ύστερα από το έντονα ξηρό τελευταίο τρίμηνο του 2018 (OND). Συγκεκριμένα, ο δείκτης SPEI_1 παρουσιάζει ανοδική πορεία από τον Ιανουάριο του 2019 μέχρι και τον Μάρτιο μεταβάλλοντας τις συνθήκες σημαντικής ξηρασίας του Δεκεμβρίου του 2018 ($SPEI_{1DEC} < -1.5$) σε κανονικές συνθήκες ($SPEI_{1MAR} > 0$) (Σχήμα 3.40). Ανάλογη ανοδική πορεία εμφανίζει την περίοδο αυτή και ο δείκτης SPEI_3 (Σχήμα 3.41) όπου επεκτείνει το διάστημα βελτίωσης των συνθηκών ξηρασίας έως και τον Απρίλιο του 2019, με αποτέλεσμα να μεταβάλλει το χαρακτηρισμό της ξηρασίας από ακραία τον Δεκέμβριο του 2018 ($SPEI_{3DEC} < -2$) σε περίοδο κανονικών συνθηκών το δίμηνο Μαρτίου – Απριλίου ($SPEI_{3MAR}$ και $SPEI_{3APR} > 0$).

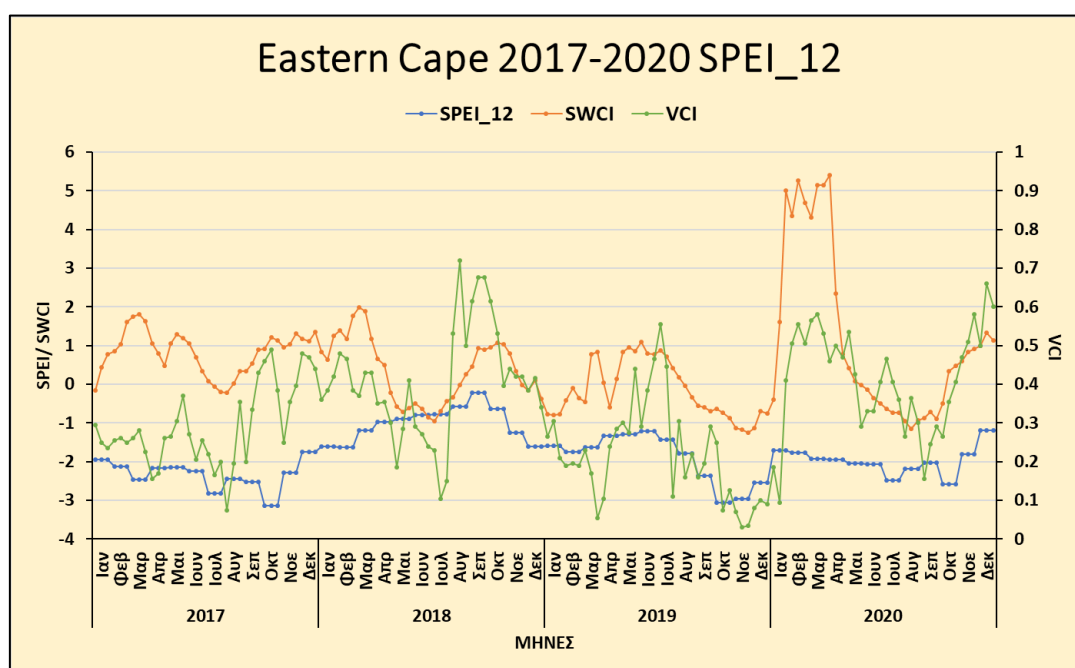


Σχήμα 3.41. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Eastern Cape (νότια) για την περίοδο 2017-2020.

Την ίδια ανοδική πορεία με τους δύο προαναφερθέντες δείκτες για το πρώτο τρίμηνο του 2019, ακολουθεί και ο δείκτης SWCI όπου επεκτείνει την περίοδο αυτή έως και τον Ιούνιο. Εξάιρεση, στην άνοδο του SWCI για το πρώτο εξάμηνο του 2019, αποτελεί το διάστημα Μαρτίου - Απριλίου. Η επέκταση της περιόδου βελτίωσης των συνθηκών ξηρασίας για την περιοχή του Eastern Cape από τον δείκτη SWCI, σε σχέση με τους δύο μετεωρολογικούς δείκτες της ανάλυσης ($SPEI_1$ και $SPEI_3$), επιβεβαιώνει και την χρονική καθυστέρηση απόκρισης του SWCI και την απεικόνιση της εποχιακής μεταβλητότητάς μιας περιοχής που ανέδειξε η μελέτη και σε άλλες

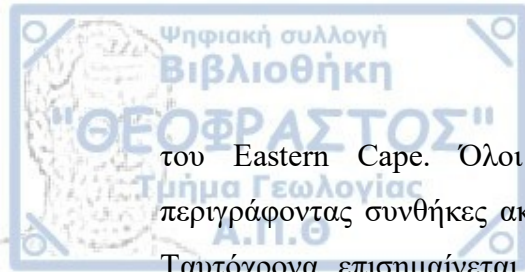
περιόδους για τον δείκτη, καθώς μεταβαίνουμε από μια διακριτή θερμή περίοδο σε μια ψυχρή. Συνυπολογίζοντας στην περίπτωση αυτή ότι η επαρχία του Eastern Cape ανήκει στην ARZ χωρίς διακριτές υγρές και ξηρές περιόδους ως προς τις βροχοπτώσεις, ο παράγοντας θερμοκρασία φαίνεται να είναι η παράμετρος που οφείλεται η εμφανιζόμενη μεταβλητότητα καθώς μεταβαίνουμε από μια ψυχρή σε μια υγρή περίοδο και το αντίστροφο.

Όπως φαίνεται όμως στο Σχήμα 3.42, ο δείκτης SWCI έρχεται σε συμφωνία με τον SPEI_12 για την περίοδο μεταστροφής του μοτίβου και της εμφάνισης ξηρότερων συνθηκών, καθώς και ο SPEI_12 εμφανίζει ανοδική πορεία έως τον Ιούνιο του 2019. Τέλος, την έντονη εποχιακή μεταβλητότητα της περιοχής εμφανίζει για το διάστημα αυτό (Ιανουάριος - Ιούνιος 2019) και ο δείκτης VCI, καθώς οι ξηρές συνθήκες του τελευταίου τριμήνου του 2018 δεν επιτρέπουν την μεταστροφή του δείκτη από την πτωτική του πορεία, κατά την θερμή περίοδο του 2019, περιγράφοντας έτσι τις συνθήκες βλάστησης πολύ κακές έως και τον Μάρτιο. Ο δείκτης VCI εμφανίζει αντίθετη πορεία (ανοδική) και το υπόλοιπο διάστημα, μέχρι τον Ιούνιο του 2019, σε σχέση με τους μετεωρολογικούς δείκτες SPEI_1 και SPEI_3.



Σχήμα 3.42. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Eastern Cape (νότια) για την περίοδο 2017-2020.

Στο δεύτερο εξάμηνο του 2019 φαίνεται, από την ανάλυση των δεικτών, η πλήρης συμφωνία τους στην μετάβαση σε συνθήκες έντονης ξηρασίας στην επαρχία



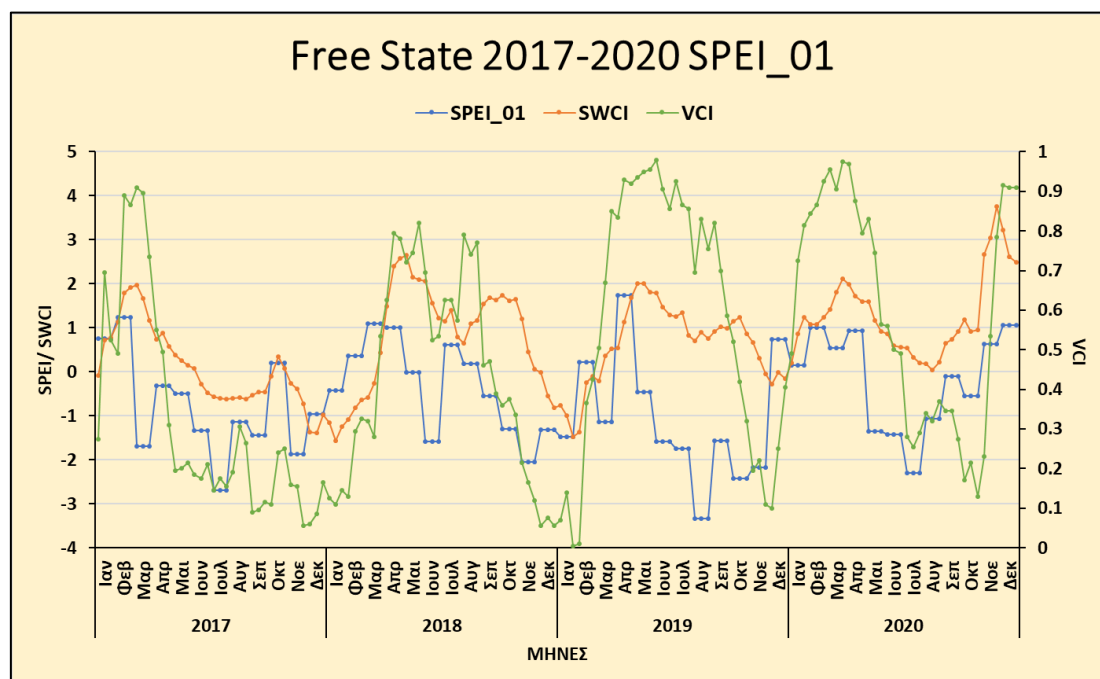
του Eastern Cape. Όλοι οι δείκτες παρουσιάζουν έντονα πτωτική πορεία περιγράφοντας συνθήκες ακραίας ξηρασίας και πολύ κακών συνθηκών βλάστησης. Ταυτόχρονα, επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι, και οι πέντε δείκτες ξηρασίας που αναλύθηκαν εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές στο σύνολο της χρονοσειράς (2017-2020) την περίοδο αυτή (Ιούλιος – Δεκέμβριος 2019). Οι τιμές αυτές εμφανίζονται τον Αύγουστο του 2019 στους δείκτες SPEI_1 ($\text{SPEI}_{1\text{AUG}} < -2$) και SPEI_3 ($\text{SPEI}_{3\text{AUG}} < -3$), τον Οκτώβριο στον δείκτη SPEI_12 ($\text{SPEI}_{12\text{OCT}} < -3$) και τον Νοέμβριο στους δείκτες SWCI ($\text{SWCI}_{\text{NOV}} < -1$) και VCI ($\text{VCI}_{\text{NOV}} < 0.1$). Και στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι δείκτες που περιγράφουν την γεωργική και την υδρολογική ξηρασία (VCI & SWCI) εμφανίζουν χρονική καθυστέρηση απόκρισης στις τιμές τους σε σχέση με τους μετεωρολογικούς δείκτες, κάτι που εντοπίστηκε και σε άλλα σημεία της ανάλυσης.

Free State: Όπως στο Eastern Cape, έτσι και στα κεντρικά της χώρας (Free State) παρατηρείται αύξηση των τιμών των δεικτών ξηρασίας από το μισό και κυρίως στο τέλος της υγρής περιόδου (JFM). Ο δείκτης SPEI_1 (Σχήμα 3.43) εντοπίζει την καθυστερημένη έναρξη των βροχοπτώσεων τον Φεβρουάριο και συνεχίζει την ανοδική του πορεία και τον Μάρτιο περιγράφοντας τον μήνα αυτό ως πολύ υγρό ($\text{SPEI}_{1\text{MAR}} > 1.5$). Ανοδικά κινούμενος εμφανίζεται και ο δείκτης SWCI, από το τελευταίο δεκαήμερο του Ιανουαρίου έως και τον Μάιο του 2019, μεταβάλλοντας τον χαρακτηρισμό των συνθηκών από ξηρές σε υγρές ($\text{SWCI}_{\text{JAN}} < -1 \rightarrow \text{SWCI}_{\text{MAY}} \sim 2$). Την ίδια ανοδική πορεία, και σε πλήρη χρονική συμφωνία με τον SWCI, παρουσιάζει και ο δείκτης VCI, όπου από τις πολύ κακές συνθήκες βλάστησης στις αρχές της περιόδου ($\text{VCI}_{\text{JAN}} \sim 0$) μεταβαίνει σε τιμές που περιγράφουν τις συνθήκες ως κανονικές στο τέλος αυτής ($\text{VCI}_{\text{MAY}} \sim 1$).

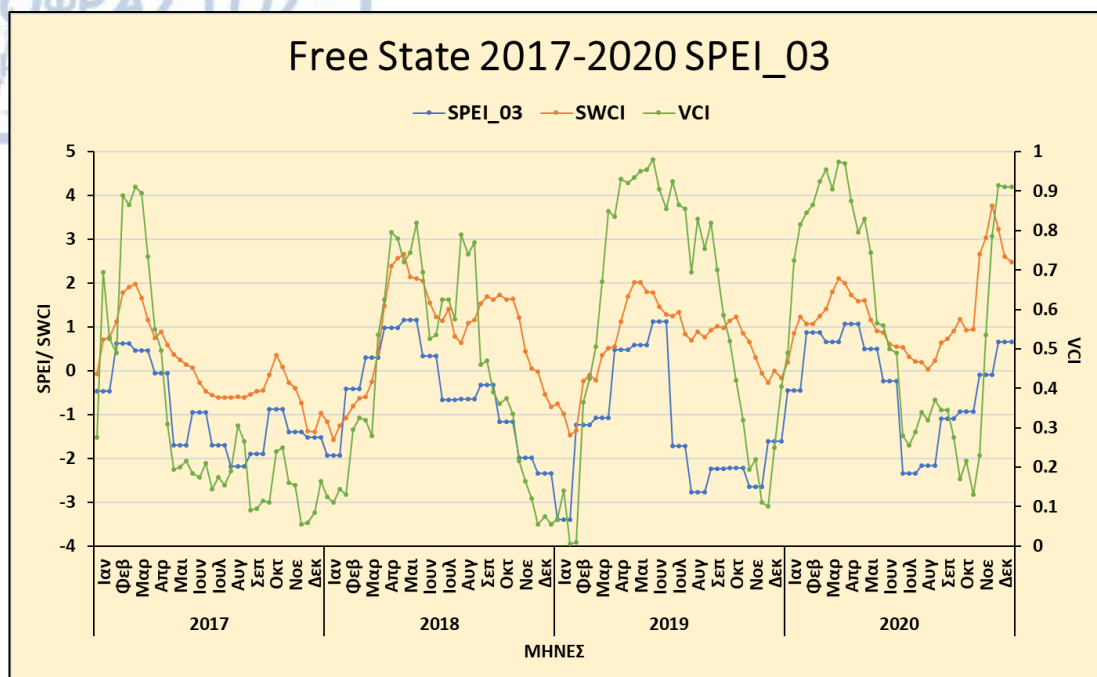
Μεταστροφή και ανοδική πορεία, εμφανίζει και ο δείκτης SPEI_3 (Σχήμα 3.44) τον Φεβρουάριο του 2019, ταυτιζόμενος έτσι με τον SPEI_1, για την περίοδο εμφάνισης υετικών επεισοδίων στην περιοχή της Free State. Ο SPEI_3, διαφοροποιείται σε σχέση με τον SPEI_1, ως προς τον χρόνο λήξης της υγρής περιόδου, καθώς τον Ιούνιο παρατηρείται στον δείκτη μεταστροφή της πορείας του σε αρνητική (περισσότερη συμφωνία του SPEI_3 με τους δείκτες VCI και SWCI για την διάρκεια και την λήξη της υγρής περιόδου). Επισημαίνεται ότι στο πρώτο μισό του 2019 υπάρχει και ποσοτική συμφωνία του SPEI_3 με τους άλλους δείκτες (εξαιρείται ο SPEI_12 όπως θα αναλυθεί αμέσως μετά) καθώς οι περιγραφόμενες από

το δείκτη ως ακραίες συνθήκες ξηρασίας του Ιανουάριου ($SPEI_{3JAN} < -3$) μεταβάλλονται σε υγρές ($SPEI_{3JUN} > 1$).

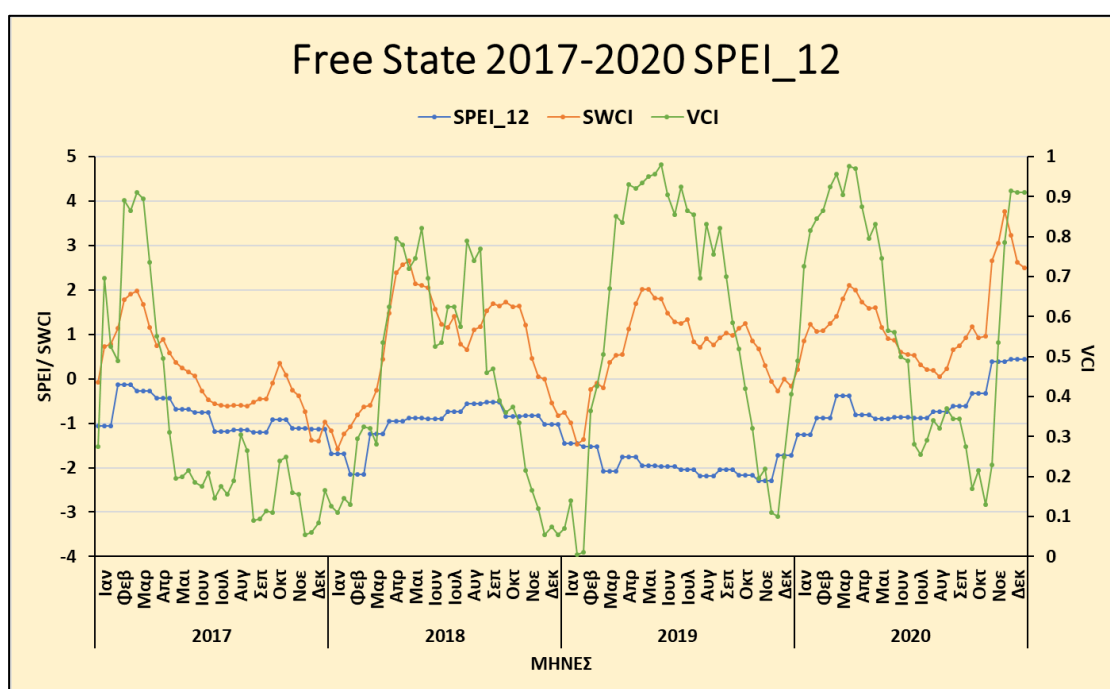
Αντίθετα, ο δείκτης $SPEI_{12}$ εμφανίζει τελείως διαφορετική εικόνα (Σχήμα 3.45) σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες ξηρασίας, παρουσιάζοντας ελαφριά πτώση σε όλο το πρώτο εξάμηνο του 2019 (εξαιρείται ο Απρίλιος), με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται η περιοχή από σημαντική ξηρασία την περίοδο αυτή ($SPEI_{12} < -1.5$).



Σχήμα 3.43. Απεικόνιση των δεικτών $SPEI_1$, $SWCI$ και VCI στην περιοχή του Free State (κεντρικά) για την περίοδο 2017-2020.

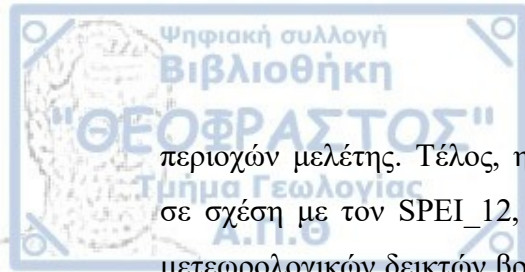


Σχήμα 3.44. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Free State (κεντρικά) για την περίοδο 2017-2020.



Σχήμα 3.45. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Free State (κεντρικά) για την περίοδο 2017-2020.

Τονίζεται όμως στο σημείο αυτό ότι ο δείκτης υπολογίζει την ξηρασία σε βάθος δωδεκαμήνου και ότι το 2018 η Free State, καθώς και οι υπόλοιπες κεντρικές περιοχές της χώρας, εμφάνισαν, σύμφωνα με την ανάλυση των δεικτών στην παρούσα εργασία, την μεγαλύτερη σε διάρκεια και ένταση ξηρασία στο σύνολο των

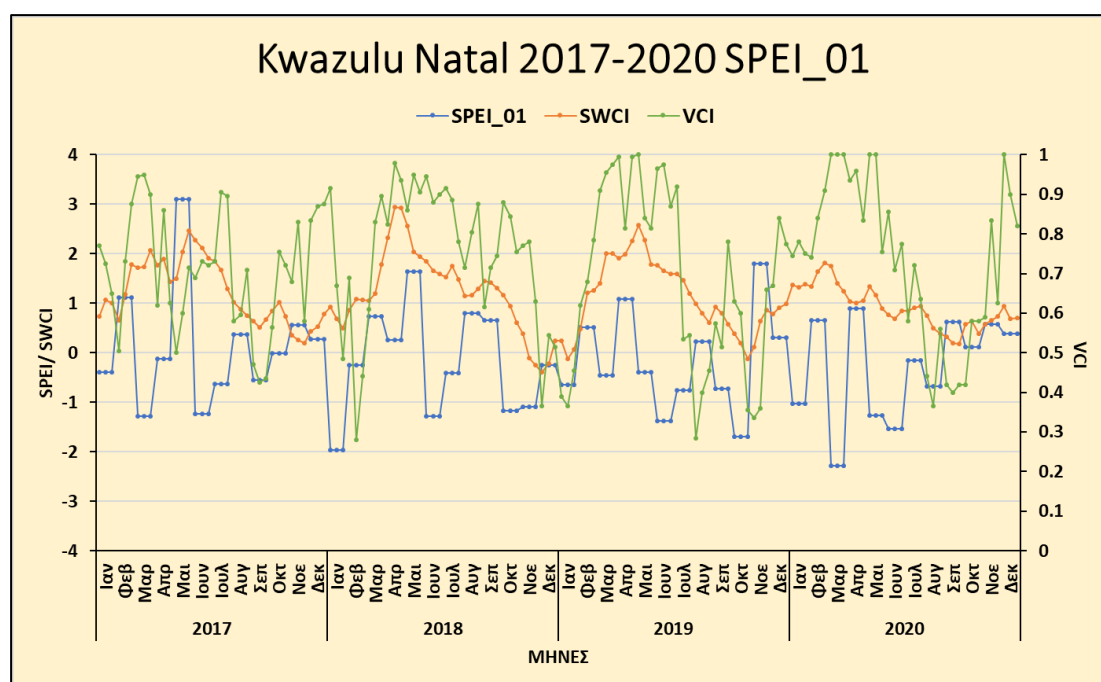


περιοχών μελέτης. Τέλος, η συγκεκριμένη διαφοροποίηση των υπόλοιπων δεικτών, σε σχέση με τον SPEI_12, μπορεί να ερμηνεύσει την πιθανή υπερευαισθησία των μετεωρολογικών δεικτών βραχείας περιόδου (SPEI_1 & SPEI_3) σε υετικά επεισόδια ήσσονος σημασίας, που δεν μεταβάλουν στην πραγματικότητα τις ξηρικές συνθήκες που διάγουν μια περιοχή, μετά από ένα προγενέστερο έντονο επεισόδιο ξηρασίας, αλλά και την εποχιακή μεταβλητότητα της περιοχής που φαίνεται να επηρεάζει τους δείκτες που βασίζονται στην βλάστηση και στο έδαφος για τον υπολογισμό της ξηρασίας (VCI & SWCI). Από την άλλη όμως είναι πιθανό και οι μετεωρολογικοί δείκτες μακρών περιόδων (SPEI_12 κτλ.) να εμφανίζουν μια αδυναμία απόκρισης τόσο στην εποχικότητα όσο και στην μεταβλητότητα μεταξύ των κλιματικά υγρών και ξηρών περιόδων, καθιστώντας τους προβληματικά εργαλεία σε επιχειρησιακά πεδία που σχετίζονται με έγκαιρες προειδοποιήσεις έναρξης και λήξης της ξηρασίας σε μια περιοχή.

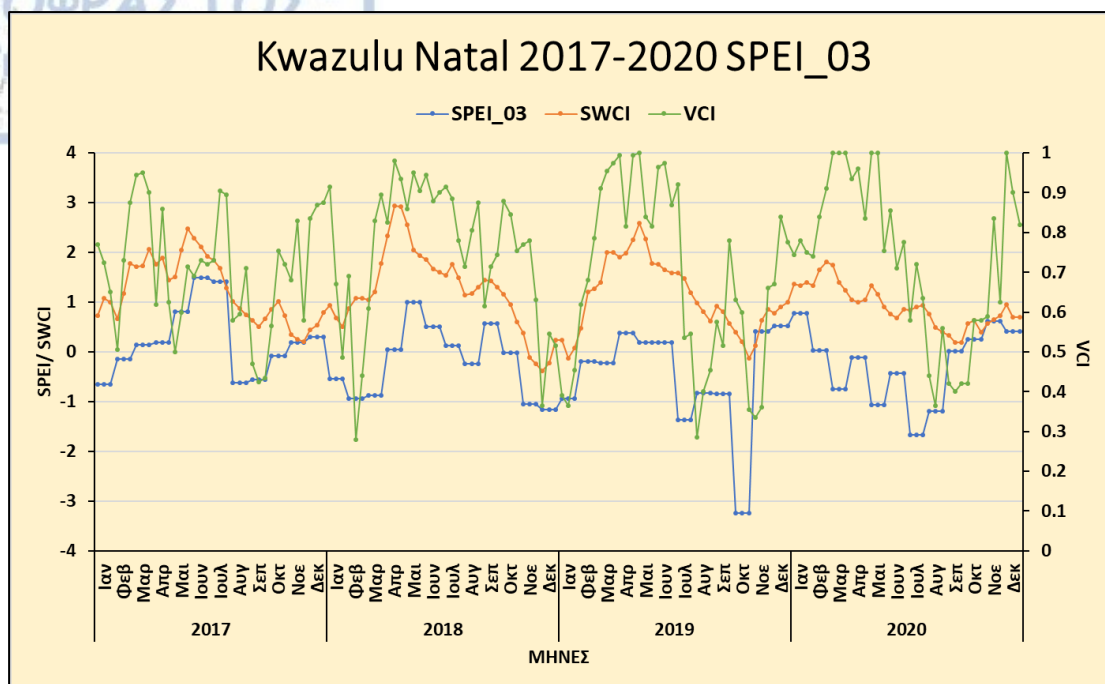
Όσον αφορά την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας για την περιοχή Free State το δεύτερο μισό του 2019, παρατηρείται συμφωνία των δεικτών καθώς στο σύνολό τους εμφανίζονται πτωτικοί, μεταβαίνοντας οι περισσότεροι ($SPEI_{1AUG}$, $SPEI_{3AUG}$ και $SPEI_{12AUG} < -2$, $VCI_{NOV,DEC} < 0.3$) σε τιμές που περιγράφουν συνθήκες εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας και πολύ κακής βλάστησης. Εξαίρεση αποτελεί ο δείκτης SWCI όπου παρά την πτωτική του πορεία από τον Ιούνιο του 2019 ποσοτικά η πτώση αυτή είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες, παραμένοντας σε θετικές τιμές έως και τον Νοέμβριο, οι οποίες περιγράφουν ως προς τις συνθήκες ξηρασίας την περίοδο κανονική (Σχήματα 3.55 -3.58). Και σε αυτή την περίπτωση η συμπεριφορά του δείκτη SWCI φανερώνει την ικανότητα απεικόνισης των εποχιακών χαρακτηριστικών της περιοχής (έναρξη ξηρής περιόδου τον χειμώνα) η οποία είναι αναμενόμενη, έως ένα βαθμό, για ένα δείκτη που σκοπό έχει την απεικόνιση της εδαφικής κατάστασης σε μια περιοχή και της υδρολογικής ξηρασίας.

Τέλος, και οι πέντε δείκτες το 2019 εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές τους στο σύνολο της χρονοσειράς (2017-2020) για την συγκεκριμένη επαρχία. Οι δείκτες SPEI_3, SWCI και VCI παρουσιάζουν αυτή την τιμή τον Ιανουάριο (αναφέρθηκε ήδη σε άλλα σημεία της ανάλυσης η διάρκεια και η ένταση της ξηρασίας του τελευταίου τριμήνου του 2018 για τις κεντρικές περιοχές της Ν. Αφρικής) και οι δείκτες SPEI_1 και SPEI_12 τον Αύγουστο και τον Νοέμβριο αντίστοιχα, τονίζοντας την ένταση και την διάρκεια του νέου επεισοδίου ξηρασίας για την περιοχή του Free State το τελευταίο εξάμηνο του 2019.

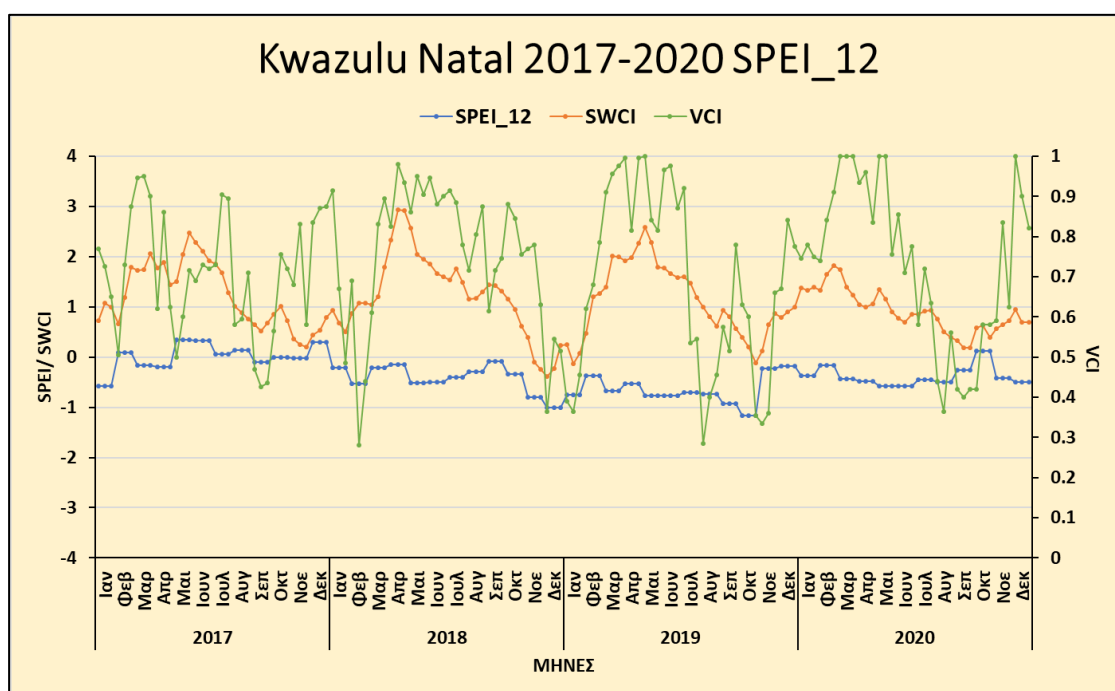
Limpopo και KwaZulu Natal: Στην εισαγωγή της εργασίας, παρουσιάζοντας την χωρική κατανομή του μέσου ετήσιου υετού για την Ν. Αφρική, αναφέρθηκε ότι οι ανατολικές περιοχές είναι οι πιο υγρές της χώρας με μέσο ετήσιο υετό πάνω από 1000mm. Ταυτόχρονα, η ποσοτική ανάλυση των δεικτών (Ενότητα 3.4) έδειξε ότι το 2019 σε αυτές τις περιοχές (Limpopo και KwaZulu Natal) σε πολλούς δείκτες εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές, τόσο στις μέγιστες όσο και στις ελάχιστες. Συγκεκριμένα, οι SPEI_3 και SPEI_12 παρουσιάζουν την προαναφερθείσα εικόνα και στις δύο επαρχίες και ο SWCI στην επαρχία του Limpopo. Τα ευρήματα της ποσοτικής ανάλυσης, στις περιοχές αυτές για το 2019 κρίνεται απαραίτητο να τονιστούν πριν την χρονική ανάλυση των δεικτών, καθώς ήδη έχει εντοπιστεί το επεισόδιο ξηρασίας του τελευταίου τριμήνου του 2018 για τα βόρεια και ανατολικά της Ν. Αφρικής, και η εμφάνιση ανοδικών τάσεων στους δείκτες ξηρασίας στο πρώτο τρίμηνο του 2019 κατά την διάρκεια της υγρής περιόδου για τις αναφερόμενες επαρχίες μπορεί να παρερμηνευτεί.



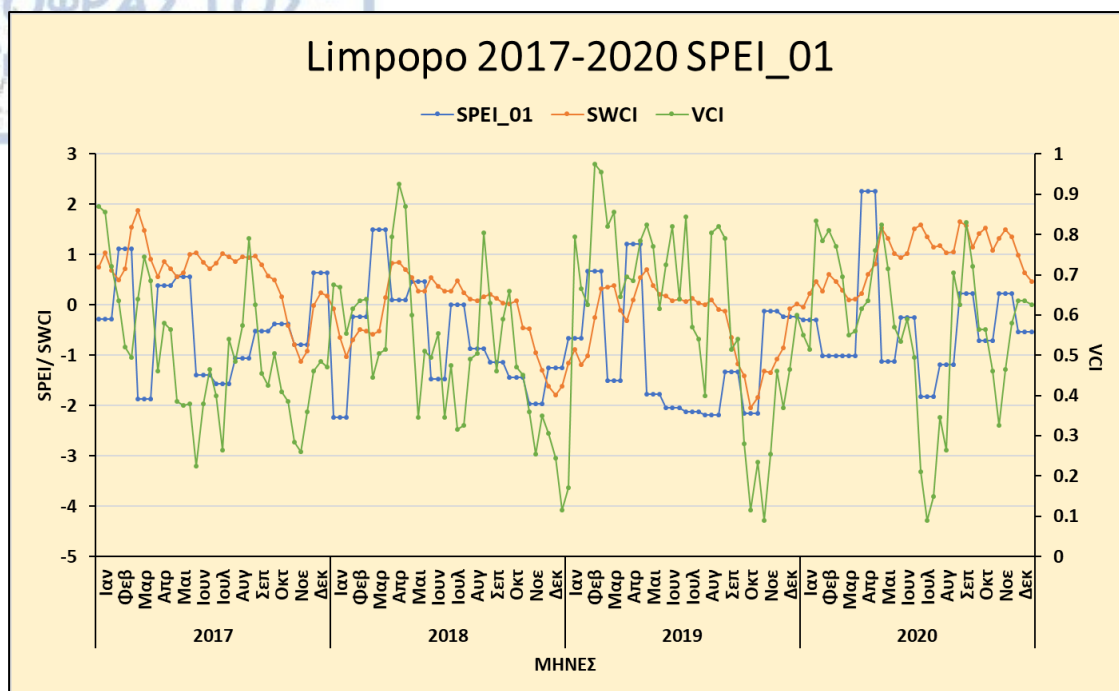
Σχήμα 3.46. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του KwaZulu Natal (ανατολικά) για την περίοδο 2017-2020.



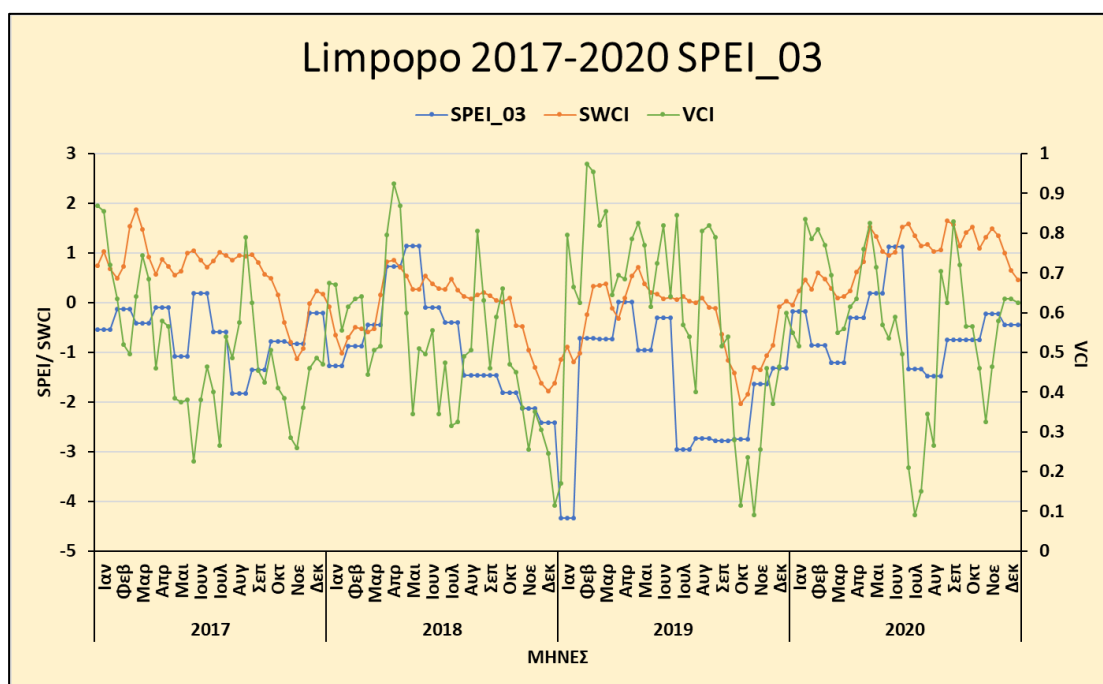
Σχήμα 3.47. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του KwaZulu Natal (ανατολικά) για την περίοδο 2017-2020.



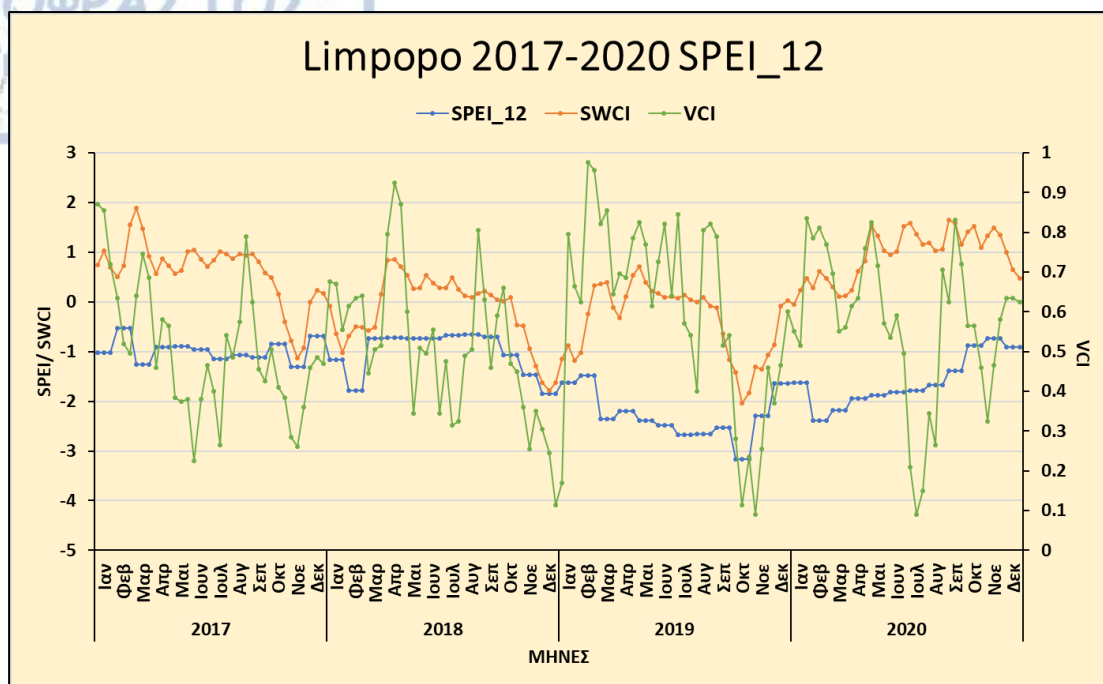
Σχήμα 3.48. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του KwaZulu Natal (ανατολικά) για την περίοδο 2017-2020.



Σχήμα 3.49. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Limpopo (βορειοανατολικά) για την περίοδο 2017-2020.



Σχήμα 3.50. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Limpopo (βορειοανατολικά) για την περίοδο 2017-2020.



Σχήμα 3.51. Απεικόνιση των δεικτών SPEI₁₂, SWCI και VCI στην περιοχή του Limpopo (βορειοανατολικά) για την περίοδο 2017-2020.

Οι μεταβολές για το σύνολο των δεικτών ξηρασίας (Σχήματα 3.46 – 3.51) δείχνει να είναι πράγματι ανοδικές στην επαρχία KwaZulu Natal μέχρι και τον Απρίλιο του 2019, και για την πλειοψηφία των δεικτών (εξαιρέση ο SPEI₁₂) για την επαρχία του Limpopo.

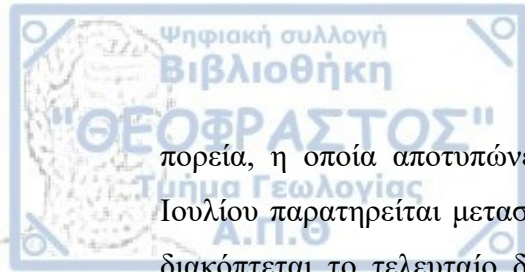
Με οδηγό όμως τον δείκτη SPEI₁₂ που παρουσιάζει πτωτική πορεία και στις δύο επαρχίες για όλο το 2019 και ταυτόχρονα την ποσοτική ανάλυση, που η πλειοψηφία των δεικτών εμφανίζει τις χαμηλότερες μέγιστες τιμές του 2019 για το σύνολο της χρονοσειράς (2017-2020), αυτή η υγρή περίοδος φαίνεται να μην ήταν επαρκής για να καλύψει το υετικό έλλειμμα της προηγούμενης ξηρασίας που απασχόλησε τις επαρχίες Limpopo και KwaZulu Natal. Θετικό των δεικτών είναι ότι η παραπάνω διαπίστωση έρχεται σε συμφωνία με τις προηγούμενες αναλύσεις, ότι δηλαδή μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας μακροχρόνιων περιόδων (SPEI₃ & SPEI₁₂) και κυρίως ο εδαφολογικός δείκτης (SWCI) μπορούν να συνυπολογίσουν τις επιπτώσεις ενός προγενέστερου έντονου επεισοδίου ξηρασίας κατά την διάρκεια μια υγρής περιόδου. Αντίστοιχα, ο μετεωρολογικός δείκτης βραχείας περιόδου και ο δείκτης που υπολογίζει τις συνθήκες ξηρασίας από την υφιστάμενη κατάσταση της βλάστησης (SPEI₁ & VCI) μπορούν να εμφανίσουν άμεσα τις όποιες πιθανές μεταβολές στις συνθήκες που επηρεάζουν την ξηρασία. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση για την Ν. Αφρική και από τις αναφορές για την περίοδο αυτή, στις



βορειοανατολικές και ανατολικές επαρχίες της χώρας διαπιστώνεται ότι υπήρξαν έντονες πλημμύρες στις περιοχές αυτές από τυφώνες που έπληξαν την Ν. Αφρική, κυρίως τον Απρίλιο. Οπότε οι δείκτες SPEI_3 και SPEI_12 συνυπολογίζοντας τις ξηρικές συνθήκες των προηγούμενων μηνών εμφανίζουν αδυναμία απεικόνισης αυτής της έντονα υγρής περιόδου που περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά οι υπόλοιποι δείκτες.

Όσον αφορά τις μεταβολές των δεικτών ξηρασίας για τους υπόλοιπους μήνες του 2019, στην επαρχία KwaZulu Natal ο SPEI_1 εμφανίζει πτωτική πορεία το δίμηνο Μαΐου - Ιουνίου, η οποία εντοπίζεται και στους δείκτες SWCI και VCI με μικρή χρονική καθυστέρηση, το τελευταίο δεκαήμερο του Μαΐου και τον Ιούνιο. Η πτώση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του χαρακτηρισμού της περιόδου από υγρή ($SPEI_{1APR} > 1$) σε περίοδο με μέτρια ξηρασία ($SPEI_{1JUN} < -1$) ενώ στους υπόλοιπους δείκτες δε υπάρχει μετάβαση σε διαφορετικό μοτίβο καθώς και οι δύο δείκτες περιγράφουν το δίμηνο αυτό με επαρκείς συνθήκες εδαφικής υγρασίας ($SWCI > 1$) και κανονικής βλάστησης ($VCI > 0.7$). Αντίθετα την ίδια περίοδο οι δείκτες SPEI_3 και SPEI_12, παρουσιάζονται αμετάβλητοι στις τιμές τους, οι οποίες παραπέμπουν σε κανονικές συνθήκες για την περιοχή ($SPEI_3 \sim 0$ & $SPEI_{12} > -1$). Από τον Ιούλιο και μετά οι δείκτες στην πλειοψηφία τους εμφανίζουν πτώση στις τιμές τους με αποτέλεσμα τον Οκτώβριο του ίδιου έτους να εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές της τετραετίας μελέτης (2017-2020) σε πολλούς δείκτες, όπως αναφέρεται και στην συνέχεια στην ποσοτική ανάλυση των δεικτών ($SPEI_{3OCT} < -3$, $SPEI_{12OCT} < -1$). Ταυτόχρονα, τον ίδιο μήνα ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζει την δεύτερη χαμηλότερη τιμή του στο σύνολο της χρονοσειράς ($SPEI_1 < -1.5$) και ο δείκτης SWCI έχει αρνητική τιμή, για δεύτερη και τελευταία φορά στα τέσσερα έτη μελέτης μετά τον Οκτώβριο του 2018 στην συγκεκριμένη επαρχία. Μεγάλη είναι η πτώση κατά το δεύτερο μισό του 2019 και για τον δείκτη VCI για τα ανατολικά της Ν. Αφρικής, καθώς από τιμές που περιγράφουν κανονικές συνθήκες βλάστησης στις αρχές του Ιουλίου ($VCI_{JUL} \sim 0.9$), εμφανίζει τιμές που αναφέρουν κακές συνθήκες βλάστησης τον Οκτώβριο ($VCI_{OCT} \sim 0.4$).

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι οι πτωτικές διακυμάνσεις των δεικτών που περιγράφονται για την περίοδο αυτή (Απρίλιος - Οκτώβριος 2019) δεν είναι συνεχείς και υπάρχουν εναλλαγές μοτίβων το διάστημα αυτό από πολλούς δείκτες. Συγκεκριμένα ο δείκτης SPEI_1 το δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου εμφανίζει ανοδική



πορεία, η οποία αποτυπώνεται και στον δείκτη SPEI_3 τον Αύγουστο. Στα τέλη Ιουλίου παρατηρείται μεταστροφή της κύμανσης σε ανοδική και στον VCI, η οποία διακόπτεται το τελευταίο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου. Τέλος, ο SWCI εμφανίζει στιγμιαία αυτή την άνοδο στην τιμή το τελευταίο δεκαήμερο του Αυγούστου. Και σε αυτή την περίπτωση, ο βραχυπρόθεσμος μετεωρολογικός δείκτης (SPEI_1) εντόπισε πρώτος μεταστροφή των συνθηκών που επηρεάζουν την ξηρασία σε μια περιοχή, την οποία εμφανίζει σε μικρότερο βαθμό και ο μεσοπρόθεσμος μετεωρολογικός δείκτης (SPEI_3) αλλά και οι δείκτες που περιγράφουν τις συνθήκες εδάφους και βλάστησης (SWCI & VCI, αντίστοιχα), με την αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση λόγω της φύσης των δεικτών. Αντίθετα, ο δείκτης SPEI_12 (μακροχρόνιος μετεωρολογικός δείκτης) και στην περίπτωση αυτή παραμένει ανεπηρέαστος.

Κλείνοντας την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας, για την επαρχία KwaZulu Natal, το τελευταίο δίμηνο του 2019 όλοι εμφανίζονται ανοδικοί θέτοντας την ταυτόχρονη λήξη του επεισοδίου ξηρασίας και την έναρξη της υγρής περιόδου για το καλοκαίρι 2019-2020 (DJF) στην αναμενόμενη, κλιματολογικά, χρονική στιγμή για την περιοχή (Σχήματα 3.57 - 3.58).

Παρόμοιο, με την KwaZulu εμφανίζεται το μοτίβο των μεταβολών των δεικτών ξηρασίας από τον Απρίλιο έως τον Δεκέμβριο του 2019 και στο Limpopo. Αναλυτικότερα, ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζει μεταστροφή της πορείας σε έντονα πτωτική τον Μάιο, και από τις υγρές συνθήκες του Απριλίου ($\text{SPEI}_{1\text{APR}} > 1$) περιγράφει συνθήκες σημαντικής ξηρασίας τον Μάιο ($\text{SPEI}_{1\text{MAY}} < -1.5$) και εξαιρετικά ακραία ξηρασία όλο το χειμώνα του 2019 ($\text{SPEI}_{1\text{JJA}} < -2$). Έτσι, η επαρχία του Limpopo δεν φαίνεται να επηρεάστηκε από σημαντικά ποσά νετού που να περιορίσουν την ξηρασία τον χειμώνα του 2019, όπως έδειξε ο αντίστοιχος δείκτης και για τα ανατολικά της χώρας (KwaZulu Natal). Αντίστοιχα, τον Οκτώβριο ο SPEI_1 παρουσιάζει την χαμηλότερη τιμή για όλη την εξεταζόμενη από την ανάλυση τετραετία (2017-2020), εμφανίζοντας έτσι το μήνα αυτό ως τον ξηρότερο όχι μόνο στις ανατολικές αλλά και στις βορειοανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής.

Ο SPEI_3 από την άλλη, για το 2019 εμφανίζει μεγαλύτερη συμφωνία (σε σχέση με το SPEI_1) στις δύο περιοχές (Limpopo, KwaZulu Natal), καθώς κινείται έντονα πτωτικά από τον Ιούλιο και παραμένει αμετάβλητος έως και τον Οκτώβριο, περιγράφοντας συνθήκες έντονης ξηρασίας για τα βορειοανατολικά της χώρας το διάστημα αυτό. Τονίζεται ότι και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές που εμφανίζει ο SPEI_3 είναι οι χαμηλότερες καταγεγραμμένες τιμές του δείκτη για το σύνολο της

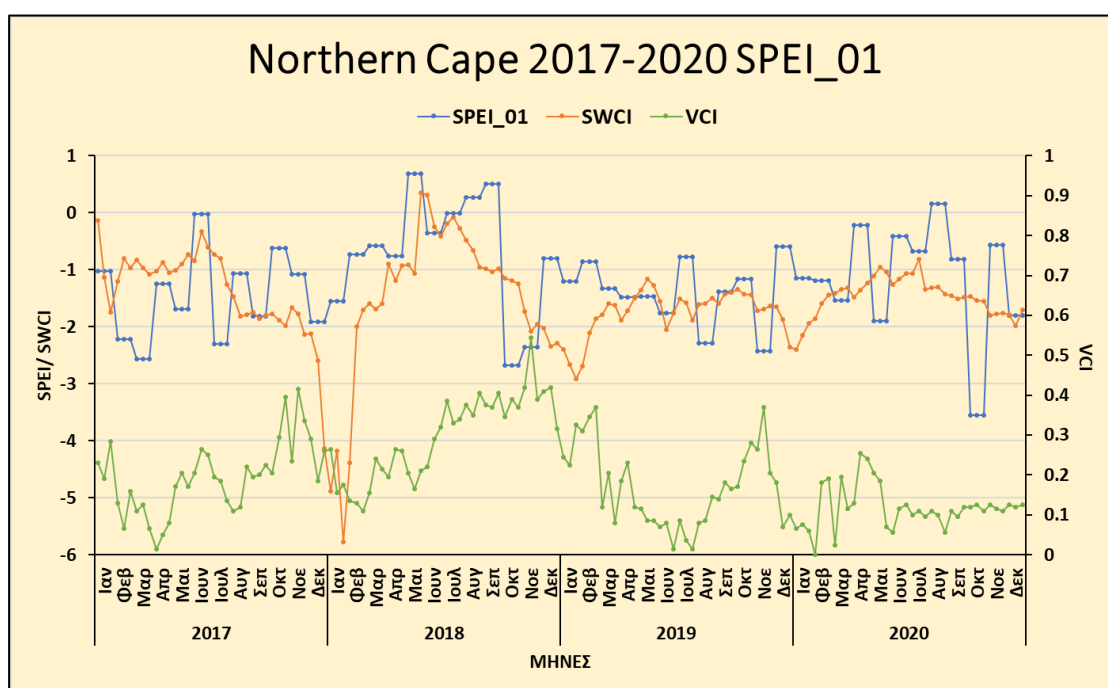
χρονοσειράς μελέτης (2017-2020), μετά τον Ιανουάριο του ίδιου έτους. Σε αρνητικές τιμές, που παραπέμπουν σε συνθήκες εξαιρετικά ακραίας ξηρασίας για την περιοχή του Limpopo, κινείται και ο SPEI₁₂ από τον Μάρτιο έως και τον Οκτώβριο του 2019 ($\text{SPEI}_{12} < -2$) χωρίς να παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις, καταγράφοντας όμως και αυτός τον Οκτώβριο του 2019 την χαμηλότερη τιμή στο σύνολο της τετραετίας (2017-2020).

Ο δείκτης SWCI στην επαρχία του Limpopo, για την αντίστοιχη περίοδο του 2019, εμφανίζει σταθερές τιμές καθ' όλη την διάρκεια της ψυχρής περιόδου ($\text{SPEI}_{\text{JJA}} \sim 0$), περιγράφοντας τις συνθήκες ως κανονικές για την περιοχή, ενώ στην συνέχεια το δίμηνο Σεπτεμβρίου - Οκτωβρίου παρουσιάζει σημαντική πτώση μεταβαίνοντας σε αρνητικές τιμές, με αποτέλεσμα οι μήνες αυτοί να εμφανίζονται ως ξηροί. Ο μειωμένος βαθμός απόκρισης του SWCI όταν μια περιοχή εμφανίζει ξηρότερες συνθήκες κατά την διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους εμφανίζεται και στην περίπτωση αυτή.

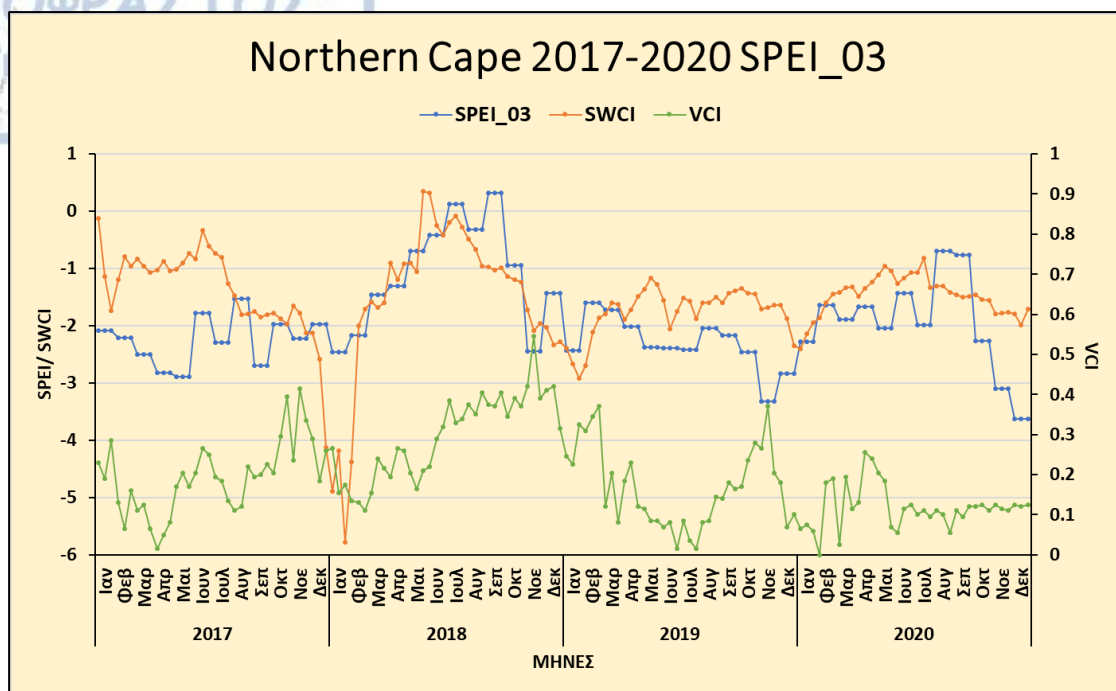
Αντίθετη είναι η συμπεριφορά του δείκτη VCI, σε σχέση με τον SWCI, ο οποίος κατά την διάρκεια της ψυχρής περιόδου (JJA) εμφανίζει έντονες μεταβολές που δεν συνάγουν με τις, κατά κανόνα, σταθεροποιητικές τάσεις των υπόλοιπων δεικτών. Στην περίπτωση του VCI πρέπει να εξεταστεί μια πιθανή υπερευαισθησία του δείκτη κατά την ψυχρή περίοδο σε γεγονότα που επί της ουσίας δεν μεταβάλλουν τις συνθήκες ξηρασίας σε μια περιοχή, αλλά επηρεάζουν έντονα τα προβαλλόμενα αποτελέσματα του δείκτη. Ένα ακόμη στοιχείο από την ανάλυση που μπορεί να αποτελέσει μια πιθανή απόδειξη του ισχυρισμού περί ευαισθησίας του VCI κατά την διάρκεια του χειμώνα είναι η συμπεριφορά του δείκτη και η σύγκριση του με τον SPEI₁, για το δίμηνο Αυγούστου - Σεπτεμβρίου. Ο SPEI₁ είναι ο μόνος δείκτης που εμφανίζει μια μικρή άνοδο στις τιμές του το δίμηνο αυτό και έρχεται σε συμφωνία με τον VCI. Έχοντας επισημάνει ήδη την ικανότητα του SPEI₁ να εντοπίζει ευκολότερα μεταβολές στα μοτίβα της ξηρασίας, η μεγάλη άνοδος που εμφανίζει ο VCI το τελευταίο δεκαήμερο του Αυγούστου μπορεί να ερμηνευτεί έως ένα βαθμό. Η υπερευαισθησία του VCI έγκειται στην ποσοτική μεταβολή του, καθώς ενώ ο δείκτης SPEI₁, με την άνοδο του αυτή, μεταβάλλει τον χαρακτηρισμό των συνθηκών του Αυγούστου από ακραία ($\text{SPEI}_{1\text{AUG}} < -2$) σε μέτρια ξηρασία τον Σεπτέμβριο ($\text{SPEI}_{1\text{SEP}} < -1$), ο VCI μεταβάλλει τον χαρακτηρισμό των συνθηκών της βλάστησης από κακές τον Αύγουστο ($\text{VCI}_{\text{AUG}} \sim 0.4$) σε κανονικές τον Σεπτέμβριο ($\text{VCI}_{\text{SEP}} \sim 0.8$). Ταυτόχρονα όμως, πρέπει να τονιστεί ότι η συμπεριφορά

αυτή του δείκτη VCI εμφανίζεται μόνο τον χειμώνα, διάστημα που κατά κανόνα δεν αποτελεί μέρος της καλλιεργητικής περιόδου για τις περισσότερες καλλιέργειες, και ότι το μεγαλύτερο μέρος των φυτών έχουν αποβάλει το φύλλωμα τους την περίοδο αυτή. Στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα, πάντως, και ήδη από το δεύτερο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου και ο δείκτης VCI εμφανίζεται έντονα πτωτικός με αποτέλεσμα τον Οκτώβριο του 2019 να παρουσιάζει και αυτός την χαμηλότερη καταγεγραμμένη τιμή στο σύνολο της χρονοσειράς (2017-2020). Το σύνολο των δεικτών ξηρασίας, όπως και στην επαρχία του KwaZulu Natal, εμφανίζει το τελευταίο δίμηνο του 2019 (Νοέμβριος - Δεκέμβριος) σημαντική άνοδο σηματοδοτώντας την λήξη του έντονου επεισοδίου ξηρασίας με την έναρξη της υγρής περιόδου, για τα ανατολικά και βορειοανατολικά της Ν. Αφρικής.

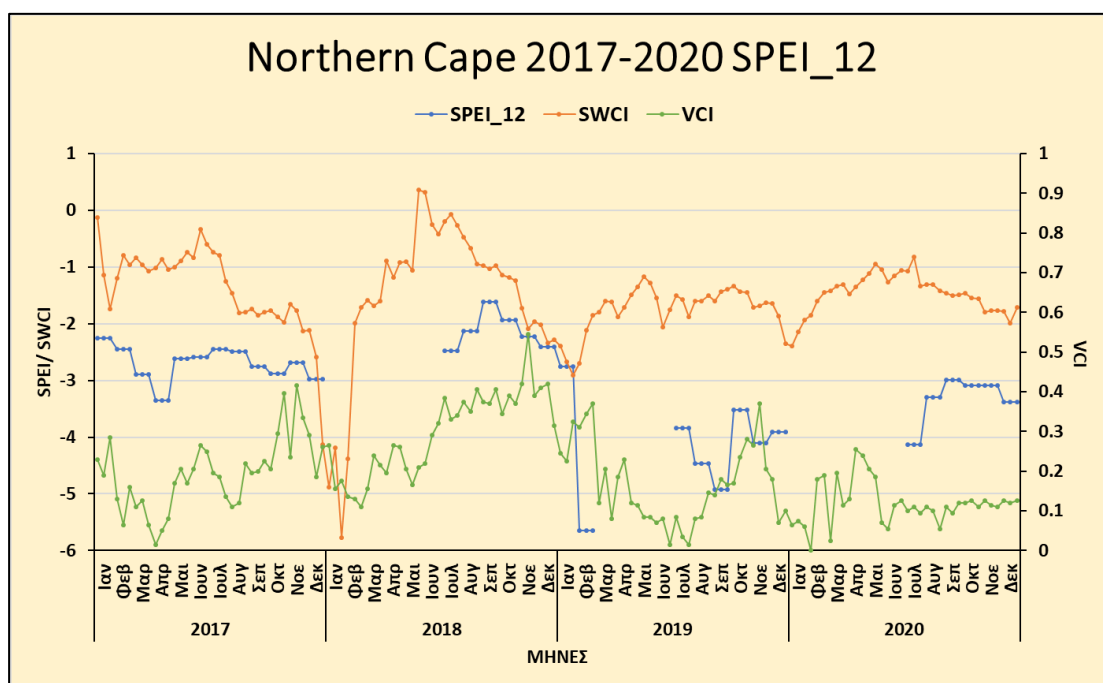
Northern Cape: Κλείνοντας την ανάλυση των δεικτών ξηρασίας για την Ν. Αφρική, κατά το 2019 με την επαρχία του Northern Cape, παρατηρείται (Σχήματα 3.52 – 3.54 και 3.55 - 3.58) ότι οι βορειοδυτικές περιοχές της χώρας δεν καταφέρνουν να ανακάμψουν από το έντονο επεισόδιο ξηρασίας που ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2019.



Σχήμα 3.52. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1, SWCI και VCI στην περιοχή του Northern Cape (βορειοδυτικά) για την περίοδο 2017-2020.

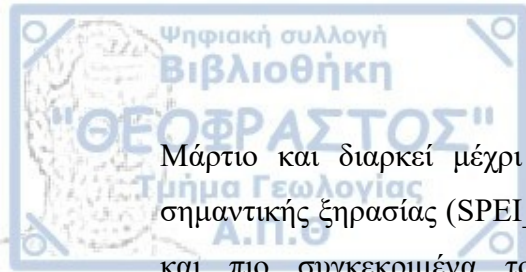


Σχήμα 3.53. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_3, SWCI και VCI στην περιοχή του Northern Cape (βορειοδυτικά) για την περίοδο 2017-2020.



Σχήμα 3.54. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_12, SWCI και VCI στην περιοχή του Northern Cape (βορειοδυτικά) για την περίοδο 2017-2020.

Ο δείκτης SPEI_1 από τον Δεκέμβριο του 2018 εμφανίζει ανοδική πορεία, η οποία μεταβάλλει τον χαρακτηρισμό των συνθηκών ξηρασίας για την περιοχή από ακραίες τον Νοέμβριο του 2018 ($SPEI_1 < -2$), σε μέτριες στα μέσα της υγρής περιόδου ($SPEI_1_{FEB} > -1$). Η μεταβολή της πορείας του σε αρνητική ξεκινά από τον



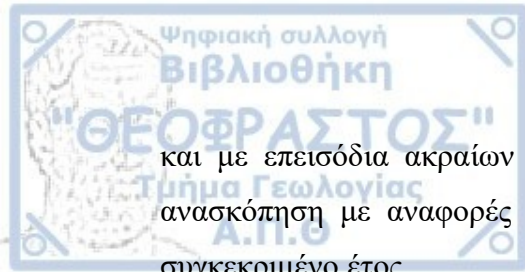
Μάρτιο και διαρκεί μέχρι τον Ιούνιο με αποτέλεσμα την εμφάνιση συνθηκών σημαντικής ξηρασίας ($SPEI_{1JUN} < -1.5$), ενώ κατά την διάρκεια της ξηρής περιόδου, και πιο συγκεκριμένα τον Ιούλιο, ο δείκτης κινείται πρόσκαιρα ανοδικά, περιγράφοντας κανονικές συνθήκες για την περιοχή. Τον Αύγουστο όμως επανέρχονται οι ακραίες συνθήκες ξηρασίας, σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη, οι οποίες επανεμφανίζονται μετά από μια μικρή βελτίωση των τιμών του $SPEI_1$ και τον Νοέμβριο ($SPEI_{1NOV} < -2$).

Η ανοδική πορεία του $SPEI_1$ που εντοπίστηκε για το πρώτο δίμηνο του 2019, εμφανίζεται και στο $SPEI_3$ με την διαφοροποίηση ότι ο συγκεκριμένος δείκτης συνεχίζει να περιγράφει την περίοδο αυτή ως σημαντικά ή και ακραία ξηρή. Στην συνέχεια του 2019 ο $SPEI_3$ κινείται πτωτικά, από τον Μάρτιο έως τον Νοέμβριο, περιγράφοντας τις συνθήκες ξηρασίας ως εξαιρετικά ακραίες για το μεγαλύτερο αυτό διάστημα. Παρά την έλλειψη αρκετών τιμών του $SPEI_{12}$ για το 2019 η υψηλότερη τιμή που εμφανίζει ο δείκτης είναι τον Ιανουάριο του 2019 ($SPEI_{12JAN} \sim -3$) χαρακτηρίζοντας έτσι το έτος ακραία ξηρό στο σύνολό του.

Από την Ιανουάριο έως τον Μάιο ανοδικά κινείται και ο δείκτης SWCI ερχόμενος σε συμφωνία με τους δείκτες $SPEI_1$ και $SPEI_3$ για το πρώτο μισό του 2019. Η χρονική καθυστέρηση στην απεικόνιση αυτής την ανόδου από τον SWCI, σε σχέση με τους $SPEI_1$ και $SPEI_3$, έχει εντοπιστεί και έχει αναλυθεί και σε άλλες περιπτώσεις στην παρούσα εργασία. Πέρα όμως αυτής της ανόδου του δείκτη, στο πρώτο μισό του 2019, οι τιμές του παραμένουν αρνητικές ($SWCI < -1$) περιγράφοντας έτσι συνθήκες ξηρασίας. Ο SWCI το δεύτερο μισό του 2019, παραμένει σταθερός σε αρνητικές τιμές με αποτέλεσμα να περιγράφει και αυτός το 2019 εξ ολοκλήρου ξηρό.

Τέλος, ο δείκτης VCI, με εξαίρεση το πρώτο δίμηνο του 2019 και το δεύτερο δεκαήμερο του Νοεμβρίου, όλο το υπόλοιπο διάστημα του έτους, κινείται σε τιμές που παραπέμπουν σε πολύ κακές συνθήκες βλάστησης ($VCI < 0.3$). Η διαφοροποίηση που εμφανίζει ο VCI στο Northern Cape μέσα στο 2019 σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες επιβεβαιώνει την ικανότητα απεικόνισης της εποχιακής μεταβλητότητας που εμφανίζει μια περιοχή αλλά και τον προβληματισμό που διατυπώθηκε σε προηγούμενες αναλύσεις ως προς την πιθανή αδυναμία εφαρμογής του VCI σε περιοχές με ερημικά και ημι-ερημικά κλίματα.

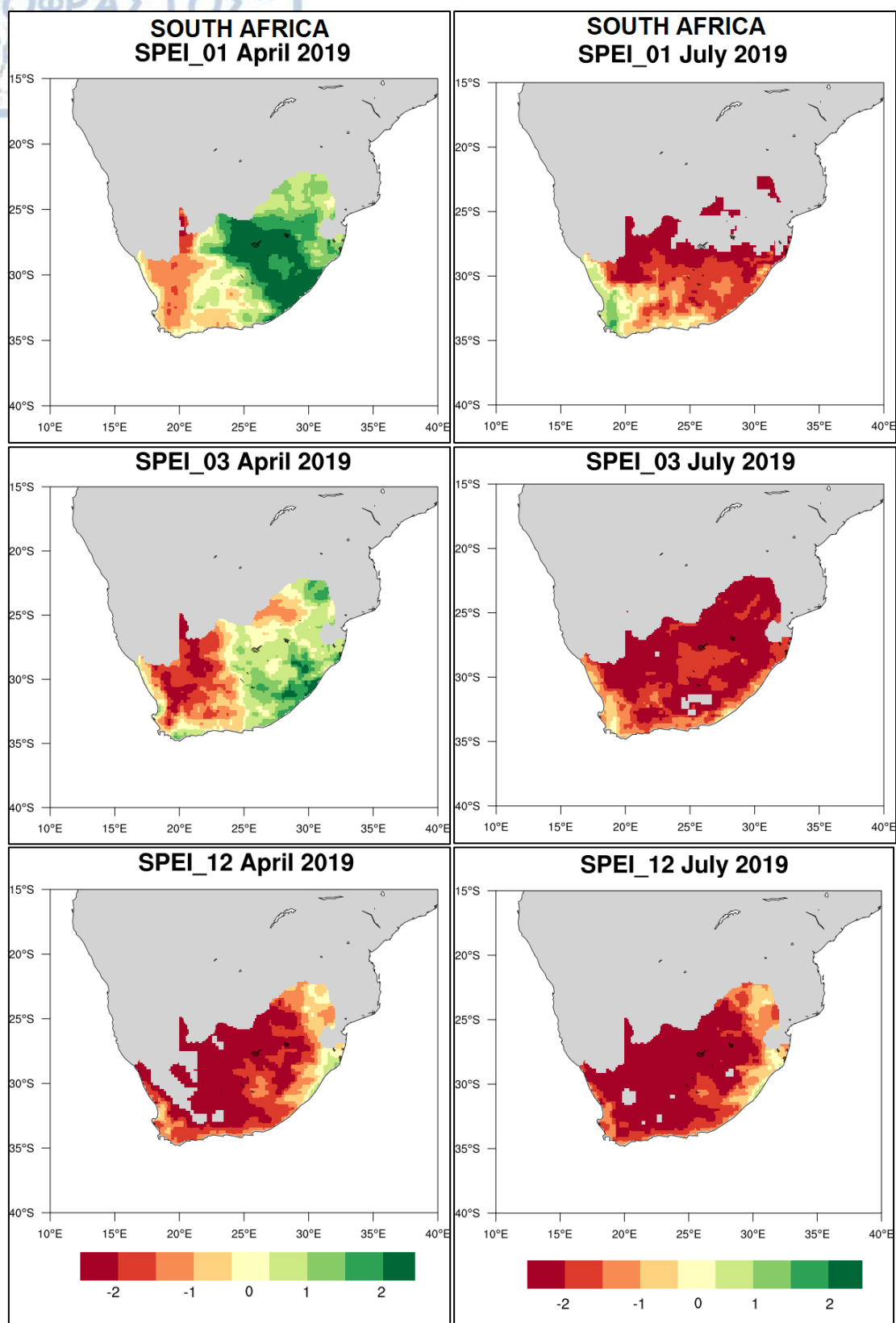
Έχοντας αναλύσει το σύνολο των έξι επαρχιών της Ν. Αφρικής για το 2019 διαπιστώνεται ότι στις περισσότερες περιοχές της χώρας το έτος εμφανίζεται ξηρό



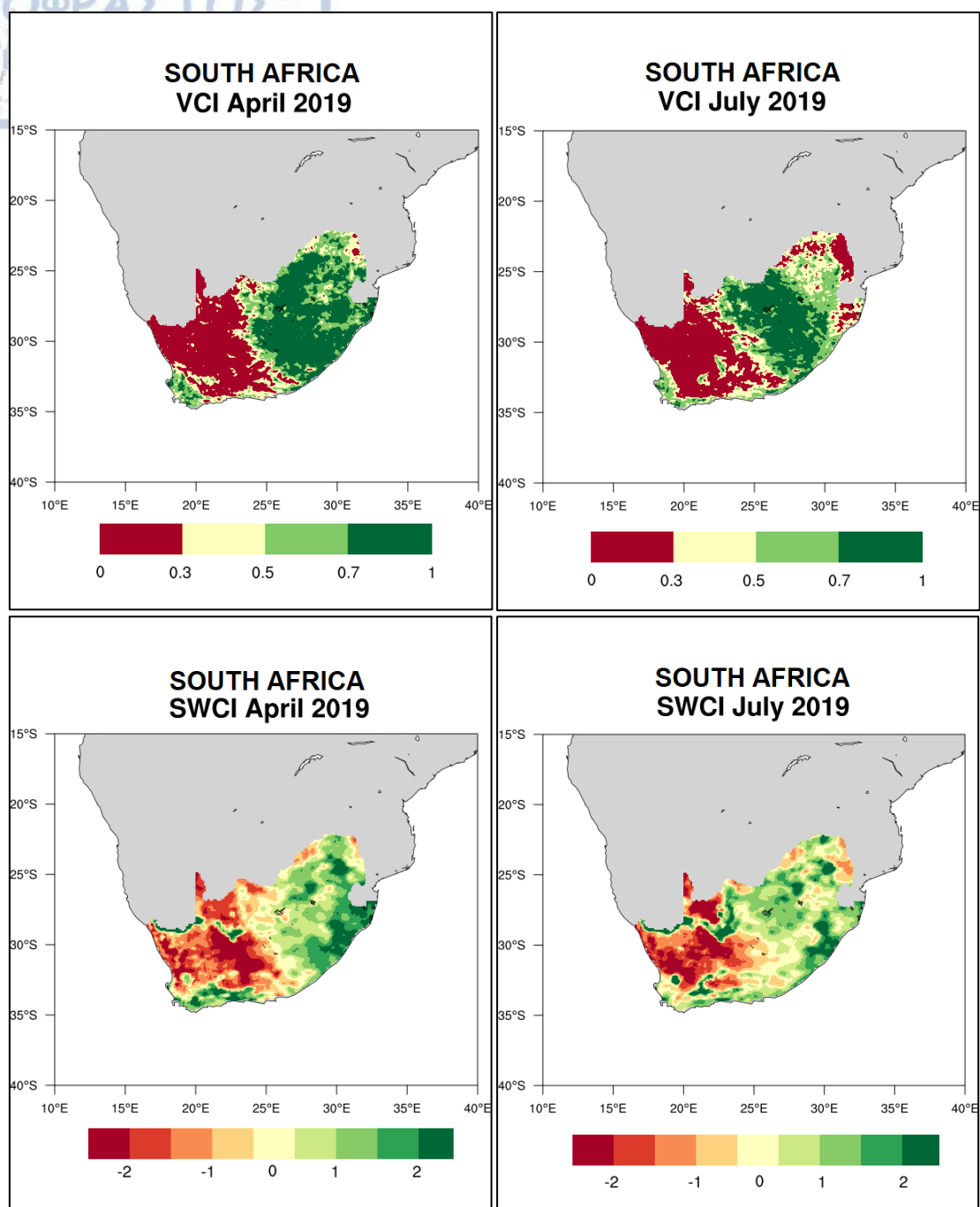
και με επεισόδια ακραίων ξηρασιών κάτι που καταδεικνύει και η βιβλιογραφική ανασκόπηση με αναφορές που σχετίζονται με επεισόδια ξηρασίας στην χώρα το συγκεκριμένο έτος.

Χωρική Ανάλυση της Ξηρασίας του 2019: Όσον αφορά την χωρική ανάλυση της ξηρασίας του 2019 στην Ν. Αφρική ήδη, από το φθινόπωρο (ΜΑΜ) οι επαρχίες στα δυτικά εμφανίζεται να μην ανακάμπτουν ικανοποιητικά από το επεισόδιο ξηρασίας που έπληξε τις περιοχές αυτές στο τέλος του 2018. Στους δείκτες που περιγράφουν την γεωργική και υδρολογική ξηρασία, η παραπάνω συνθήκη επεκτείνεται και στις κεντρικές περιοχές της χώρας για το συγκεκριμένο διάστημα (Σχήματα 3.55 – 3.56).

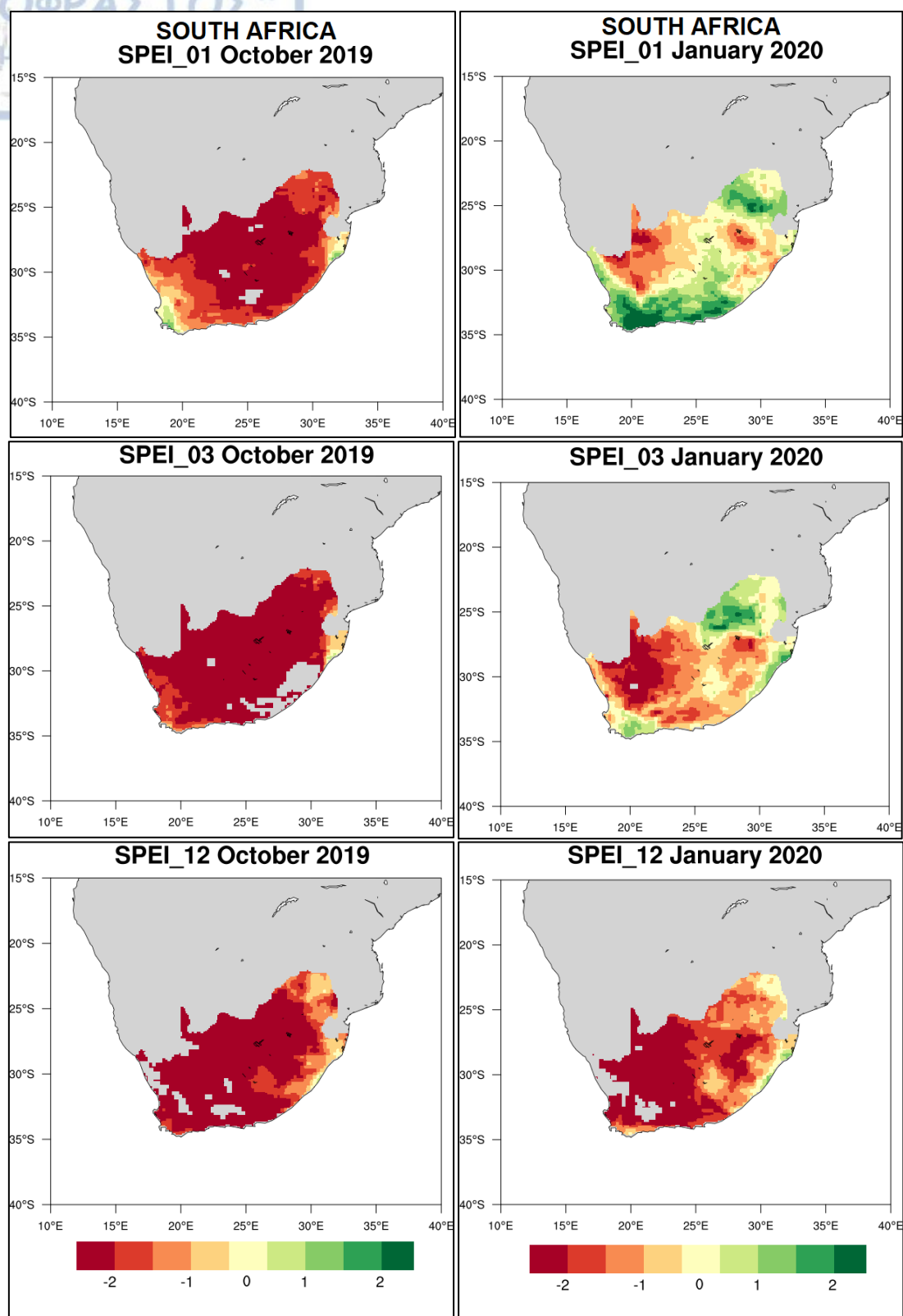
Τον χειμώνα (JJA) όμως, του 2019 η μετάβαση σε ξηρότερες συνθήκες είναι χαρακτηριστική για το σύνολο των επαρχιών της Ν. Αφρικής από τους δείκτες SPEI (1, 3 και 12) (Σχήμα 3.55). Βελτίωση των συνθηκών ξηρασίας εμφανίζεται μόνο στο SPEI_1 για το εν λόγω διάστημα στα δυτικά και νοτιοδυτικά της χώρας και συμπίπτει με την υγρή και ψυχρή περίοδο για τις περιοχές αυτές.



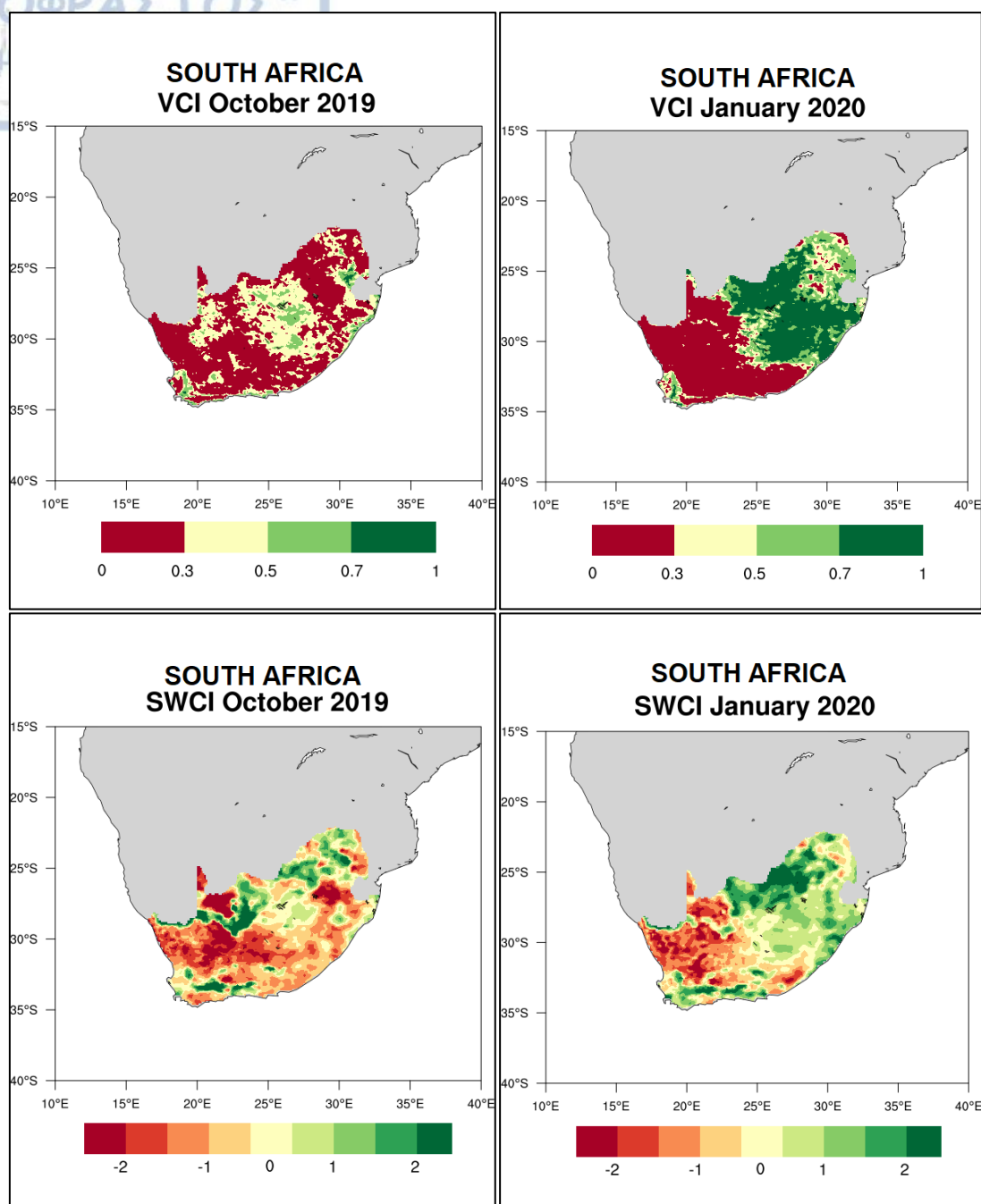
Σχήμα 3.55. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω), SPEI_3 (κέντρο) και SPEI_12 (κάτω) για τον Απρίλιο 2019 (αριστερά) και τον Ιούλιο 2019 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.



Σχήμα 3.56. Απεικόνιση των δεικτών VCI (πάνω) και SWCI (κάτω) για το δεύτερο δεκαήμερο του Απριλίου 2019 (αριστερά) και το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουλίου 2019 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.



Σχήμα 3.57. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω), SPEI_3 (κέντρο) και SPEI_12 (κάτω) για τον Οκτώβριο 2019 (αριστερά) και τον Ιανουάριο 2020 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.



Σχήμα 3.58. Απεικόνιση των δεικτών VCI (πάνω) και SWCI (κάτω) για το δεύτερο δεκαήμερο του Οκτωβρίου 2019 (αριστερά) και το δεύτερο δεκαήμερο του Ιανουαρίου 2020 (δεξιά) στην Ν. Αφρική.

Αντιθέτως, οι δείκτες SWCI και VCI (Σχήμα 3.56) παρουσιάζουν μια εικόνα της χωρικής κατανομής της ξηρασίας για τον χειμώνα που δε διαφοροποιείται από αυτή του φθινοπώρου και με αρκετές ομοιότητες μεταξύ των δύο δεικτών. Η εποχικότητα αλλά και η χρονική καθυστέρηση των δύο αυτών δεικτών, που εντοπίστηκε και στις σημειακές αναλύσεις της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται και στο σύνολο των δεδομένων μέσω της χωρικής ανάλυσης δίνοντας έτσι την δυνατότητα αποκλεισμού

πολλών δευτερευόντων παραγόντων που μπορεί να αποτελούσαν κύριες αιτίες διαφοροποίησης των δύο αυτών δεικτών.

Σε συμφωνία με τα προηγούμενα, χαρακτηριστική είναι η επιδείνωση των τιμών των δεικτών SWCI και VCI την άνοιξη του 2019 (SOM) (Σχήμα 3.58) περιγράφοντας συνθήκες έντονης ξηρασίας για το μεγαλύτερο μέρος της Ν. Αφρικής, ερχόμενη σε συμφωνία με τους δείκτες SPEI (Σχήμα 3.57) που περιγράφουν συνθήκες ακραίας ξηρασίας και την περίοδο αυτή σχεδόν σε όλη την χώρα. Ανεπηρέαστο από συνθήκες έντονης ξηρασίας φαίνεται να μένει έως ένα βαθμό ένα μικρό κομμάτι στα νοτιοδυτικά και στα ανατολικά της Ν. Αφρικής.

Κλείνοντας το κομμάτι της χωρικής ανάλυσης του επεισοδίου ξηρασίας του 2019 για την Ν. Αφρική, φαίνεται η λήξη του να λαμβάνει χώρα κατά την υγρή περίοδο για τις περισσότερες επαρχίες (DJF - SRZ) αλλά να επιμένει, με έντονα μάλιστα χαρακτηριστικά, στις κεντρικές, δυτικές και βορειοδυτικές περιοχές της χώρας (ARZ και WRZ).

Ολοκληρώνοντας το Κεφάλαιο των αναλύσεων των δεικτών ξηρασίας, για το υπόλοιπο της χρονοσειράς μελέτης, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6 – 8 Παρ. Ι, κατά το πρώτο μισό του 2020 υπήρξε σαφής βελτίωση των ξηρικών συνθηκών σε όλες τις επαρχίες της Ν. Αφρικής θέτοντας την λήξη του έντονου επεισοδίου ξηρασίας που απασχόλησε σχεδόν όλη τη χώρα το 2019. Η βελτιωμένη αυτή κατάσταση εμφανίζεται μέχρι και το τέλος της χρονοσειράς (2020) για τις ανατολικές και βορειοανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής.

Αντίθετα, η πλειοψηφία των δεικτών ξηρασίας περιγράφει εκ νέου επιδείνωση των συνθηκών στις κεντρικές περιοχές της χώρας τον χειμώνα του 2020 (JJA) εμφανίζοντας συνθήκες ακραίας ξηρασίας, η οποία την άνοιξη (SON) μετατοπίζεται στα δυτικά και βορειοδυτικά της Ν. Αφρικής. Η χωρική κατανομή αυτής της ξηρής περιόδου μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με την χωρική κατανομή του επεισοδίου ξηρασίας του 2017 επιβεβαιώνοντας την βιβλιογραφική ανασκόπηση και τις μελλοντικές προβολές των σεναρίων (RCPs), ότι περιοχές με ερημικά και Μεσογειακά κλίματα στην Ν. Αφρική αντιμετωπίζουν, και θα αντιμετωπίζουν, όλο και συχνότερα έντονα επεισόδια ξηρασίας.

Επίσης, η χρονική εμφάνιση αυτών των συνθηκών συμπίπτει και πάλι (2017) με την υγρή και ψυχρή περίοδο του έτους (JJA) τονίζοντας την σημαντικότητα αυτής της περιόδου για τις περιοχές που δεν ανήκουν στην SRZ. Καθώς τα δεδομένα της συγκεκριμένης μελέτης περιορίζονται έως τον Δεκέμβριο του 2020, το συγκεκριμένο,

πιθανά έντονο για κάποιες επαρχίες, επεισόδιο ξηρασίας, δεν αναλύεται διεξοδικότερα, καθώς η λήξη της χρονοσειράς συμπίπτει με την ξηρή και θερμή περίοδο (DJF) για τη περιοχές αυτές. Οπότε οι ξηρικές συνθήκες πολύ πιθανό να συνεχίστηκαν μέχρι και το πρώτο μισό του 2021, τουλάχιστον, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αναλυθεί, από την παρούσα εργασία, η διάρκεια, ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της ξηρασίας, καθώς και η χωρική της κατανομή στο σύνολό της. Τέλος, η ποσοτική ανάλυση των τιμών των δεικτών ξηρασίας για το 2020, ως προς τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους αλλά και την μέση τιμή, δεν αποκάλυψε κάποιο έντονο, με διάρκεια και μεγάλη χωρική έκταση επεισόδιο για το έτος αυτό που να απαιτεί διεξοδικότερη ανάλυση.

3.4 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Ποσοτική Ανάλυση του δείκτη SWCI: Για την περιοχή του Western Cape (Cape Town) ο SWCI το 2017 εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή για την περίοδο μελέτης (-2.71) ενώ η τιμή του παραμένει αρνητική καθ' όλη την διάρκεια του 2017 σε αντίθεση με τις υπόλοιπες χρονιές (Πίνακας 3.1). Επίσης το 2017 εμφανίζεται ο μικρότερος ετήσιος μέσος όρος σε σχέση με τα άλλα έτη (Πίνακας 3.2). Ο SWCI επιτυγχάνει να περιγράψει την μακροχρόνια ξηρασία που παρατηρήθηκε στην περιοχή και επιπρόσθετα τονίζει το υετικό έλλειμμα που εμφανίστηκε κυρίως την υγρή περίοδο του έτος για την περιοχή επιβεβαιώνοντας την βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου τονίζεται ότι οι περιορισμένες βροχοπτώσεις στην περιοχή του Cape Town κατά την υγρή περίοδο του 2017 ήταν η κύρια αιτία όξυνσης του φαινομένου της ξηρασίας για την περιοχή.

Ταυτόχρονα, συγκρίνοντας τις τιμές του SWCI του 2017 για τις υπόλοιπες περιοχές μελέτης στο σύνολο της χρονοσειράς, διαπιστώνεται ότι οι βόρειες και ανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής (Limpopo, KwaZulu) δεν εμφανίζουν για το έτος 2017 τις χαμηλότερες τιμές του δείκτη την περίοδο αυτή αλλά ούτε και τον μικρότερο μέσο όρο σε ετήσια βάση. Αντίθετα, οι τιμές του SWCI εμφανίζονται μεγαλύτερες από τις μεταγενέστερες χρονιές κατά την διάρκεια του Zero Day επιβεβαιώνοντας την βιβλιογραφία ότι η ξηρασία του 2017 εντοπιζόταν κυρίως στην δυτικές και νοτιοδυτικές περιοχές της χώρας, ενώ στα ανατολικά και κυρίως βορειοανατολικά της Ν. Αφρικής η αντίστοιχη περίοδος ήταν πιο υγρή σε σχέση με τις κλιματικές τιμές.

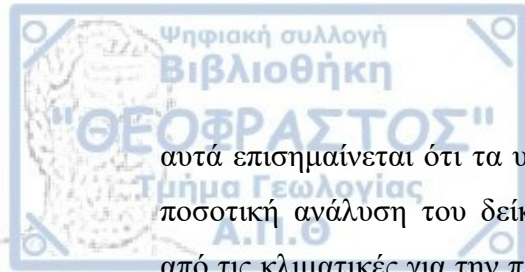
Πίνακας 3.1. Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του δείκτη SWCI σε ετήσια βάση για τις περιοχές μελέτης.

SWCI								
Επαρχία	2017		2018		2019		2020	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Eastern cape	-0.21	1.79	-0.95	1.97	-1.26	1.09	-1.15	5.39
KwaZulu Natal	0.20	2.47	-0.38	2.93	-0.12	2.58	0.18	1.81
Limpopo	-1.12	1.87	-1.78	0.84	-2.03	0.70	-0.04	1.64
Western Cape	-2.71	-0.51	-1.37	1.62	-1.12	1.29	-0.98	1.07
Northern Cape	-4.13	-0.12	-5.77	0.35	-2.91	-1.16	-2.39	-0.81
Free State	-1.39	1.97	-1.57	2.65	-1.47	2.01	0.03	3.76

Πίνακας 3.2. Μέσοι όροι των τιμών του δείκτη SWCI σε ετήσια βάση (το **πιο υγρό** και **πιο ξηρό** έτος της περιόδου 2017-2020) καθώς και του 2^{ου} εξαμήνου και του 4^{ου} τριμήνου (OND) (το **πιο ξηρό** τρίμηνο της χρονοσειράς) για τις περιοχές μελέτης.

SWCI						
Επαρχία	2017	2018			2019	2020
	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος	2 ^ο εξάμηνο	OND	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος
Eastern cape	0.82	0.36	0.21	0.41	-0.15	1.15
KwaZulu Natal	1.22	1.22	0.83	0.26	1.11	0.91
Limpopo	0.62	-0.17	-0.35	-0.90	-0.36	0.93
Western Cape	-1.36	-0.05	0.42	0.11	-0.21	0.04
Northern Cape	-1.38	-1.51	-1.20	-1.78	-1.75	-1.47
Free State	0.09	0.77	0.91	0.59	0.61	1.29

Κατά την ποσοτική ανάλυση των δεικτών για την ξηρασία του 2017 στο Cape Town ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις τιμές των δεικτών που εμφανίζει το Northern Cape καθώς οι βροχοπτώσεις που σημειώνονται στη συγκεκριμένη επαρχία αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας των φραγμάτων που καλύπτουν τις ανάγκες του Cape Town σε νερό. Από την ανάλυση του SWCI για το Northern Cape διαπιστώνεται ότι για το 2017 ο δείκτης εμφανίζει αρνητικές τιμές για όλο το έτος, και ταυτόχρονα την ίδια περίοδο εντοπίζεται η δεύτερη χαμηλότερη τιμή του δείκτη (-4.13) για το σύνολο της περιόδου μελέτης. Ο μέσος όρος των τιμών για το 2017 στην επαρχία του Northern Cape εμφανίζεται έντονα αρνητικός (-1.38), παρ' όλα



αυτά επισημαίνεται ότι τα υπόλοιπα έτη παρουσιάζουν ακόμη χαμηλότερες τιμές. Η ποσοτική ανάλυση του δείκτη επιβεβαιώνει την επικράτηση ξηρότερων συνθηκών από τις κλιματικές για την περιοχή του Northern Cape το 2017 αλλά και για τις αρχές του 2018 όπου εμφανίζεται η χαμηλότερη τιμή του δείκτη (-5.77). Ταυτόχρονα έρχεται σε συμφωνία με τα ευρήματα της ανάλυσης του δείκτη SWCI για την περιοχή του Western Cape για την ίδια περίοδο.

Τέλος, σε ετήσια βάση διαπιστώνεται ότι το 2019 σε τρεις από τις έξι επαρχίες (Eastern Cape, Limpopo, Northern Cape) εμφανίζονται οι μικρότερες τιμές των μέσων όρων για τον δείκτη SWCI. Ο δείκτης έτσι εντοπίζει πολύ ικανοποιητικά την ένταση, την διάρκεια και την μεγάλη έκταση της ξηρασίας για το έτος αυτό. Ταυτόχρονα, οι τιμές των μέσων όρων του δείκτη για το τελευταίο τρίμηνο του 2018 στις επαρχίες του Limpopo και του Western Cape παραπέμπουν στην επικράτηση ξηρικών συνθηκών στις περιοχές αυτές την περίοδο αυτή.

Ποσοτική ανάλυση του δείκτη VCI: Ο δείκτης VCI, το 2017, για την περιοχή του Western Cape (Cape Town), παρουσιάζει την χαμηλότερη τιμή στο σύνολο της περιόδου μελέτης τόσο ως προς την μεγαλύτερη (0.57) όσο και ως προς την μικρότερη τιμή (0.17) (Πίνακας 3.3). Ταυτόχρονα εμφανίζει και τον μικρότερο μέσο όρο για το έτος αυτό σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονιές μελέτης (Πίνακας 3.4). Από την ποσοτική ανάλυση του VCI καταδεικνύεται ότι στην περιοχή επικράτησαν ξηρότερες του κανονικού συνθήκες στο σύνολο τους έτους (υγρή και ξηρή περίοδος). Διαπιστώνεται, έτσι, ότι ο δείκτης VCI καταφέρνει να απεικονίσει τόσο την ένταση όσο και την διάρκεια του φαινομένου της ξηρασίας για την περιοχή του Western Cape για το 2017 και έρχεται σε συμφωνία με τους άλλους δείκτες, στο σύνολο τους, και τις βιβλιογραφικές αναφορές. Ταυτόχρονα, τους μικρότερους μέσους όρους για το 2017 εμφανίζουν και οι επαρχίες Limpopo και Free State. Έτσι, σύμφωνα με τον δείκτη η ξηρασία του 2017 επηρέασε και τις κεντρικές και βορειοανατολικές περιοχές της χώρας.

Από την ποσοτική ανάλυση των τιμών του VCI του 2017, σε σχέση με τα άλλα έτη μελέτης, για το σύνολο των επαρχιών της Ν. Αφρικής διαπιστώνεται ότι οι βόρειες και ανατολικές επαρχίες της χώρας (Limpopo, KwaZulu) εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές του δείκτη για το 2017 στο σύνολο της χρονοσειράς, ιδιαίτερα την ξηρή περίοδο του έτους (ελάχιστες τιμές του δείκτη για το 2017 0.22 και 0.43 αντίστοιχα). Συνυπολογίζοντας την εποχιακή μεταβλητότητα των περιοχών αυτών

και την ποσοτική ανάλυση του 2017 όσο αφορά τους μέσους όρους για τα βόρεια και ανατολικά της Ν. Αφρικής, το έτος αυτό περιγράφεται πιο υγρό από το κανονικό με μικρότερη διάρκεια και ένταση της ξηρασίας σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη μελέτης την κλιματικά ξηρή περίοδο (Πίνακας 3.3), αλλά ειδικά για το Limpopo το υπόλοιπο έτος ήταν ξηρό.

Πίνακας 3.3. Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του δείκτη VCI σε ετήσια βάση για τις περιοχές μελέτης.

VCI								
Επαρχία \ Έτος	2017		2018		2019		2020	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Eastern cape	0.07	0.49	0.10	0.72	0.03	0.55	0.09	0.66
KwaZulu Natal	0.43	0.94	0.28	0.98	0.28	1.00	0.36	1.00
Limpopo	0.22	0.87	0.11	0.92	0.09	0.96	0.09	0.83
Western Cape	0.17	0.57	0.21	0.84	0.26	0.57	0.26	0.65
Northern Cape	0.02	0.41	0.11	0.55	0.02	0.37	0.00	0.25
Free State	0.05	0.91	0.05	0.82	0.00	0.98	0.13	0.97

Πίνακας 3.4. Μέσοι όροι των τιμών του δείκτη VCI σε ετήσια βάση (το **πιο υγρό** και **πιο ξηρό** έτος της περιόδου 2017-2020) καθώς και του 2^{ου} εξαμήνου και του 4^{ου} τριμήνου (OND) (το **πιο ξηρό** τρίμηνο της χρονοσειράς) για τις περιοχές μελέτης.

VCI						
Επαρχία \ Έτος	2017	2018			2019	2020
	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος	2 ^ο εξάμηνο	OND	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος
Eastern cape	0.29	0.40	0.45	0.44	0.22	0.41
KwaZulu Natal	0.71	0.75	0.73	0.68	0.68	0.73
Limpopo	0.50	0.51	0.43	0.36	0.60	0.57
Western Cape	0.33	0.44	0.54	0.39	0.41	0.45
Northern Cape	0.19	0.29	0.38	0.40	0.16	0.12
Free State	0.32	0.43	0.39	0.19	0.57	0.59

Στο σημείο αυτό γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα ευρήματα από την ανάλυση του VCI για την περιοχή του Eastern Cape καθώς ο δείκτης εμφανίζει έντονη

διαφοροποίηση για το 2017 σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη. Συγκεκριμένα οι τιμές του δείκτη εμφανίζονται ιδιαίτερα μικρότερες, κυρίως κατά την υγρή περίοδο του έτους, για την περιοχή περιγράφοντας κακές έως πολύ κακές συνθήκες βλάστησης (< 0.49) για όλο το 2017, κάτι που δεν ισχύει για τα υπόλοιπα έτη μελέτης. Ταυτόχρονα, ο μέσος όρος για το έτος αυτό εμφανίζει την δεύτερη χαμηλότερη τιμή μετά το 2019. Ο δείκτης VCI δηλαδή επεκτείνει χωρικά την ξηρασία του 2017 και στις νότιες και νοτιοανατολικές περιοχές της Ν. Αφρικής (Πίνακας 3.3).

Τέλος, όσον αφορά την ανάλυση του δείκτη VCI για την περιοχή του Northern Cape, που επιδρά επικουρικά στα αποθέματα νερού για το Cape Town, το 2017 να μεν περιγράφεται σαν μια χρονιά όπου επικράτησαν στο σύνολο της κακές έως πολύ κακές συνθήκες βλάστησης (< 0.42), αλλά το έτος αυτό δεν αποτελεί την χρονική περίοδο που εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη στο σύνολο της χρονοσειράς (2019: $0.02 < VCI < 0.37$ και 2020: $0 < VCI < 0.25$) και η χαμηλότερη τιμή του μέσου όρου (2020: $VCI = 0.12$, 2019: $VCI = 0.16$, 2017: $VCI = 0.19$). Επομένως, λόγω αυτής της διαφοροποίησης του δείκτη VCI σε σχέση με τον SWCI πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω εάν ο δείκτης VCI επηρεάζεται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής περισσότερο, σε σχέση με τους άλλους δείκτες της παρούσας ανάλυσης, και εμφανίζει αδυναμία απεικόνισης της έντασης της ξηρασίας που επικρατεί σε μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονα ξηροθερμικά στοιχεία (ερημικά κλίματα) όπως είναι η επαρχία του Northern Cape ή αν παρόμοια συμπεριφορά με τον δείκτη VCI εμφανίζουν και οι δείκτες SPEI (1,3,12).

Ποσοτική ανάλυση των δεικτών SPEI (SPEI 1, SPEI 3, SPEI 12): Κατά την ανάλυση των δεικτών SPEI (1, 3, 12) στο σύνολο της περιόδου μελέτης διαπιστώνεται ότι για το 2017 και οι τρεις δείκτες εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές τους τόσο ως προς τις μεγαλύτερες όσο και ως προς τις μικρότερες τιμές για την περιοχή του Western Cape (Πίνακες 3.5, 3.7 και 3.9), αλλά και τις μικρότερες τιμές όσον αφορά τους μέσους όρους (Πίνακες 3.6, 3.8 και 3.10). Το 2017 εμφανίζεται σαν το ξηρότερο έτος της τετραετίας και στην επαρχία Northern Cape από τις μέσες τιμές του δείκτη SPEI_1, και ξηρότερο από τις μέσες τιμές τον δείκτη SPEI_12 στην επαρχία Eastern Cape. Αντιθέτως, το 2019, από τις μέσες τιμές όλων των δεικτών SPEI για κάθε έτος παρουσιάζεται ως η ξηρότερη χρονιά για την τετραετία 2017-2020 σε όλες τις άλλες επαρχίες. Εξάιρεση αποτελεί η επαρχία KwaZulu Natal όπου

σύμφωνα με τον δείκτη SPEI_1 σαν ξηρότερη χρονιά εμφανίζεται το 2020 βάσει του μέσου όρου των τιμών του δείκτη.

Πίνακας 3.5. Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του δείκτη SPEI_1 σε ετήσια βάση για τις περιοχές μελέτης.

SPEI_1								
Έτος Επαρχία	2017		2018		2019		2020	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Eastern cape	-1.68	0.64	-1.96	1.39	-2.23	0.53	-2.18	1.40
KwaZulu Natal	-1.28	3.11	-1.95	1.63	-1.69	1.79	-2.28	0.89
Limpopo	-1.87	1.12	-2.23	1.49	-2.18	1.21	-1.82	2.20
Western Cape	-2.79	0.50	-2.62	0.93	-1.93	0.67	-1.81	1.02
Northern Cape	-2.55	-0.02	-2.67	0.68	-2.42	-0.58	-3.54	0.15
Free State	-2.70	1.24	-2.05	1.10	-3.33	1.74	-2.29	1.06

Πίνακας 3.6. Μέσοι όροι των τιμών του δείκτη SPEI_1 σε ετήσια βάση (το **πιο υγρό** και **πιο ξηρό** έτος της περιόδου 2017-2020) καθώς και του 2^{ου} εξαμήνου και του 4^{ου} τριμήνου (OND) (το **πιο ξηρό** τρίμηνο της χρονοσειράς) για τις περιοχές μελέτης.

SPEI_1						
Έτος Επαρχία	2017	2018			2019	2020
	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος	2 ^ο εξάμηνο	OND	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος
Eastern cape	-0.51	-0.16	-0.01	-0.74	-0.81	-0.38
KwaZulu Natal	0.10	-0.19	-0.25	-0.83	-0.18	-0.30
Limpopo	-0.43	-0.71	-1.11	-1.55	-1.02	-0.43
Western Cape	-1.31	-0.44	-0.91	-1.43	-0.84	-0.53
Northern Cape	-1.46	-0.69	-0.84	-1.94	-1.39	-1.14
Free State	-0.81	-0.33	-0.73	-1.55	-1.10	-0.21

Συγκεκριμένα, ο δείκτης SPEI_1 εμφανίζει στην περιοχή εξαιρετική ξηρασία δύο χρονικές περιόδους τον Μάρτιο και τον Δεκέμβριο του 2017 (-2.63 και -2.79 αντίστοιχα), γεγονός που επαναλαμβάνεται μόνο κατά την ξηρή περίοδο του 2018 (Οκτώβριος - Νοέμβριος) στο σύνολο της χρονοσειράς. Επιπρόσθετα η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη (0.56) που παραπέμπει σε μια κανονική περίοδο ως προς την ξηρασία εμφανίζεται τον Νοέμβριο, κατά την διάρκεια της ξηρής περιόδου για την περιοχή, εντοπίζοντας, έτσι, κάποιες βροχοπτώσεις από τον δείκτη οι οποίες είτε δεν ήταν

ικανές να αλλάξουν τις συνολικά ξηρικές συνθήκες που επικράτησαν το έτος αυτό στην περιοχή ή να βοηθήσουν στην αναπλήρωση των υδατικών αποθεμάτων. Η έντονη ευαισθησία του SPEI_1, όπως έχει αναφερθεί ήδη σε προηγούμενες ενότητες, επιβεβαιώνεται από το γεγονός αυτό καθώς οι άλλοι δύο δείκτες SPEI (3, 12) εμφανίζουν μέγιστες τιμές για το 2017 ($-1.04 > \text{SPEI}_3$ και $-2.25 > \text{SPEI}_{12}$) βάσει των οποίων χαρακτηρίζεται όλο το έτος από μέτρια έως εξαιρετικά ακραία ξηρασία.

Πίνακας 3.7. Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του δείκτη SPEI_3 σε ετήσια βάση για τις περιοχές μελέτης.

SPEI_3								
Επαρχία	2017		2018		2019		2020	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Eastern cape	-2.32	0.07	-2.25	1.00	-3.35	0.34	-3.41	0.70
KwaZulu Natal	-0.64	1.49	-1.16	1.00	-3.23	0.51	-1.67	0.77
Limpopo	-1.82	0.19	-2.41	1.13	-4.33	0.01	-1.48	1.13
Western Cape	-3.46	-1.04	-2.48	0.35	-1.98	-0.84	-2.23	0.49
Northern Cape	-2.89	-1.53	-2.46	0.32	-3.32	-1.59	-3.62	-0.68
Free State	-2.17	0.63	-2.34	1.16	-3.40	1.12	-2.34	1.07

Πίνακας 3.8. Μέσοι όροι των τιμών του δείκτη SPEI_3 σε ετήσια βάση (το **πιο υγρό** και **πιο ξηρό** έτος της περιόδου 2017-2020) καθώς και του 2^{ου} εξαμήνου και του 4^{ου} τριμήνου (OND) (το **πιο ξηρό** τρίμηνο της χρονοσειράς) για τις περιοχές μελέτης.

SPEI_03						
Επαρχία	2017	2018			2019	2020
	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος	2 ^ο εξάμηνο	OND	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος
Eastern cape	-1.09	-0.48	-0.57	-1.14	-1.49	-0.99
KwaZulu Natal	0.21	-0.22	-0.30	-0.75	-0.50	-0.25
Limpopo	-0.63	-0.87	-1.61	-2.11	-1.77	-0.51
Western Cape	-2.12	-0.85	-1.20	-1.84	-1.40	-0.94
Northern Cape	-2.24	-1.10	-0.78	-1.61	-2.31	-1.94
Free State	-0.97	-0.55	-1.19	-1.83	-1.39	-0.29

Για την περιοχή του Eastern Cape, όπου η τιμές του δείκτη VCI εμφανίζουν έντονη διαφοροποίηση προς ξηρότερες συνθήκες για 2017, σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονιές, συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό και ο δείκτης SPEI_12 καθώς εμφανίζει αυτή

την περίοδο τις πιο ακραίες τιμές (-3.13) της χρονοσειράς, περιγράφοντας το έτος σχεδόν στο σύνολό του σαν εξαιρετικά ξηρό (Φεβρουάριος- Νοέμβριος). Ταυτόχρονα για το 2017 ο δείκτης SPEI_12 εμφανίζει την χαμηλότερη μέγιστη τιμή (-1.75) σε σχέση με τις μέγιστες τιμές που εμφανίζονται στις υπόλοιπες χρονιές μελέτης (2018-2020).

Πίνακας 3.9. Ελάχιστες και μέγιστες τιμές του δείκτη SPEI_12 σε ετήσια βάση για τις περιοχές μελέτης.

SPEI_12								
Έτος	2017		2018		2019		2020	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Eastern cape	-3.13	-1.75	-1.63	-0.22	-3.06	-1.21	-2.57	-1.19
KwaZulu Natal	-0.57	0.33	-1.00	-0.08	-1.16	-0.18	-0.58	0.13
Limpopo	-1.31	-0.53	-1.85	-0.64	-3.17	-1.48	-2.39	-0.73
Western Cape	-3.35	-2.25	-3.31	-0.91	-2.56	-1.31	-2.95	-1.33
Northern Cape	-3.34	-2.25	-2.47	-1.61	-5.64	-2.76	-4.13	-2.98
Free State	-1.20	-0.14	-2.15	-0.51	-2.29	-1.46	-1.26	0.43

Πίνακας 3.10. Μέσοι όροι των τιμών του δείκτη SPEI_12 σε ετήσια βάση (το **πιο υγρό** και **πιο ξηρό** έτος της περιόδου 2017-2020) καθώς και του 2^{ου} εξαμήνου και του 4^{ου} τριμήνου (OND) (το **πιο ξηρό** τρίμηνο της χρονοσειράς) για τις περιοχές μελέτης.

SPEI_12						
Έτος	2017	2018			2019	2020
	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος	2 ^ο εξάμηνο	OND	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος
Eastern cape	-2.34	-1.01	-0.85	-1.17	-1.90	-1.97
KwaZulu Natal	0.02	-0.41	-0.49	-0.71	-0.65	-0.38
Limpopo	-0.98	-1.02	-1.07	-1.46	-2.29	-1.60
Western Cape	-2.69	-1.85	-1.32	-1.43	-1.94	-2.12
Northern Cape	-2.70	-2.13	-2.13	-2.19	-4.14	-3.33
Free State	-0.83	-1.03	-0.75	-0.90	-1.93	-0.57

Αντίθετα, ο δείκτης SPEI_3, ναι μεν εμφανίζει τιμές που αναφέρονται σε περιόδους εξαιρετικής ξηρασίας μέσα στο 2017 (Ιούνιος - Ιούλιος), στο σύνολο του, όμως, κατά κανόνα έρχεται σε περισσότερη συμφωνία με τον δείκτη SWCI

εμφανίζοντας εντονότερες περιόδους ξηρασίας τα έτη 2019 και 2020. Τέλος, ο δείκτης SPEI_1, σε πλήρη αντιδιαστολή με τον SPEI_12, εμφανίζει τις μεγαλύτερες ελάχιστες τιμές, για το 2017 (-1.68), σε σχέση με τις ελάχιστες τιμές των υπόλοιπων ετών μελέτης, παρουσιάζοντας λιγότερες περιόδους σημαντικής ξηρασίας (Μάρτιος, Ιούνιος) μέσα στο έτος, περιγράφοντας το έτος κατά κανόνα με περιόδους μέτριας ξηρασίας ή ακόμα και κανονικό χωρίς την εμφάνιση τιμών του δείκτη που να περιγράφουν κάποια περίοδο του έτους εξαιρετικά ξηρή. Έτσι η ποσοτική μεταβολή του δείκτη SPEI_1, χρονικά, ταυτίζεται με τον δείκτη SWCI χαρακτηρίζοντας το 2017 ως έτος χωρίς περιόδους ακραίας ξηρασίας, για την περιοχή του Eastern Cape, περίοδοι που εν αντιθέσει εμφανίζονται και στους δύο δείκτες (SWCI, SPEI_1) στα υπόλοιπα έτη μελέτης (2018-2020).

Σημαντικό εύρημα της ποσοτικής ανάλυσης αποτελεί η ικανότητα του δείκτη SPEI_1 να εντοπίσει στις πέντε από τις έξι επαρχίες την ξηρή περίοδο το τελευταίο τρίμηνο του 2018 (εξαιρείται η επαρχία Eastern Cape). Η ίδια ικανότητα παρατηρείται και από τον δείκτη SPEI_3, ο οποίος μάλιστα στην επαρχία Free State εντοπίζει πολύ καλά την χρονική έναρξη της ξηρασίας που προηγείται χρονικά σε σχέση με τις άλλες επαρχίες που επηρεάστηκαν το δεύτερο εξάμηνο του 2018.

Τέλος η ανάλυση των δεικτών SPEI (1, 3, 12) για την επαρχία του Northern Cape δείχνει ότι και οι τρεις δείκτες εμφανίζουν μέσα στο 2017 περιόδους επικράτησης εξαιρετικής ξηρασίας (SPEI_1: -2.55, SPEI_3: -2.89, SPEI_12: -3.34) ενώ ο δείκτης SPEI_12 παρουσιάζει όλο το έτος σαν εξαιρετικά ξηρό ($SPEI_{12} < -2.25$). Βάσει της ανάλυσης, οι δείκτες SPEI στο σύνολο τους αποτυπώνουν την ένταση και την διάρκεια του φαινομένου της ξηρασίας για την περιοχή του Northern Cape για το 2017 που περιγράφεται στην βιβλιογραφία. Ταυτόχρονα, όπως φαίνεται στους Πίνακες 3.5 – 3.10 οι δείκτες στο σύνολο τους (SPEI_1, SPEI_3, SPEI_12) ακολουθούν την χρονική κατανομή του δείκτη VCI (Πίνακες 3.3 και 3.4) εμφανίζοντας το 2019 ξηρότερο από το 2017.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη του φαινομένου της ξηρασίας στην Ν. Αφρική εξετάστηκε στην παρούσα εργασία μέσω της ανάλυσης πέντε δεικτών ξηρασίας για την περίοδο 2017 - 2020. Παρά τη μικρή χρονοσειρά μελέτης εντοπίστηκαν τρία κύρια επεισόδια ξηρασίας με έντονα τα χαρακτηριστικά της έντασης και της διάρκειας, αλλά και μεγάλης χωρικής έκτασης με αποτέλεσμα σημαντικές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις στην χώρα.

Το πρώτο επεισόδιο ξηρασίας ήταν ουσιαστικά μια συνέχεια της έντονης ξηρασίας του 2015 - 2016 που επηρέασε την Ν. Αφρική στο σύνολό της, περιορισμένο χωρικά το 2017 στις δυτικές και νοτιοδυτικές επαρχίες της Ν. Αφρικής. Στις περιοχές αυτές, Μεσογειακού κλίματος και WRZ, συνεχίζουν οι ακραίες συνθήκες ξηρασίας όλο το 2017, απόρροια της αποτυχίας του χειμώνα (JJA) 2017 να καλύψει το υετικό έλλειμμα της περιοχής. Πρόσκαιρα, μέσα στο 2017 συνθήκες έντονης ξηρασίας εμφανίζουν και οι κεντρικές και νότιες περιοχές της Ν. Αφρικής, που ανήκουν στην ARZ, οι οποίες όμως ανακάμπτουν σχετικά γρήγορα. Το δεύτερο επεισόδιο ξηρασίας αφορά κυρίως τις ανατολικές, κεντρικές και βόρειες περιοχές της χώρας, που ανήκουν στην SRZ, όπου μια υετικά φτωχή μεταβατική περίοδος (SON 2018) και μια όψιμη υγρή καλοκαιρινή περίοδος (DJF 2018 - 2019) είχαν σαν αποτέλεσμα μια τρίμηνη εξαιρετικά ακραία ξηρασία στις περιοχές αυτές. Η βελτίωση των συνθηκών στο πρώτο τετράμηνο του 2019, που σηματοδότησε την λήξη του δεύτερου επεισοδίου, ήταν πρόσκαιρη καθώς ήδη κατά την διάρκεια του φθινοπώρου (MAM 2019) του ίδιου έτους ξεκινά το τρίτο, και εντονότερο, επεισόδιο ξηρασίας στην Ν. Αφρική, πρώτα από τις κεντρικές και βορειοδυτικές περιοχές της χώρας, και στην συνέχεια, μέσα στο 2019, επηρέασε με ακραίες συνθήκες ξηρασίας πάνω από το 80% της χώρας.

Η ανάλυση των δεικτών, συγκρινόμενη με τις βιβλιογραφικές αναφορές που σχετίζονται με την ξηρασία, αλλά και τις καταγραφές των μετεωρολογικών σταθμών στην χώρα για την αντίστοιχη περίοδο, κατέδειξε ότι οι δείκτες πέτυχαν να περιγράψουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την ένταση, την διάρκεια, την περίοδο έναρξης και λήξης κάθε επεισοδίου, αλλά και την χωρική τους έκταση. Τα επεισόδια ξηρασίας στην Ν. Αφρική, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, συνδέονται με την υψηλή εποχιακή και ετήσια μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων. Αυτή η μεταβλητότητα εντοπίστηκε και στην ανάλυση των δεικτών τόσο ενδοετήσια όσο και μεταξύ των ετών, καταδεικνύοντας την σπουδαιότητα των κλιματολογικά υγρών περιόδων στην πιθανότητα εμφάνισης ξηρασίας στην Ν. Αφρική. Ταυτόχρονα, η μελέτη έδειξε ότι οι άνυδρες περιοχές της χώρας – στα βόρεια και βορειοδυτικά – καθώς και περιοχές που εμφανίζουν μεσογειακό κλίμα – στα δυτικά και νοτιοδυτικά – παρουσιάζουν κατά κανόνα τις μικρότερες τιμές στους δείκτες ξηρασίας, παραπέμποντας συχνότερα στην επικράτηση ξηρικών συνθηκών στις περιοχές αυτές. Ακόμη, η ανάλυση των δεικτών κατέδειξε ότι οι περιοχές που εμφανίζουν την μεγαλύτερη ενδοετήσια μεταβλητότητα στις βροχοπτώσεις (νοτιοδυτικά και δυτικά παραθαλάσσια – $WRZ > 75\%$) είναι αυτές που εμφανίζουν πιο συχνά κάποιο επεισόδιο ξηρασίας.

Από συνοπτικής άποψης, η κύρια αίτια για την εμφάνιση και των τριών επεισοδίων ξηρασίας στην Ν. Αφρική, για την περίοδο μελέτης της παρούσας εργασίας, ήταν οι μεταβολές του δείκτη ENSO. Οι θετικές τιμές του, κατά την περίοδο 2015 - 2016, που είχαν σαν αποτέλεσμα ένα έντονο φαινόμενο El Niño, οδήγησαν σε μια πολυετή ξηρασία στην χώρα που συνεχίστηκε και το 2017 στις νοτιοδυτικές περιοχές της Ν. Αφρικής, με τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις να είναι πολύ σοβαρές στα μεγάλα μητροπολιτικά κέντρα της περιοχής (Cape Town), αλλά και στον πρωτογενή τομέα. Η επανεμφάνιση θετικών τιμών ENSO το τελευταίο τρίμηνο του 2018 και όλο το 2019, οδήγησαν στην εμφάνιση δυο νέων επεισοδίων ακραίας ξηρασίας στην Ν. Αφρική, τα οποία προκάλεσαν σημαντικά προβλήματα τόσο στο πρωτογενή τομέα όσο και στην εύρυθμη λειτουργία της κοινωνίας και της οικονομίας. Δευτερεύοντα κλιματικά στοιχεία που συνδέονται με επεισόδια ξηρασίας στην Ν. Αφρική την τριετία αυτή, αποτέλεσαν οι τηλεσυνδέσεις του Ινδικού και του Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού και οι μεταβολές των φάσεών τους, επηρεάζοντας τα συνοπτικά συστήματα που δραστηριοποιούνται στην ευρύτερη περιοχή της Νοτίου Αφρικής (SAF).

Οι αντοχές που εμφανίζει μια περιοχή στους διαφορετικούς τύπους ξηρασίας εξαρτάται από τα βιοκλιματικά χαρακτηριστικά που εμφανίζει. Ο χρόνος μετάβασης από ένα επεισόδιο μετεωρολογικής ξηρασίας σε μια ξηρασία με γεωργικές, υδρολογικές ή και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις διαφέρει και είναι μικρότερος σε άνυδρες - ερημικές και ημι-ερημικές περιοχές. Οι τηλεπισκοπικοί δείκτες VCI και SWCI φαίνεται, μέσω της χωρικής ανάλυσης των δεικτών, να αποτυπώνουν καλύτερα, σε σχέση με τον μετεωρολογικό δείκτη SPEI τις αντοχές αυτές αλλά και τις διαφοροποιήσεις στα μικροκλιματικά καθεστώτα που υφίστανται και καθορίζονται από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και από τις βιοκλιματικές ζώνες της εκάστοτε περιοχής.

Ο συνδυασμός δεικτών ξηρασίας που βασίζονται σε επίγειες και δορυφορικές παρατηρήσεις, όπως κατέδειξε η ανάλυση, παράγει ένα τελικό προϊόν στο χρήστη με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών που διέπουν την ξηρασία. Μέσω της αποτίμησης των τιμών των πέντε δεικτών, που υλοποιήθηκε κατά την ανάλυση, διαπιστώνεται ότι ο συνδυασμός τους επιτυγχάνει να περιγράψει και τα τρία υπό εξέταση έντονα επεισόδια ξηρασίας, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, άλλα και τα υετικά επεισόδια για την τετραετία 2017 - 2020, συγκρινόμενα με τις βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις και τις μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών.

Ταυτόχρονα, το σύνολο των δεικτών που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνεται να είναι αποτελεσματικοί στην αποτύπωση των μεταβολών και στην περιγραφή των συνθηκών ξηρασίας στο σύνολο των διάφορων κλιματικών τύπων που εμφανίζει η Ν. Αφρική. Εξαίρεση σε αυτή την συνθήκη πιθανώς να αποτελεί ο δείκτης VCI, όπου στις ξηρές και άνυδρες περιοχές (BWk - BWh) – περιοχές που αυτοφυούν κατά κανόνα είδη φυτών ανθεκτικά στις ξηροθερμικές συνθήκες – εμφανίζει αρκετές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες ανάλυσης, αδυνατώντας να περιγράψει, σε ικανοποιητικό βαθμό τις χρονικές μεταβολές των συνθηκών που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας, αποτυπώνοντας έτσι ένα πιο ξηρό προφίλ για τις περιοχές αυτές, σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες.

Ο δείκτης SPEI₁, σαν ένας μετεωρολογικός δείκτης βραχείας περιόδου, καταφέρνει να εντοπίσει, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, τις αλλαγές των καιρικών μοτίβων που επηρεάζουν τις συνθήκες της ξηρασίας σε μια περιοχή. Ταυτόχρονα, ο εν λόγω δείκτης δεν φαίνεται να επηρεάζεται από κάποια εποχικότητα, επιτρέποντας έτσι την υιοθέτησή του σαν ένα αρκετά αποτελεσματικό

εργαλείο παρακολούθησης της μετεωρολογικής ξηρασίας. Η χρήση όμως του SPEI_1 ως μοναδικού δείκτη προσδιορισμού άλλων τύπων ξηρασίας (γεωργικής, υδρολογικής) δεν συνίσταται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα που ενισχύει αυτόν το ισχυρισμό, αποτελεί η διακύμανση του δείκτη κατά την υγρή και ψυχρή κλιματικά περίοδο στα νοτιοδυτικά της χώρας τον χειμώνα του 2017. Σύμφωνα με τον δείκτη SPEI_1, τα έντονα χαρακτηριστικά της διετούς ξηρασίας που επηρέασε τις περιοχές αυτές έπαψαν να υφίστανται σηματοδοτώντας έτσι την λήξη της ακραίας ξηρασίας. Η προβαλλόμενη κατάσταση από τις βιβλιογραφικές αναφορές όμως ήταν πολύ διαφορετική και αποτυπώνεται καλύτερα στο σύνολο των άλλων δεικτών, που αναλύθηκαν για την περίοδο αυτή.

Η πιθανή υπεραισθησία του δείκτη SPEI_1, που εντοπίστηκε στην ανάλυση των δεικτών, μπορεί να αξιολογηθεί και να μετριάσθει εξετάζοντας συνδυαστικά τα αποτελέσματά του με αυτά του δείκτη SPEI_3. Ο μεσοπρόθεσμος αυτός μετεωρολογικός δείκτης δίνει την δυνατότητα εντοπισμού καιρικών γεγονότων που υπερεκτιμούνται – ως προς την επίδρασή τους στις μεταβολές των συνθηκών που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας – από τον δείκτη SPEI_1 επεκτείνοντας την περίοδο υπολογισμού των συνθηκών σε βάθος τριμήνου. Έτσι ο SPEI_3 παρά την αναμενόμενη μικρή χρονική υστέρηση που εμφανίζει, σε σχέση με τον δείκτη SPEI_1 στο κομμάτι της παρακολούθησης μέσω του έγκυρου εντοπισμού της έναρξης και λήξης ενός επεισοδίου ξηρασίας, αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο προειδοποίησης μειώνοντας τις πιθανότητες έκδοσης ή ανάκλησης προειδοποιήσεων που θα μπορούσαν να προκύψουν εξαιτίας των μεταβολών του δείκτη SPEI_1. Ταυτόχρονα, ο δείκτης SPEI_3 παρά την εποχιακή του δομή δεν φαίνεται να εμφανίζει κάποια εποχικότητα. Αντιθέτως, μέσω της χρονικής του κάλυψης καταφέρνει να συνυπολογίζει ικανοποιητικά τις βραχυπρόθεσμες επιδράσεις παρελθοντικών επεισοδίων ξηρασίας σε μια περιοχή επιτρέποντας την αξιοποίησή του και για τον προσδιορισμό και την εκτίμηση γεωργικών ζημιών.

Ο δείκτης SPEI_12, σε πλήρη αντιδιαστολή με τον SPEI_1, φαίνεται να εμφανίζει την μικρότερη ευαισθησία στο σύνολο των δεικτών ξηρασίας που μελετήθηκαν, ως προς τις μεταβολές των συνθηκών που επηρεάζουν τα κύρια χαρακτηριστικά της ξηρασίας. Το γεγονός αυτό τον καθιστά ένα όχι και τόσο αποτελεσματικό εργαλείο σε επίπεδο επιχειρησιακών προγνώσεων και προειδοποιήσεων που σχετίζονται με επεισόδια ξηρασίας. Από την άλλη όμως, πρέπει να τονιστεί ότι σαν ένας μακροπρόθεσμος μετεωρολογικός δείκτης, επιτυγχάνει σε

μεγάλο βαθμό τον προσδιορισμό της υδρολογικής ξηρασίας τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Ένα μελλοντικό πεδίο μελέτης μπορεί να αποτελέσει η συστηματική εμφάνιση μικρότερων τιμών του δείκτη SPEI₁₂, τόσο χρονικά όσο και χωρικά, σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες ξηρασίας που αναλύθηκαν. Έως ένα βαθμό αυτή η διαφοροποίηση του δείκτη είναι αναμενόμενη, καθώς ο SPEI₁₂ συνυπολογίζει τις μετεωρολογικές συνθήκες σε βάθος δωδεκαμήνου. Σε μια έντονα ξηρή τετραετία για Ν. Αφρική, όπως ήταν αυτή του 2016 – 2019, είναι λογικό ένας δείκτης μακροπρόθεσμου υπολογισμού να περιγράφει κατά κανόνα ξηρές συνθήκες, επισημαίνοντας έτσι το πιθανό υετικό έλλειμμα στους υδροφόρους ορίζοντες. Από την άλλη όμως, η αδυναμία αποτύπωσης των έντονα υγρών περιόδων κατά την τετραετία αυτή στα ανατολικά κυρίως της χώρας, και η ταυτόχρονη διακύμανση του SPEI₁₂ σε τιμές αρνητικές ακόμη και στις προαναφερθείσες υγρές περιόδους, εγείρει το ερώτημα αν θα ήταν πιο χρήσιμη η υιοθέτηση ενός συστήματος κατάταξης για τον δείκτη, όπου κάθε δείκτης SPEI διαφορετικής χρονικής κλίμακας, θα έχει και διαφορετική ταξινόμηση των τιμών του ως προς τον χαρακτηρισμό των συνθηκών της εκάστοτε περιόδου.

Ο δείκτης SWCI αποτελεί τυπικά τον δεύτερο δείκτη της μελέτης που στοχεύει στον εντοπισμό και των υδρολογικών ξηρασιών σε μια περιοχή εξετάζοντας την εδαφολογική υγρασία σε μεγαλύτερα βάθη από την επιφάνεια (W_R). Για το λόγο αυτό, η εντοπισμένη, από την ανάλυση, χρονική καθυστέρηση που εμφανίζει στις μεταβολές των μοτίβων των συνθηκών σε σχέση με τους άλλους δείκτες είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό αναμενόμενη. Κύριο πλεονέκτημα του SWCI πρέπει να θεωρηθεί η επιτυχία του δείκτη να μεταβάλλεται με ευκολία και να αλλάζει τις τάσεις των ξηρικών συνθηκών σε υγρές, και το αντίστροφο, κάτι που έρχεται σε πλήρη αντιδιαστολή σε σχέση με τον SPEI₁₂, ενός δείκτη που επίσης σχετίζεται με την αποτύπωση των υδρολογικών ξηρασιών. Ταυτόχρονα, η ενδοετήσια διακύμανσή του στο σύνολο των περιοχών μελέτης εμφανίζει τον δείκτη με χαρακτηριστικά εποχικότητας, πλήρως αποδεκτά σε μια εύκρατη περιοχή όπως είναι η Ν. Αφρική με χαρακτηριστικές διακριτές εποχές. Αυτή η συνθήκη προσδίδει στον δείκτη SWCI μια μεταβλητότητα όπου οι διακυμάνσεις του μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον εντοπισμό γεωργικών ξηρασιών, με τους όποιους περιορισμούς επιβάλλει η ίδια η φύση του δείκτη. Οι περιορισμοί του SWCI ισχύουν και για τον δείκτη VCI, και σχετίζονται με τον τύπο και την υφή του εδάφους, την έκταση και το είδος της

βλάστησης, την έκταση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, και την άρδευση ή μη αυτών των καλλιεργειών (εκτατική γεωργία).

Ο δείκτης VCI, βασισμένος σε δεδομένα που σχετίζονται με την βλάστηση, αποτελεί έναν δείκτη προσδιορισμού των γεωργικών ξηρασιών. Επομένως οι καθυστερημένοι χρόνοι απόκρισής του σε σχέση με τον SPEI_1 μπορεί να θεωρηθούν κάτι αναμενόμενο. Ταυτόχρονα, σε περιόδους πλήρους ανάπτυξης των φυτών, ο δείκτης εμφανίζει την ίδια ευαισθησία του SPEI_1 τόσο χωροχρονικά όσο και ποσοτικά. Το ιδιαίτερο αυτό χαρακτηριστικό του δείκτη επιτρέπει την χρησιμοποίησή του (μόνο σε περιόδους πλήρους φυτοκάλυψης) και σαν εργαλείο παρακολούθησης και προειδοποίησης των μετεωρολογικών ξηρασιών. Ο δείκτης VCI εμφανίζει όμως και αρκετές αδυναμίες. Πέρα από τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν για τον δείκτη SWCI, για τον VCI πρέπει να συμπεριληφθούν και βιολογικοί παράγοντες (έντομα και ασθένειες των φυτών που επηρεάζουν την ευρωστία του φυλλώματος). Η χρήση του σε περιόδους χωρίς φυτοκάλυψη και εκτός του καλλιεργητικού ημερολογίου είναι κατά κανόνα προβληματική, καθώς οι προκύπτουσες τιμές του δείκτη VCI φαίνεται να επηρεάζονται έντονα από την υφιστάμενη βλάστηση της περιοχής. Ταυτόχρονα, με βασικό σκοπό του δείκτη να περιγράψει την υγεία της φυλλικής επιφάνειας των φυτών, φαίνεται να εμφανίζει έντονη εξάρτηση από τον τύπο της βλάστησης που ενδημεί σε κάθε περιοχή. Η εξάρτηση αυτή σε πολλές των περιπτώσεων οδηγεί στην αποτύπωση συνθηκών ξηρασίας που διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό τόσο σε σχέση με τους άλλους δείκτες ξηρασίας, όσο και μεταξύ των τιμών του ίδιου δείκτη χωρικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της έντονης εξάρτησης του δείκτη από το βιοκλιματικό καθεστώς της περιοχής, αποτελούν οι ανατολικές και βορειοανατολικές, υγρές περιοχές, της Ν. Αφρικής και κυρίως η επαρχία Limpopo, όπου η διαφοροποίηση του τύπου βλάστησης από Savana στα βόρεια της επαρχίας σε Grassland στα νότια, στα σύνορα με τις επαρχίες Mpumalanga και Gauteng, επηρεάζει έντονα την χωρική κατανομή της ξηρασίας στην περιοχή αυτή, όπως αποτυπώνεται από τις τιμές του δείκτη, με αποτέλεσμα την περιγραφή συνθηκών έντονα διαφοροποιημένων σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες, τόσο χωρικά όσο και χρονικά.

Εξετάζοντας τους δείκτες για μια τετραετία, ένα μικρό χρονικό διάστημα σε σχέση με το χρονικό διάστημα που απαιτείται για μια κλιματολογική μελέτη, κατά την οποία εμφανίστηκαν τρία επεισόδια ξηρασίας από τους δείκτες με ιδιαίτερα

μεγάλη ένταση, διάρκεια και χωρική κατανομή, δημιουργείται ο προβληματισμός μήπως οι δείκτες στο σύνολό τους υπερεκτιμούν τους παράγοντες που σχετίζονται με την ξηρασία, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν ευκολότερα έντονα επεισόδια ξηρασιών και υπερεκτίμησης των χαρακτηριστικών τους σε σχέση με την πραγματικότητα. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποκάλυψε ότι και οι τρεις περιπτώσεις που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία αφορούν ξηρασίες με σημαντικές κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε πολλές περιοχές όχι μόνο της Ν. Αφρικής, αλλά γενικά στην ευρύτερη περιοχή στα νότια της αφρικανικής ηπείρου (SAF). Χαρακτηριστικά, από το 2017 έως και σήμερα (2022) η υπηρεσία GDO Copernicus, εξετάζοντας διαφορετικούς δείκτες ξηρασίας εξέδωσε συνολικά εννέα έκτακτες αναλυτικές μελέτες για την Ν. Αφρική σχετιζόμενες με την ξηρασία, όπου οι οχτώ αφορούν τα τρία επεισόδια που εντοπίστηκαν από τους εξεταζόμενους δείκτες και αναλύθηκαν στο παρόν κείμενο.

Στην Ν. Αφρική η συχνότητα εμφάνισης επισιτιστικών κρίσεων αυξάνεται την τελευταία δεκαετία, ενώ ταυτόχρονα αυξημένος εμφανίζεται και ο αριθμός των ανθρώπων που επηρεάζεται από αυτές. Ο συνδυασμός της εντατικοποίησης στην διαχείριση του πρωτογενή τομέα, η αύξηση του πληθυσμού και οι όλο και μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό οξύνουν το πρόβλημα. Η κλιματική αλλαγή δρα επικουρικά μεταβάλλοντας τα υφιστάμενα ιστορικά πρότυπα διαχείρισης κρίσεων στον επιχειρησιακό σχεδιασμό. Η επιδείνωση των κύριων χαρακτηριστικών της ξηρασίας (ένταση, διάρκεια, συχνότητα) σε συνδυασμό με τις μελλοντικές κλιματικές προβολές, που περιγράφουν, με αυξημένη βεβαιότητα, επιδείνωση των ξηροθερμικών συνθηκών σε όλη την χώρα, καταδεικνύουν την επιτακτική ανάγκη υλοποίησης και εφαρμογής προγραμμάτων σχετιζόμενα με την ξηρασία και την υιοθέτηση χρήσιμων εργαλείων παρακολούθησης, εκτίμησης, πρόγνωσης και προειδοποίησης. Τα προγράμματα αυτά πρέπει να στοχεύουν στην ολιστική διαχείριση της ξηρασίας, την αποτελεσματική διάδοση των έγκαιρων, έγκυρων και κατανοητών πληροφοριών στους τελικούς χρήστες, με σκοπό την αλληλεπίδρασή τους και την υποστήριξη των υπηρεσιών ανάληψης αποφάσεων για την επιχειρησιακή διαχείριση των επεισοδίων ξηρασίας στην Ν. Αφρική.

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός και η υλοποίηση τέτοιων προγραμμάτων μέσω εργαλείων επίγειων σημειακών παρατηρήσεων από μετεωρολογικούς σταθμούς σε μια αχανή χώρα σαν την Ν. Αφρική με έντονη μορφολογία και πολυσχιδή κλιματικά χαρακτηριστικά, είναι στην πραγματικότητα ανέφικτα. Λύση στο πρόβλημα αυτό

μπορεί να δώσει η τηλεπισκόπηση, όπου με την ραγδαία ανάπτυξή της, παρέχει συνεχείς και συνεπείς παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο με αυξανόμενη διαθεσιμότητα για χαρακτηρισμούς της ξηρασίας σε περιοχική και παγκόσμια κλίμακα.

Ταυτόχρονα είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας συνεπής χαρακτηρισμός της ξηρασίας σε όλο τον υδρολογικό κύκλο. Η αξιόπιστη παρακολούθηση της ξηρασίας απαιτεί την ενσωμάτωση πολλαπλών υδροκλιματικών μεταβλητών, δεικτών από διαφορετικές πηγές, συγχώνευση των επιτόπιων παρατηρήσεων, και αξιοποίηση προϊόντων τηλεπισκόπησης για την αποτύπωση όλων των χαρακτηριστικών της. Η πρόοδος σε προϊόντα και εργαλεία δεδομένων κάνει εφικτή την ανάπτυξη και εφαρμογή σύνθετων δεικτών ξηρασίας για έναν ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό ξηρασίας. Οι σύνθετοι δείκτες επιτρέπουν την εύκολη παρακολούθηση διαφόρων πτυχών της ξηρασίας, όπως είναι η ένταση, η διάρκεια, η χωρική έκταση, η έναρξη, η ανάπτυξη και η ανάκαμψη, αλλά και των επιπτώσεών της. Η αναγκαιότητα ανάπτυξης σύνθετων δεικτών ξηρασίας κατέστη εμφανής και από την ανάλυση των δεικτών της παρούσας εργασίας, καθώς ένας δείκτης που θα συνέδεε το σύνολο των δεικτών της παρούσας ανάλυσης θα ήταν ένα αρκετά αξιόπιστο επιχειρησιακό εργαλείο παρακολούθησης, εκτίμησης και προειδοποίησης των πιθανών επεισοδίων ξηρασίας στην Ν. Αφρική για το σύνολο των ενδιαφερομένων (αγρότες, διαχειριστές υδατικών πόρων και άλλους χρήστες). Κύριοι περιορισμοί στην λειτουργία ενός σύνθετου δείκτη ξηρασίας σε επιχειρησιακό επίπεδο μπορεί να αποτελέσουν η χρονική καθυστέρηση στην λήψη των δεδομένων, το χρονικό βήμα των διαθέσιμων τιμών ενός δείκτη (πχ ενός μηνός στην περίπτωση του SPEI) και η μεγάλη χωρική ανάλυση των δεδομένων των δεικτών. Οι τρεις αυτοί περιορισμοί μπορεί να οδηγήσουν στην αδυναμία έκδοσης έγκυρων και αμέσων προειδοποιήσεων, καθώς και στον κίνδυνο μη εντοπισμού ενός επεισοδίου ξαφνικής ξηρασίας ή της αποτύπωσης των ξηρικών συνθηκών που αφορούν χωρικά μικρότερες περιοχές.

Η κατασκευή ενός σύνθετου δείκτη ξηρασίας που να προέρχεται από τους δείκτες που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και ο προσδιορισμός των τιμών ορίων βάσει των οποίων θα προκύπτει ο χαρακτηρισμός των περιόδων ως προς τις συνθήκες ξηρασίας μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης, έτσι ώστε ο νέος δείκτης να είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο παρακολούθησης και προειδοποίησης της ξηρασίας σε επιχειρησιακό επίπεδο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός ολοένα και αυξάνεται, ο άνθρωπος και γενικότερα οι κοινωνίες μέσα στις οποίες δραστηριοποιείται ασκούν όλο και μεγαλύτερη πίεση στις ήδη περιορισμένες ποσότητες νερού του πλανήτη, καθώς και σε άλλους φυσικούς πόρους, αυξάνοντας έτσι την ευπάθειά μας στο φαινόμενο της ξηρασίας, τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Επικουρικά, στην όξυνση του προβλήματος αυτού συμβάλλει και η κλιματική αλλαγή στον πλανήτη μας που εξελίσσεται με πρωτόγνωρους ρυθμούς. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι είναι πια επιτακτική η ανάγκη τα έθνη να συνεχίσουν την ανάπτυξη πολιτικών με σκοπό την μείωση των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μελλοντικών γεγονότων ξηρασίας. Οι πολιτικές αυτές θα πρέπει να περικλείουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών διαχείρισης των κινδύνων της ξηρασίας, οι οποίες θα περιλαμβάνουν βελτιωμένα συστήματα παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησής της, σχέδια ετοιμότητας και κατάλληλες δράσεις, καθώς και προγράμματα μετριασμού της.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ξηρασία στη χώρα της Νότιας Αφρικής. Η Νότια Αφρική λόγω της γεωγραφικής της θέσης και της πολυσχιδούς μορφολογίας της εμφανίζει μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων και είναι επιρρεπής στην εκδήλωση συχνών ξηρασιών. Ταυτόχρονα, οι μελλοντικές προβολές από τα κλιματικά μοντέλα την τοποθετούν σαν ένα πιθανό hot-spot έντονων ξηρασιών για τον 21^ο αιώνα. Βάσει των παραπάνω, η Νότια Αφρική έχει επιλεγεί από το πρόγραμμα AfriCultuReS σαν μια χώρα μελέτης και εφαρμογής σύγχρονων εργαλείων παρακολούθησης και προειδοποίησης των επεισοδίων ξηρασίας που σκοπό έχουν την καλύτερη διαχείριση της σε επιχειρησιακό επίπεδο, με στόχο τον περιορισμό των επιπτώσεων της.

Για την μελέτη αυτών των επεισοδίων στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τρεις δείκτες ξηρασίας ποσοτικής εκτίμησης με δεδομένα από την 1/1/2017 έως την 31/12/2020. Οι δείκτες αυτοί είναι: ο Τυποποιημένος Δείκτης Βροχόπτωσης και Εξατμισοδιαπνοής - SPEI, σε τρεις χρονικές κλίμακες του ενός, των τριών και των δώδεκα μηνών, ο Δείκτης Κατάστασης της Εδαφικής Υγρασίας - SWCI και ο Δείκτης Κατάστασης της Βλάστησης - VCI.

Η ανάλυση των δεικτών επιβεβαίωσε τρία σημαντικά επεισόδια ξηρασίας, με μεγάλη διάρκεια, έντονα χαρακτηριστικά και μεγάλη χωρική κατανομή. Τα επεισόδια αυτά αποτέλεσαν τρεις μελέτες περίπτωσης (case study), όπου για την επιβεβαίωσή τους εξετάστηκαν οι βιβλιογραφικές αναφορές και οι επίγειες παρατηρήσεις από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της Νοτίου Αφρικής.

Διαπιστώθηκε από την ανάλυση ότι οι δείκτες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με ταύτιση των περιόδων ξηρασίας ως προς την χρονική και χωρική τους κατανομή, και μεγάλη συμφωνία με τις επικρατούσες συνθήκες στην Νότια Αφρική τις περιόδους αυτές. Καταλήγουμε έτσι στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για εύχρηστους και αξιόπιστους δείκτες ποσοτικής εκτίμησης των διαφόρων τύπων της ξηρασίας (μετεωρολογικής, γεωργικής, υδρολογικής).

Λέξεις κλειδιά: Ξηρασία, Νότια Αφρική, Δείκτες ξηρασίας, SPEI, SWCI, VCI, AfriCultuReS

ABSTRACT

INVESTIGATING DROUGHTS OVER SOUTH AFRICA

TSINGOUDIS D. ANTONIOS

As the world population grows, humans and the societies in which they are active are increasingly putting pressure on the already limited amounts of the planet's water supplies, as well as on other natural resources, thus increasing our vulnerability to drought, both in developed and developing countries. In addition, climate change, which is evolving at an unprecedented rate on the planet, also contributes to the exacerbation of this problem. It is thus understood that there is an urgent need for nations to continue to develop policies aimed at reducing the social, economic, and environmental impact of future drought events. These policies should include a wide range of drought risk management techniques, which will include improved monitoring and early warning systems, preparedness plans and appropriate actions, as well as mitigation programs.

The present master thesis focuses on the drought in the country of South Africa. Due to its geographical location and diverse morphology, South Africa has a wide variety of climatic types and is prone to frequent droughts. At the same time, climate models' future projections describe it as a possible hot-spot of intense droughts for the 21st century. Based on the above, South Africa has been selected by the AfriCultuReS program as a country for the study and implementation of modern tools for monitoring and warning of drought events that aim to better manage them at operational level, in order to limit their impact.

In order to study these drought events, three quantitative drought indices were selected and utilized with data from 1/1/2017 to 31/12/2020. These indices are the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI, in three-time scales of

one, three and twelve months, the Soil Water Condition Index - SWCI and the Vegetation Condition Index - VCI.

The analysis of the indices revealed three important drought events, with long duration, strong characteristics and large spatial distribution. These events were three case studies, and for their confirmation the bibliographic reports and the earth observations from the meteorological stations of the National Meteorological Service of South Africa were examined. Combining the results of this analysis, the indices present a similar behavior with the identification of drought periods in terms of their temporal and spatial distribution, and a great agreement with the predominant conditions in South Africa during these periods. We thus conclude that these are easy-to-use and reliable indices for quantitative estimation of the different types of droughts (meteorological, agricultural, hydrological).

Keywords: Drought, South Africa, Drought Indices, SPEI, SWCI, VCI, AfriCultuReS

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

- Abramopoulos, F., Rosenzweig, C., & Choudhury, B. (1988). *Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration*. Journal of Climate, 921-941.
- Adie, H., Rushworth, I., & Lawes, M. J. (2013). *Pervasive, long-lasting impact of historical logging on composition, diversity and above ground carbon stocks in Afrotropical forest*. Forest Ecology and Management, 310, 887-895.
- Albergel, C., Rüdiger, C., Pellarin, T., Calvet, J. C., Fritz, N., Froissard, F., & Martin, E. (2008). *From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations*. Hydrology and Earth System Sciences, 12(6), 1323-1337.
- Alexandridis, T. K., Laneve, G., Katragkou, E., Cherif, I., Ovakoglou, G., Kasampalis, D. A., Karypidou, M. C., Kartsios, S., Pytharoulis, I., Moshou, D., Herrera Garcia, S., Nikulin, G., & Beltran, J. S. (2019). *Enhancing Food Security Through the Africultures Project: Design of Crop, Water and Drought Services*. In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 6287-6290). IEEE.
- Alexandridis, T. K., Ovakoglou, G., Cherif, I., Gómez Giménez, M., Laneve, G., Kasampalis, D., Moshou, D., Kartsios, S., Karypidou, M. C., Katragkou, E., Herrera Garcia, S., Kganyago, M., Mashiyi, N., Pattnayak, K., Challinor, A., Pritchard, R., Brockington, D., Kagoyire, C., & Suarez Beltran, J. (2021). *Designing AfriCultuReS services to support food security in Africa*. Transactions in GIS, 25(2), 692-720.
- Anagnostopoulou, C. H. R., Maheras, P., Karacostas, T., & Vafiadis, M. (2003). *Spatial and temporal analysis of dry spells in Greece*. Theoretical and applied climatology, 74(1), 77-91.

- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). *Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution*. Scientific data, 5(1), 1-12.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). *Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring*. International journal of climatology, 34(10), 3001-3023.
- Below, R., Grover-Kopec, E., & Dilley, M. (2007). *Documenting drought-related disasters: A global reassessment*. The Journal of Environment & Development, 16(3), 328-344.
- Bernstein, H. (2013). *Commercial Agriculture in South Africa since 1994: 'Natural, Simply Capitalism'*. Journal of agrarian change, 13(1), 23-46.
- Bhuiyan, C. (2004). *Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli train of India*. Proceedings of the XXth ISPRS Conference, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, p 6
- Brooks, T., Hoffmann, M., Burgess, N., Plumptre, A., Williams, S., Gereau, R. E., & Stuart, S. (2004). *Eastern afromontane. Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered ecoregions*, 2, 241-242.
- Burke, E. J., Brown, S. J., & Christidis, N. (2006). *Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model*. Journal of Hydrometeorology, 7(5), 1113-1125.
- Burls, N. J., Blamey, R. C., Cash, B. A., Swenson, E. T., Fahad, A. A., Bopape, M. J. M., Straus D. M. & Reason, C. J. (2019). *The Cape Town "Day Zero" drought and Hadley cell expansion*. Npj Climate and Atmospheric Science, 2(1), 1-8.
- Burton, I., Kates, R. W., & White, G. F. (1978). *The Environment as Hazard*. (Oxford University Press: New York.).
- Byrnes, R. M. (Ed.). (1997). *South Africa: A country study* (Vol. 550, No. 93). Bernan Press (PA).
- Carbutt, C., Tau, M., Stephens, A., & Escott, B. (2011). *The conservation status of temperate grasslands in southern Africa*. Grassroots, 11(1), 17-23.
- Castley, J. G., & Kerley, G. I. H. (1996). *The paradox of forest conservation in South Africa*. Forest Ecology and Management, 85(1-3), 35-46.

- Ceballos, A., Scipal, K., Wagner, W., & Martínez-Fernández, J. (2005). *Validation of ERS scatterometer-derived soil moisture data in the central part of the Duero Basin, Spain*. *Hydrological Processes*, 19, 1549-1566.
- Crétat, J., Richard, Y., Pohl, B., Rouault, M., Reason, C., & Fauchereau, N. (2012). *Recurrent daily rainfall patterns over South Africa and associated dynamics during the core of the austral summer*. *International Journal of Climatology*, 32(2), 261–273.
- Cowling, R. M., Richardson, D. M., & Pierce, S. M. (Eds.). (2004). *Vegetation of southern Africa*. Cambridge University Press.
- Cowling, R. M., Procheş, Ş., Vlok, J. H. J., & Van Staden, J. (2005). *On the origin of southern African subtropical thicket vegetation*. *South African Journal of Botany*, 71(1), 1-23.
- Cook, K. H. (1998). *On the response of the Southern Hemisphere to ENSO*. In *Proc 23rd Climate Diagnostics and Prediction Workshop* (pp. 323-326). Miami, FL: American Meteorological Society.
- Cook, C., Reason, C. J., & Hewitson, B. C. (2004). *Wet and dry spells within particularly wet and dry summers in the South African summer rainfall region*. *Climate Research*, 26(1), 17-31.
- Copernicus, (2018). Global Land Operations. *Vegetation and Energy, CGLOPS-1*. Product User Manual.
- Dai, A., & Zhao, T. (2017). *Uncertainties in historical changes and future projections of drought*. Part I: estimates of historical drought changes. *Climatic Change*, 144(3), 519-533.
- DEAT, (2007). Department of Environmental Affairs and Tourism: *South Africa environmental outlook. A report on the state of the environment*. Department of Environmental Affairs and Tourism, Pretoria, 370pp.
- Deering, D. W. (1975). *Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data*. In *Proceedings of the Tenth International Symposium of Remote Sensing of the Environment* (pp. 1169-1198).
- Dennis, I., Dennis, R. (2012). *Climate change vulnerability index for South African aquifers*. *Water SA* 38(3):417–426.
- Dieppois, B., Pohl, B., Rouault, M., New, M., Lawler, D., & Keenlyside, N. (2016). *Interannual to interdecadal variability of winter and summer southern African rainfall, and*

- their teleconnections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(11), 6215-6239.
- Dixon, J. A., Gibbon, D. P., & Gulliver, A. (2001). *Farming systems and poverty: improving farmers' livelihoods in a changing world*. Food & Agriculture Org.
- Driver, P., & Reason, C. J. C. (2017). *Variability in the Botswana High and its relationships with rainfall and temperature characteristics over southern Africa*. *International Journal of Climatology*, 37, 570-581.
- du Preez, C. C., Kotzé, E., & van Huyssteen, C. W. (2019). *Soils, agriculture and food*. In *The Geography of South Africa* (pp. 111-121). Springer, Cham.
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N. R., Saha, S. K., & Siddiqui, A. R. (2015). *Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI)*. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 53-63.
- DWS, (2018). Department of Water and Sanitation. *National water and sanitation master plan, volume 1: call to action v9.1 [Draft]*, Project WP11240. Department of Water and Sanitation, Pretoria, 59pp.
- Edwards, D. C. (1997). *Characteristics of 20th Century drought in the United States at multiple time scales*. Air Force Inst of Tech Wright-Patterson Afb Oh.
- FAO, (2009). Food and Agriculture Organization. *Declaration of the world summit on food security*. In *Proceedings of the World*
- FEWS Bulletin, (1996). United States Agency for International Development (USAID).
- Finch, J. M., & Meadows, M. E. (2019). *South African biomes and their changes over time*. In *The Geography of South Africa* (pp. 57-69). Springer, Cham.
- Fitchett, J. M., & Grab, S. W. (2014). *A 66-year tropical cyclone record for south-east Africa: temporal trends in a global context*. *International Journal of Climatology*, 34(13), 3604-3615.
- Gibbs, W. J. (1975). *Drought-its definition, delineation and effects*. *Drought*. Lectures presented at the twenty-sixth session of the WMO Executive Committee., 1-39.
- Goddard, L., & Graham, N. E. (1999). *Importance of the Indian Ocean for simulating rainfall anomalies over eastern and southern Africa*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D16), 19099-19116.

- Greenberg, S. (2019). *Agriculture and agrarian change in South Africa*. In *The Geography of South Africa* (pp. 143-151). Springer, Cham.
- Grossman, D., & Gandar, M. V. (1989). *Land transformation in South African savanna regions*. *South African Geographical Journal*, 71(1), 38-45.
- Haile, M. (2005). *Weather patterns, food security and humanitarian response in sub-Saharan Africa*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2169-2182.
- Hart, N. C. G., Reason, C. J. C., & Fauchereau, N. (2010). *Tropical–extratropical interactions over southern Africa: Three cases of heavy summer season rainfall*. *Monthly weather review*, 138(7), 2608-2623.
- Hart, N. C., Reason, C. J., & Fauchereau, N. (2013). *Cloud bands over southern Africa: Seasonality, contribution to rainfall variability and modulation by the MJO*. *Climate dynamics*, 41(5), 1199-1212.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wihite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). *Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index*. *Bulletin of the American meteorological society*, 80(3), 429-438.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). *The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488.
- Hensley, M., Le Roux, P., Du Preez, C., Van Huyssteen, C., Kotze, E., & Van Rensburg, L. (2006). *Soils: The Free State's agricultural base*. *South African Geographical Journal*, 88(1), 11-21.
- Hermes, J. C., & Reason, C. J. C. (2009). *Variability in sea-surface temperature and winds in the tropical south-east Atlantic Ocean and regional rainfall relationships*. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(1), 11-21.
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. V., & Van Leeuwen, W. J. D. A. (1997). *A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS*. *Remote sensing of environment*, 59(3), 440-451.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p

- IPCC, 2019: *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes terrestrial ecosystems*.
- Jackson, L. F., Lipschitz, S., Van der Merwe, H., Zietzman, L., & Lord, D. A. (1984). *Coastal sensitivity atlas of southern Africa*. Department of Transport, Cape Town.
- Jürgens, N. (2006). *Desert biome*. In: Mucina, L., Rutherford, M.C. (eds) *The vegetation of South Africa, Lesotho and Swaziland*. Strelitzia 19. South African National Biodiversity Institute, Pretoria, pp 301–323
- Jury, M.R., Valentine, H.R., & Lutjeharms, J.R.E. (1993). *Influence of the Agulhas current on summer rainfall along the southeast coast of South Africa*. J Appl Meteorol 32(7):11282–11287.
- Kendon, E. J., Ban, N., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., & Wilkinson, J. M. (2017). Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 79-93.
- Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar – Haghighi, A.A., & Zand-Parsa S. (2011) *Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in Different Climatic Zones*. *Water Resources Management*, 25(6):1737-1757
- Kim, K. H., Shin, Y., Lee, S., & Jeong, D. (2019). *Use of seasonal climate forecasts in agricultural decision-making for crop disease management*. In *Adaptation to climate change in agriculture* (pp. 173-191). Springer, Singapore.
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of remote sensing*, 11(8), 1405-1419.
- Kogan, F. N. (1995). *Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655-668.
- Lawes, M. J., Obiri, J. A. F., & Eeley, H. A. C. (2004). *The uses and value of indigenous forest resources in South Africa*. *Indigenous forests and woodlands in South Africa: policy, people and practice*, 227-273.

- Lee, D. Y., Petersen, M. R., & Lin, W. (2019). *The southern annular mode and Southern Ocean surface westerly winds in E3SM*. *Earth and Space Science*, 6(12), 2624-2643.
- Lehohla, P. (2016). *Community Survey 2016, Agricultural Households*. Statistics South Africa: Pretoria, South Africa.
- Lennard, C. (2019). *Multi-scale drivers of the South African weather and climate*. In *The Geography of South Africa* (pp. 81-89). Springer, Cham.
- Liu, W. T., & Kogan, F. N. (1996). *Monitoring regional drought using the vegetation condition index*. *International Journal of Remote Sensing*, 17(14), 2761-2782.
- Louw, C., Van Heerden, J., & Olivier, J. (1998). *The South African fog-water collection experiment: Meteorological features associated with water collection along the eastern escarpment of South Africa*. *WATER SA-PRETORIA*-, 24, 269-280.
- Lovegrove, B. (2021). *The Living Deserts of Southern African*. Penguin Random House South Africa.
- Lutgens, F. K., and Tarbuck, E. J. (2001). *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Lutjeharms, J.R. (2006) *The Agulhas current*. Springer, Berlin.
- Manatsa, D., Matarira, C. H., & Mukwada, G. (2011). *Relative impacts of ENSO and Indian Ocean dipole/zonal mode on east SADC rainfall*. *International Journal of Climatology*, 31(4), 558-577.
- Masante, D., McCormick, N., Vogt, J., Carmona-Moreno, C., Cordano, E., Amezttoy, I. (2018). *Drought and Water Crisis in Southern Africa*, European Commission, Ispra
- Masubelele, M. L., Hoffman, M. T., & Bond, W. J. (2015). *Biome stability and long-term vegetation change in the semi-arid, south-eastern interior of South Africa: A synthesis of repeat photo-monitoring studies*. *South African Journal of Botany*, 101, 139-147.
- Maúre, G., Pinto, I., Ndebele-Murisa, M., Muthige, M., Lennard, C., Nikulin, G., & Meque, A. (2018). *The southern African climate under 1.5°C and 2°C of global warming as simulated by CORDEX regional climate models*. *Environmental Research Letters*, 13(6), 065002.
- McCarthy, T. & Rubidge, B. (2005). *The story of earth and life*. Struik Publishers, Cape Town.

- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Meadows, M. E. (2000). *The ecological resource base: biodiversity and conservation*. The geography of South Africa in a changing world, 361-389.
- Mittermeier, R. A., Robles-Gil, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J. D., Brooks, T. M., Mittermeier, C. G., Lamoreux, J. L. & Fonseca, G. (2004) *Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions* (CEMEX, Mexico City).
- Moncrieff, G. R., Scheiter, S., Langan, L., Trabucco, A., & Higgins, S. I. (2016). *The future distribution of the savannah biome: model-based and biogeographic contingency*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371(1703), 20150311.
- Morioka, Y., Tozuka, T., & Yamagata, T. (2011). *On the growth and decay of the subtropical dipole mode in the South Atlantic*. Journal of Climate, 24(21), 5538-5554.
- Mucina, L., & Rutherford, M. C. (2006). *The vegetation of South Africa, Lesotho and Swaziland. Strelitzia 19.*, (South African National Biodiversity Institute: Pretoria, South Africa). Memoirs of the Botanical Survey of South Africa.
- Munday, C., & Washington, R. (2017). *Circulation controls on southern African precipitation in coupled models: The role of the Angola low*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(2), 861-877.
- Nicholson, S. E. (1997). *An analysis of the ENSO signal in the tropical Atlantic and western Indian Oceans*. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 17(4), 345-375.
- Nicholson, S. E. (2010). *A low-level jet along the Benguela coast, an integral part of the Benguela current ecosystem*. Climatic Change, 99(3), 613-624.
- Nicholson, S. E. (2018). *The ITCZ and the seasonal cycle over equatorial Africa*. Bulletin of the American Meteorological Society, 99(2), 337-348.
- Ogwang, B. A., Kabengwela, M. H., Dione, C., & Kamga, A. (2018). *The State of Climate of Africa in 2017*. African Centre for Meteorological Applications for Development: Niamey, Niger.

- Ogwang, B. A., Kabengwela, M. H., Dione, C., & Kamga, A. (2019). *The State of Climate of Africa in 2018*. African Centre for Meteorological Applications for Development: Niamey, Niger.
- Olukayode Oladipo, E. (1985). *A comparative performance analysis of three meteorological drought indices*. Journal of Climatology, 5(6), 655-664.
- Palmer, T., & Ainslie, A. (2006). *Country pasture/forage resource profiles*. Food and Agriculture Organization, South Africa.
- Paulik, C., Dorigo, W., Wagner, W., & Kidd, R. (2014). Validation of the ASCAT Soil Water Index using in situ data from the International Soil Moisture Network. International journal of applied earth observation and geoinformation, 30, 1-8.
- Philippon, N., Rouault, M., Richard, Y., & Favre, A. (2012). *The influence of ENSO on winter rainfall in South Africa*. International Journal of Climatology, 32(15), 2333–2347.
- Qian, X., Liang, L., Shen, Q., Sun, Q., Zhang, L., Liu, Z., & Qin, Z. (2016). *Drought trends based on the VCI and its correlation with climate factors in the agricultural areas of China from 1982 to 2010*. Environmental monitoring and assessment, 188(11), 1-13.
- Quiring, S. M., & Ganesh, S. (2010). *Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas*. Agricultural and Forest Meteorology, 150(3), 330-339.
- Reason, C. J. C., Allan, R. J., Lindesay, J. A., & Ansell, T. J. (2000). *ENSO and climatic signals across the Indian Ocean basin in the global context: Part I, Interannual composite patterns*. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 20(11), 1285-1327.
- Reason, C. J. C., & Rouault, M. (2005). *Links between the Antarctic Oscillation and winter rainfall over western South Africa*. Geophysical research letters, 32(7).
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. P., & Menzel, A. (2006). *Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis*. Annals of Forest Science, 63(6), 569-577.
- Richman, M. B., & Leslie, L. M. (2018). *The 2015-2017 Cape Town drought: Attribution and prediction using machine learning*. Procedia Computer Science, 140, 248-257.
- Ridder, N. N., Pitman, A. J., Westra, S., Ukkola, A., Do, H. X., Bador, M., & Zscheischler, J. (2020). *Global hotspots for the occurrence of compound events*. Nature communications, 11(1), 1-10.

- Rutherford, M. C., & Westfall, R. H. (1994). *Biomes of southern Africa: an objective categorization*. National Botanical Institute.
- Rutherford, M. C., Mucina, L., Lotter, M. C., & Bredenkamp, G. J. (2006). Smit. *JHL, Scott-Shaw, CR, Hoare, DB, Goodman, PS, Bezuidenhout, H., Scott, L., Ellis, F., Powrie, LW, Siebert, F., Mostert, TH, Henning, BJ, Venter, CE, Camp, KGT, Siebert, SJ, Matthews, WS, Burrows, JE, Dobson, L., van Rooyen, N., Schmidt, E., Winter, PJD, du Preez, PJ, Ward, RA, Williamson, S. and Hunter, PJH*, 438-539.
- Rutherford, M. C., Powrie, L. W., & Husted, L. B. (2014). *Herbivore-driven land degradation: consequences for plant diversity and soil in arid subtropical thicket in south-eastern Africa*. *Land Degradation & Development*, 25(6), 541-553.
- SAWS, 2019. South African Weather Service, *Annual climate summary for South Africa 2018*. Pretoria, South Africa, 1-25
- SAWS, 2020. South African Weather Service, *Annual climate summary for South Africa 2019*. Pretoria, South Africa, 1-26
- Shackleton, C. M., & Shackleton, S. E. (2004). *Use of woodland resources for direct household provisioning. Indigenous forests and woodlands in South Africa: Policy, people and practice*, 195-225.
- Schulze, R. E., & Kunz, R. P. (1997). *Rainfall seasonality*. In R. E. Schulze, M. Maharaj, S. D. Lynch, B. J. Howe, & B. Melvil-Thompson (Ed.), *South African atlas of agrohydrology and –climatology* WRC report TT82/96 (pp. 39–40). Pretoria: Water Research Commission.
- Schwalm, C. R., Anderegg, W. R., Michalak, A. M., Fisher, J. B., Biondi, F., Koch, G., & Tian, H. (2017). *Global patterns of drought recovery*. *Nature*, 548(7666), 202-205.
- Sha, S., Guo, N., Li, Y. H., Ren, Y. L., & Li, Y. P. (2013). *Comparison of the vegetation condition index with meteorological drought indices: a case study in Henan province*. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(4), 990-998.
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). *Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle*. *Journal of Climate*, 21(3), 432-458.
- Sheffield, J., Wood, E. F., Chaney, N., Guan, K., Sadri, S., Yuan, X., & Ogallo, L. (2014). *A drought monitoring and forecasting system for sub-Sahara African water resources and food security*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(6), 861-882.

- Shukla, S., Arsenault, K. R., Hazra, A., Peters-Lidard, C., Koster, R. D., Davenport, F., & Becker-Reshef, I. (2020). *Improving early warning of drought-driven food insecurity in southern Africa using operational hydrological monitoring and forecasting products*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 20(4), 1187-1201.
- Sousa, P. M., Blamey, R. C., Reason, C. J., Ramos, A. M., & Trigo, R. M. (2018). *The 'Day Zero' Cape Town drought and the poleward migration of moisture corridors*. Environmental Research Letters, 13(12), 124025.
- Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., & Dosio, A. (2020). *Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data*. Journal of Climate, 33(9), 3635-3661.
- Steenkamp, Y., Van Wyk, A. E., Victor, J. E., Hoare, D. B., Dold, A. P., Cowling, R. M., & Smith, G. F. (2004). *Maputaland-Pondoland-Albany* In: Mittermeier, R. A., Hoffmann, M., Pilgrim, J. D., Brooks, T. B., Mittermeier, C. G., Lamoreux, J. L. & da Fonseca, G. editors. Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered ecoregions. Cemex, Mexico City.
- Suarez, J. (2018). *Marketing toolkit on earth observation for agricultural monitoring*, AfriCultuReS.
- Sun, X., Cook, K. H., & Vizi, E. K. (2017). *The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability*. Journal of Climate, 30(9), 3279-3296.
- Svoboda, M. D., & Fuchs, B. A. (2016). *Handbook of drought indicators and indices* (pp. 1-44). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Tannehill, I. R. (1947). *Drought, its causes and effects* (Vol. 64, No. 1, p. 83). LWW.
- Tarpley, J. D., Schneider, S. R., & Money, R. L. (1984). *Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite*. Journal of Climate and Applied Meteorology, 491-494.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). *An overview of CMIP5 and the experiment design*. Bulletin of the American meteorological Society, 93(4), 485-498.
- Thorntwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical review, 38(1), 55-94.
- Tyson, P. D., Garstang, M., Swap, R., Kållberg, P., & Edwards, M. (1996). *An air transport climatology for subtropical southern Africa*. Int J Climatol 16(3):265-291.

- Tyson, P. D., & Preston-Whyte, R. A. (2000). *The weather and climate of Southern Africa*. Cape Town: Oxford University Press Southern Africa.
- Tyson, P. D., Preston-Whyte, R.A. (2005). *The weather and climate of Southern Africa*. Oxford University Press, Cape Town, p 396.
- UNISDR, U. (2009). *Making Disaster Risk Reduction Gender Sensitive: Policy and Practical Guidelines*.
- Van der Walt, A. J., & Fitchett, J. M. (2020). *Statistical classification of South African seasonal divisions on the basis of daily temperature data*. South African Journal of Science, 116(9-10), 1-15.
- Van Heerden, J., Terblanche, D. E., & Schulze, G. C. (1988). *The southern oscillation and South African summer rainfall*. Journal of Climatology, 8(6), 577-597.
- Van Rensburg, L. D., De Clercq, W. P., Barnard, J. D., & Du Preez, C. C. (2011). *Salinity guidelines for irrigation: case studies from Water Research Commission projects along the lower Vaal, Riet, Berg and Breede rivers*. Water SA, 37(5), 739-750.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., & Rose, S. K. (2011). *The representative concentration pathways: an overview*. Climatic change, 109(1), 5-31.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). *A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index*. Journal of climate, 23(7), 1696-1718.
- Vigaud, N., Richard, Y., Rouault, M., & Fauchereau, N. (2009). *Moisture transport between the South Atlantic Ocean and southern Africa: relationships with summer rainfall and associated dynamics*. Climate Dynamics, 32(1), 113-123.
- Vink, N., Deloire, A., Bonnardot, V., & Ewert, J. (2012). *Climate change and the future of South Africa's wine industry*. International Journal of climate change strategies and management.
- Wagner, W., Lemoine, G., & Rott, H. (1999). *A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data*. Remote Sensing of Environment, 70, 191-207
- Wallén, C. C. (1967). *Aridity definitions and their applicability*. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 49(2-4), 367-384.

White, D. H., & Walcott, J. J. (2009). *The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review*. Crop and Pasture Science, 60(7), 599-616.

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). *Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions*. Water international, 10(3), 111-120.

Wilhite, D. A. (1993). *The enigma of drought*. In *Drought assessment, management, and planning: Theory and case studies* (pp. 3-15). Springer, Boston, MA.

Wilhite, D. A. (2000). *Drought as a natural hazard: concepts and definitions*.

Wilhite, D. A. (2016). *Managing drought risk in a changing climate*. Climate Research, 70(2-3), 99-102.

WMO, (2018). *WMO statement on the state of the global climate in 2017*. World Meteorological Organisation (WMO).

Xulu, N. G., Chikooore, H., Bopape, M. J. M., & Nethengwe, N. S. (2020). *Climatology of the mascarene high and its influence on weather and climate over Southern Africa*. Climate, 8(7), 86.

Zhao, T., & Dai, A. (2015). *The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario*. Journal of climate, 28(11), 4490-4512.

Ziervogel, G. (2019). *Unpacking the Cape Town drought: lessons learned*. Cities support programme Climate resilience paper. African Centre for Cities, February.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Δαλέζιος, P. N. (2002). *Περιβαλλοντική Τηλεπισκόπηση*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Μπαλτάς, Ε. (2013). *Εφαρμοσμένη Μετεωρολογία*, 2η έκδοση. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.

Διαδικτυακές πηγές

CHIRPS - Climate Hazards Center. *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations*, 2020, <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps> (ανακτήθηκε την 06-05-2022)

CIA - Central Intelligence Agency, 2011. World Factbook. Country Comparison. <https://web.archive.org/web/20110501164719/https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2147rank.html?countryName=South%20Africa&countryCode=sf®ionCode=af&rank=32#sf> (ανακτήθηκε 02-12-2021)

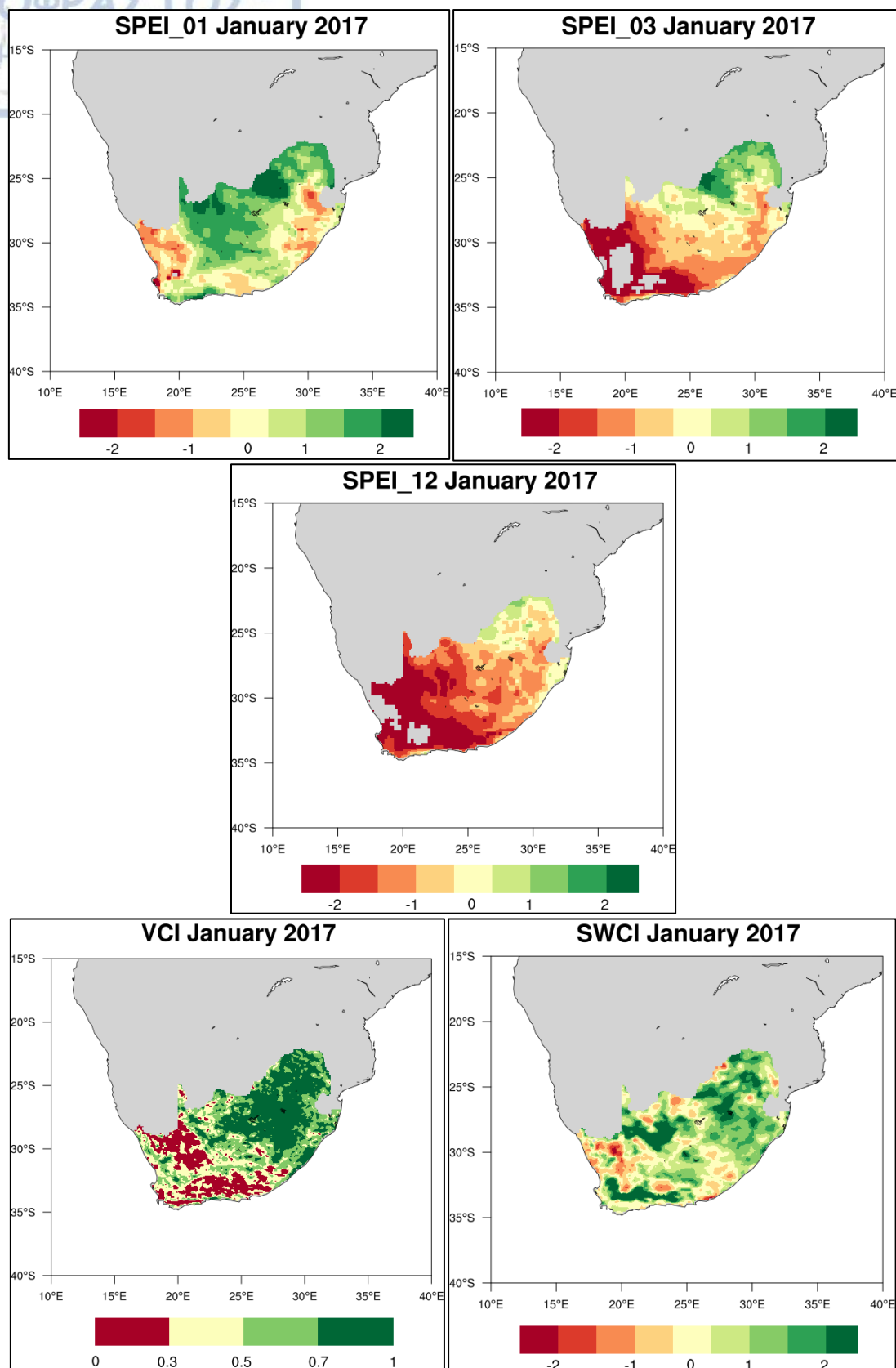
- DAFF - Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2016. Abstract of agricultural statistics., Pretoria, 106pp <https://www.gov.za/documents/departement-agriculture-forestry-and-fisheries-annual-report-20152016-1-sep-2016-0000> (ανακτήθηκε 15-10-2021)
- DEAT - Department of Environmental Affairs and Tourism, 1990. Water Resources in South Africa, Republic of South Africa. <https://www.dffe.gov.za/> (ανακτήθηκε 06-01-2021)
- DWS - Department of Water and Sanitation. *Concern as rainy season fails to impress*, 23-01-2019, <http://www.dwa.gov.za/Communications/PressReleases/2019/MS%20-%20Concern%20as%20rainy%20season%20fails%20to%20impress.pdf> (ανακτήθηκε την 30-01-2022)
- DWS - Department of Water and Sanitation. *Continued drop in the Vaal Dam could have serious impact*, 23-01-2019, <http://www.dwa.gov.za/Communications/PressReleases/2019/MS%20-%20Continued%20drop%20in%20the%20Vaal%20Dam%20could%20have%20serious%20impact%20.pdf> (ανακτήθηκε την 15-05-2022)
- DWS - Department of Water and Sanitation. *Dam levels in Free State continue to decline*, 15-01-2019, <http://www.dwa.gov.za/Communications/PressReleases/2019/MEDIA%20statement%20Dam%20levels%2015%20001%202019.pdf> (ανακτήθηκε την 30-01-2022)
- EUMeTrain - European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EU-METSAT), 2012. Manual of Synoptic Satellite Meteorology, South African Cold Fronts. <http://www.eumetrain.org/satmanu/CM4SH/SACF/navmenu.php?page=2.0.0> (ανακτήθηκε 10-10-2021)
- FAO GIEWS - Global Information and Early Warning System, 2021. Country Briefs: south Africa. <https://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=ZAF> (ανακτήθηκε 27-12-2021)
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database, 2021. Statistics. <https://www.fao.org/statistics/en/> (ανακτήθηκε 27-11-2021)
- GAIN – Global Agricultural Information Network, 2021. Citrus Semi-annual. <https://apps.fas.usda.gov> (ανακτήθηκε 15-10-2021)
- GDO - Global Drought Observatory. *Reports of Severe Drought Events*, January 2019, <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050> (ανακτήθηκε την 18-01-2022)
- GDO - Global Drought Observatory. *Reports of Severe Drought Events*, March 2019, <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050> (ανακτήθηκε την 18-01-2022)
- GDO - Global Drought Observatory. *Reports of Severe Drought Events*, August 2019, <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050> (ανακτήθηκε την 18-01-2022)
- GDO - Global Drought Observatory. *Reports of Severe Drought Events*, December 2019, <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050> (ανακτήθηκε την 18-01-2022)

- IFRC - International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. *Southern Africa Drought (Food Insecurity)*, December 2019, <https://reliefweb.int> (ανακτήθηκε την 06-05-2022)
- NDA - National Department of Agriculture, 2019. <https://www.nda.agric.za> (ανακτήθηκε 11-10-2021)
- NIWA - National Institute of Water and Atmospheric Research New Zealand, 2021. *Climate drivers* <https://niwa.co.nz/education-and-training/schools/teaching-resources/rangi-weather-and-climate-lessons-for-teachers/lesson-6-climate-drivers> (ανακτήθηκε 10-10-2021)
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019. *El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation)*. <https://www.climate.gov/enso> (ανακτήθηκε 11-10-2021)
- OBY 2019 - Γραφείο οικονομικών και εμπορικών υποθέσεων της Νοτίου Αφρικής. *Έκθεση 2018*. <https://agora.mfa.gr/infofiles/SouthAfricaAnnualReport2018%20za.pdf> (ανακτήθηκε 02-03-2020)
- Physical Geography, 2007. *Map of Oceans currents in Earth*. PhysicalGeography.net <http://www.physicalgeography.net/> (ανακτήθηκε 26-02-2021)
- Railwaystays, 2020. *Kalahari Desert Map*. <http://railwaystays.com/world/kalahari-desert-map/attachment/kalahari-desert-map-from-no-6> (ανακτήθηκε 02-12-2021)
- Reuters. *Drought, animal disease threaten South African farmers*, 18-01-2019, <https://www.reuters.com/article/us-safrica-farmers/drought-animal-disease-threaten-south-african-farmers-idUSKCN1PC1OT> (ανακτήθηκε την 21-01-2022)
- SAG - South Africa Gateway, 2021. *South Africa's weather and climate* <https://southafrica-info.com/land/south-africa-weather-climate/> (ανακτήθηκε 02-12-2021)
- SAWS - South African Weather Service. *Warnings 2019*, <https://www.weathersa.co.za/home/warnings> (ανακτήθηκε την 05-05-2022)
- SOLAGRIS, 2020. *Solar resource maps of South Africa* <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/south-africa> (ανακτήθηκε 30-05-2022)
- USGS - United States Geological Survey. *ITF Position, 2018*. <https://www.usgs.gov/> (ανακτήθηκε 30-06-2022)
- Weather Plus. *El Niño La Niña*. <https://weather.plus/enso-index-el-nino-lanina.php> (ανακτήθηκε την 06-05-2022)
- WCG - World climate guide, 2021. *Climates to travel, South Africa*. <https://www.climatestotravel.com/climate/south-africa> (ανακτήθηκε 02-12-2021)
- WHOI - Woods Hole Oceanographic Institution, 2021. *Indian Ocean Dipole*. <https://www.whoi.edu/multimedia/indian-ocean-dipole/> (ανακτήθηκε 11-10-2021)
- WMO - World Meteorological Organization. *State of the Climate in Africa 2019, 2020*, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21778#.YotfGahBy3A (ανακτήθηκε την 06-05-2022)
- WWF - World Wildlife Fund, 2010. *Agriculture: facts and trends in South Africa*, Cape Town, 32pp <http://www.foresightfordevelopment.org/sobipro/54/908-agriculture-facts-and-trends-south-africa> (ανακτήθηκε 15-10-2021)

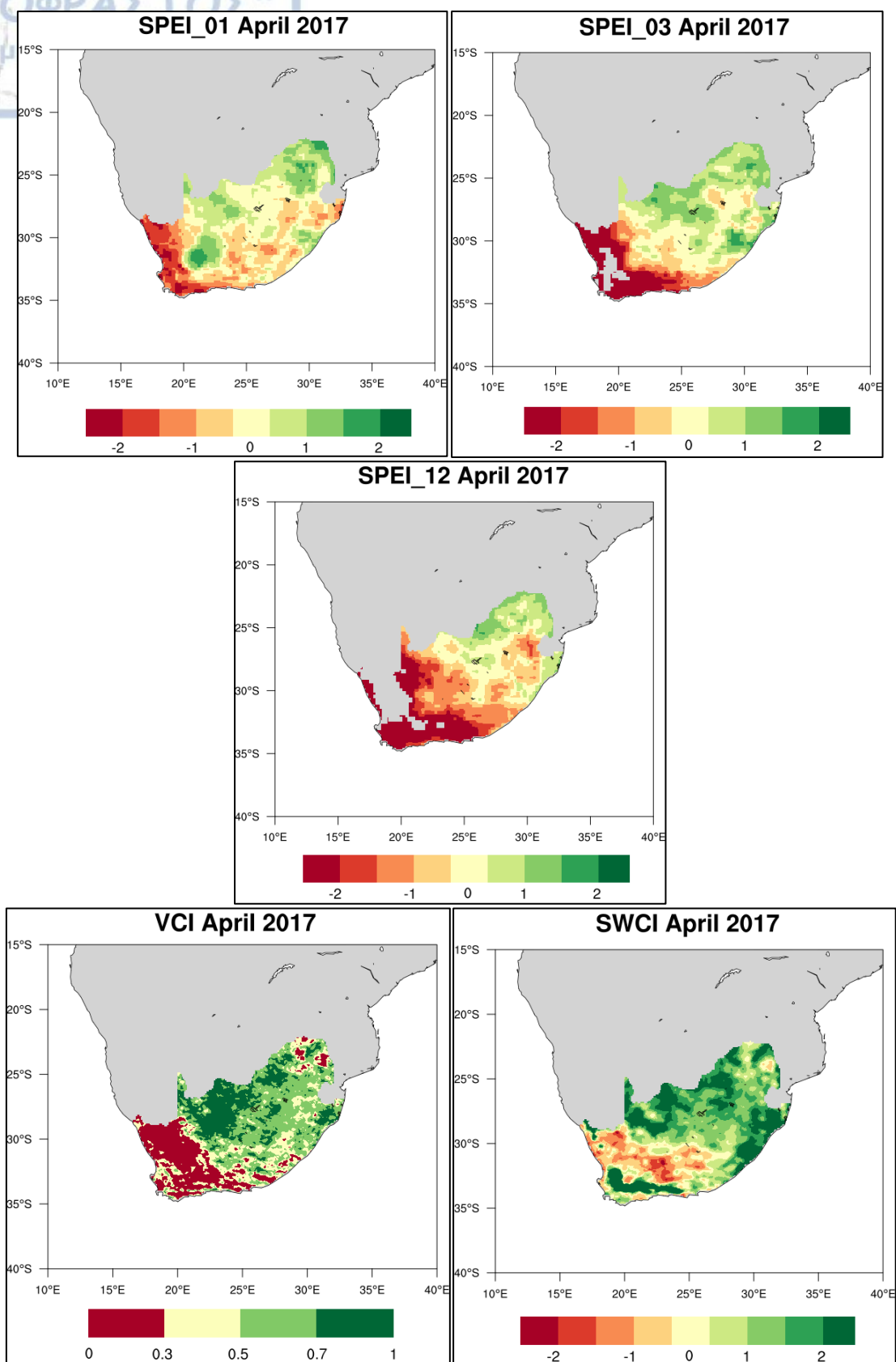


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

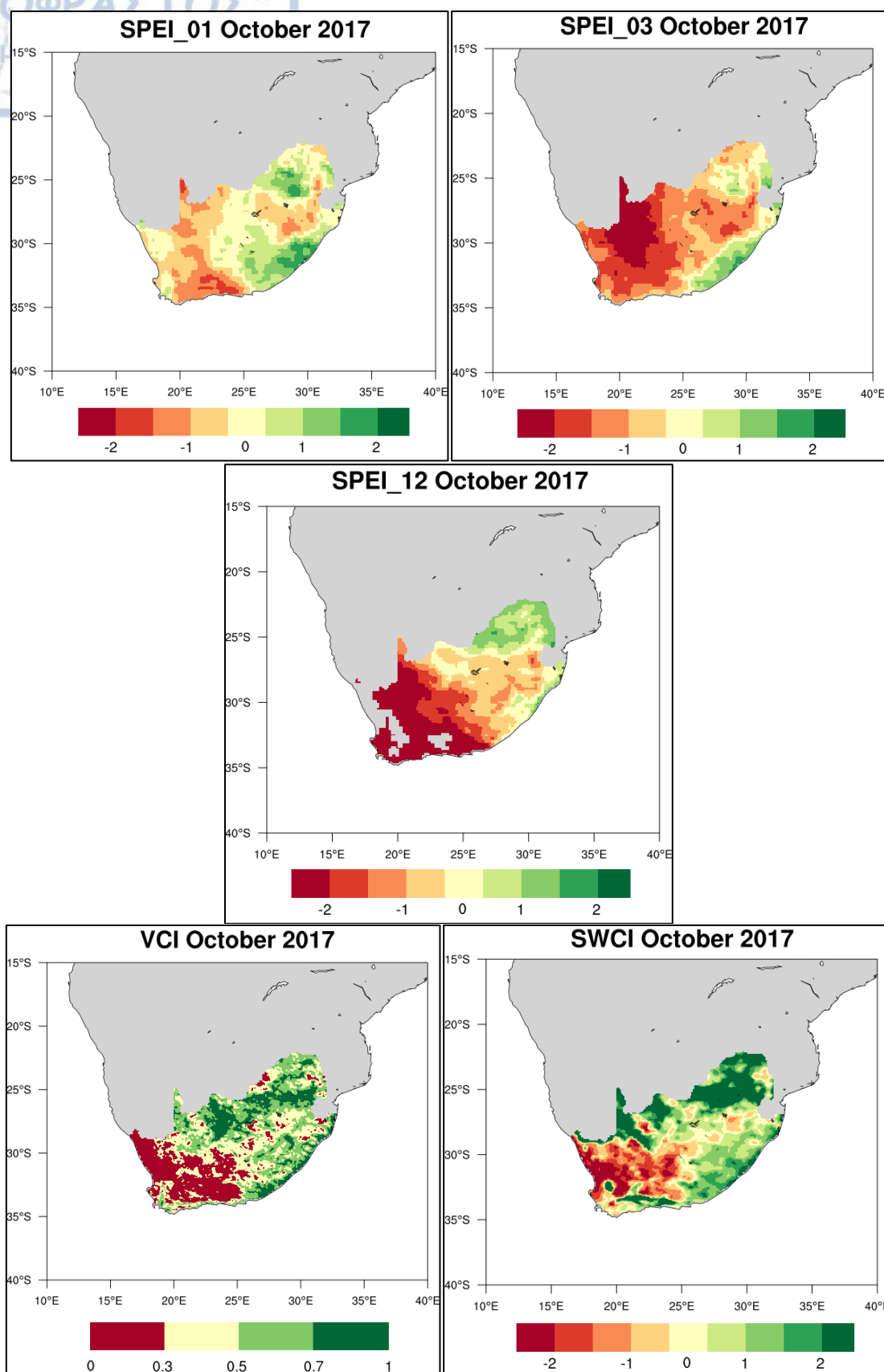
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΣΧΗΜΑΤΑ



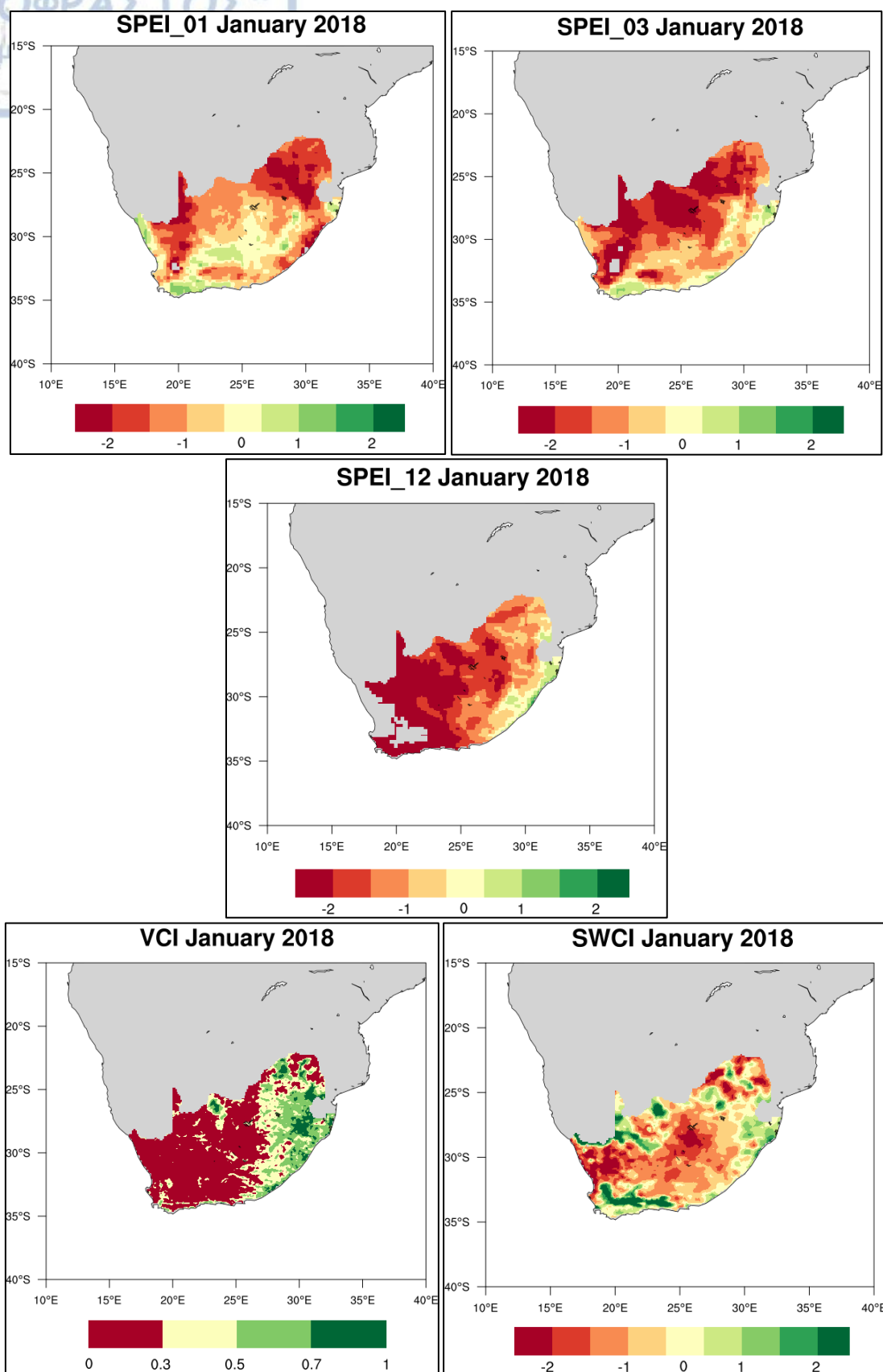
Σχήμα Παρ. 1. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), και SPEI_12 (κέντρο) για τον Ιανουάριο του 2017, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2^ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



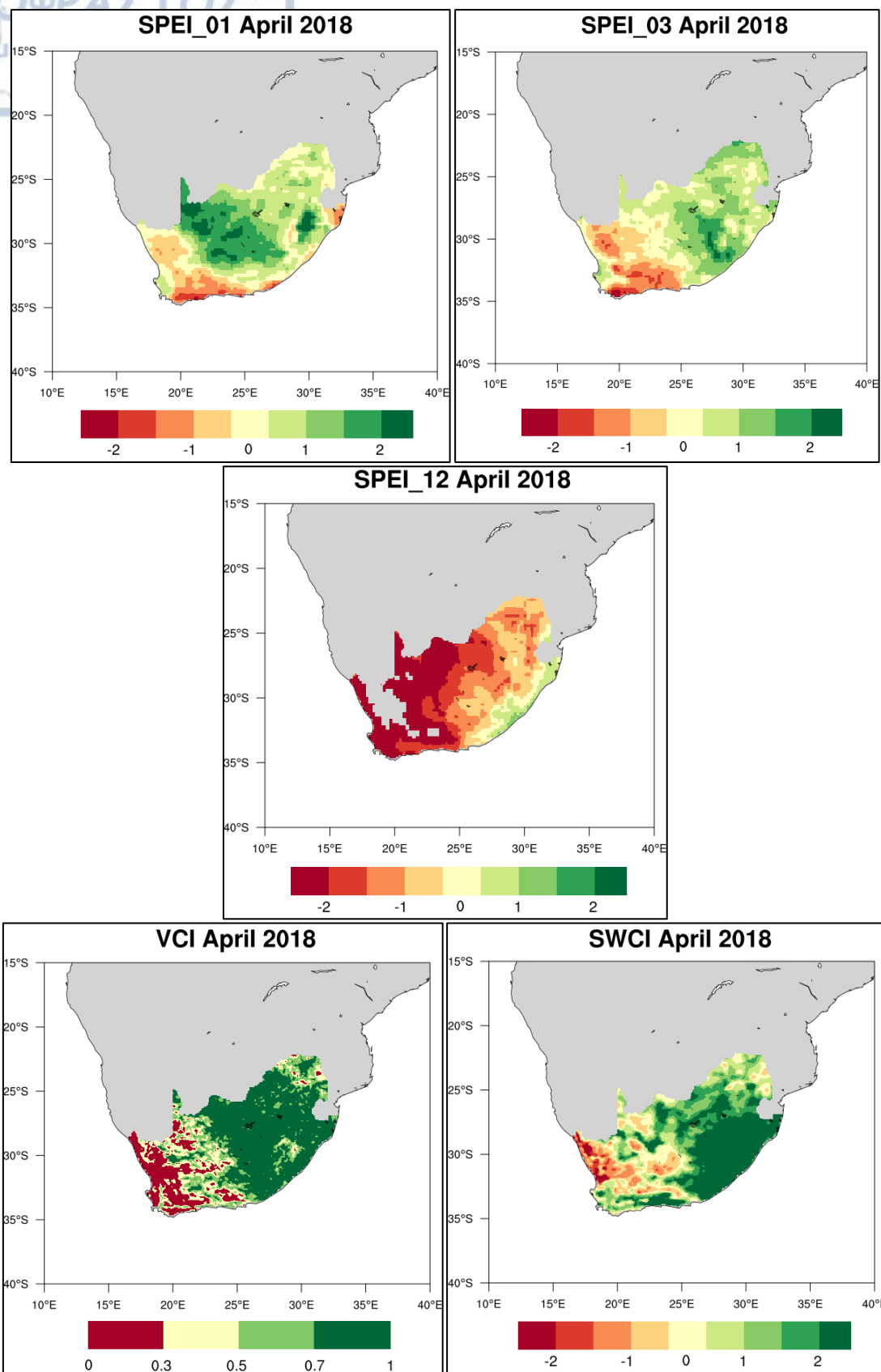
Σχήμα Παρ. 2. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), και SPEI_12 (κέντρο) για τον Απρίλιο του 2017, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2^ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



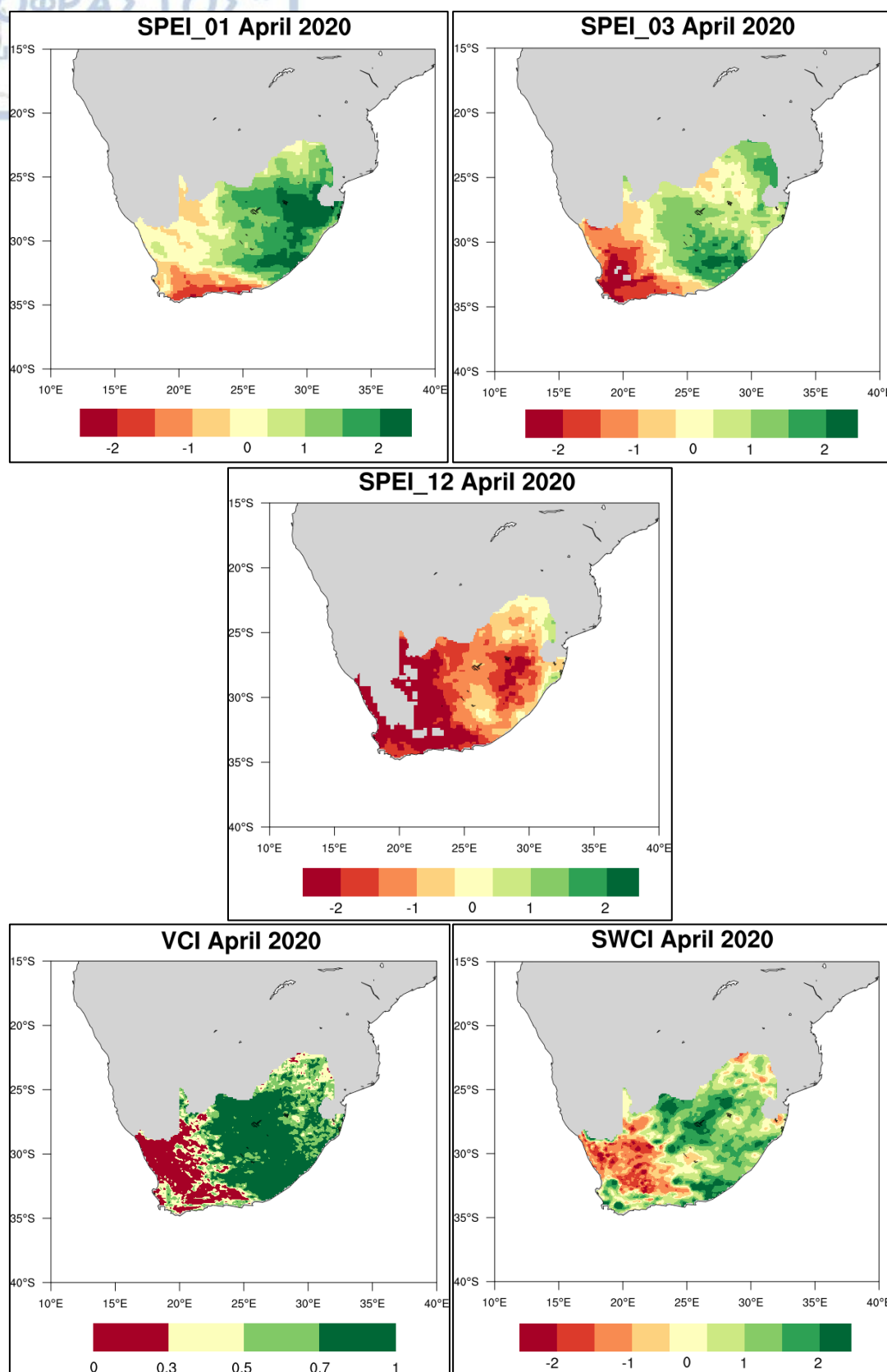
Σχήμα Παρ. 3. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), SPEI_12 (κέντρο) για τον Οκτώβριο του 2017, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



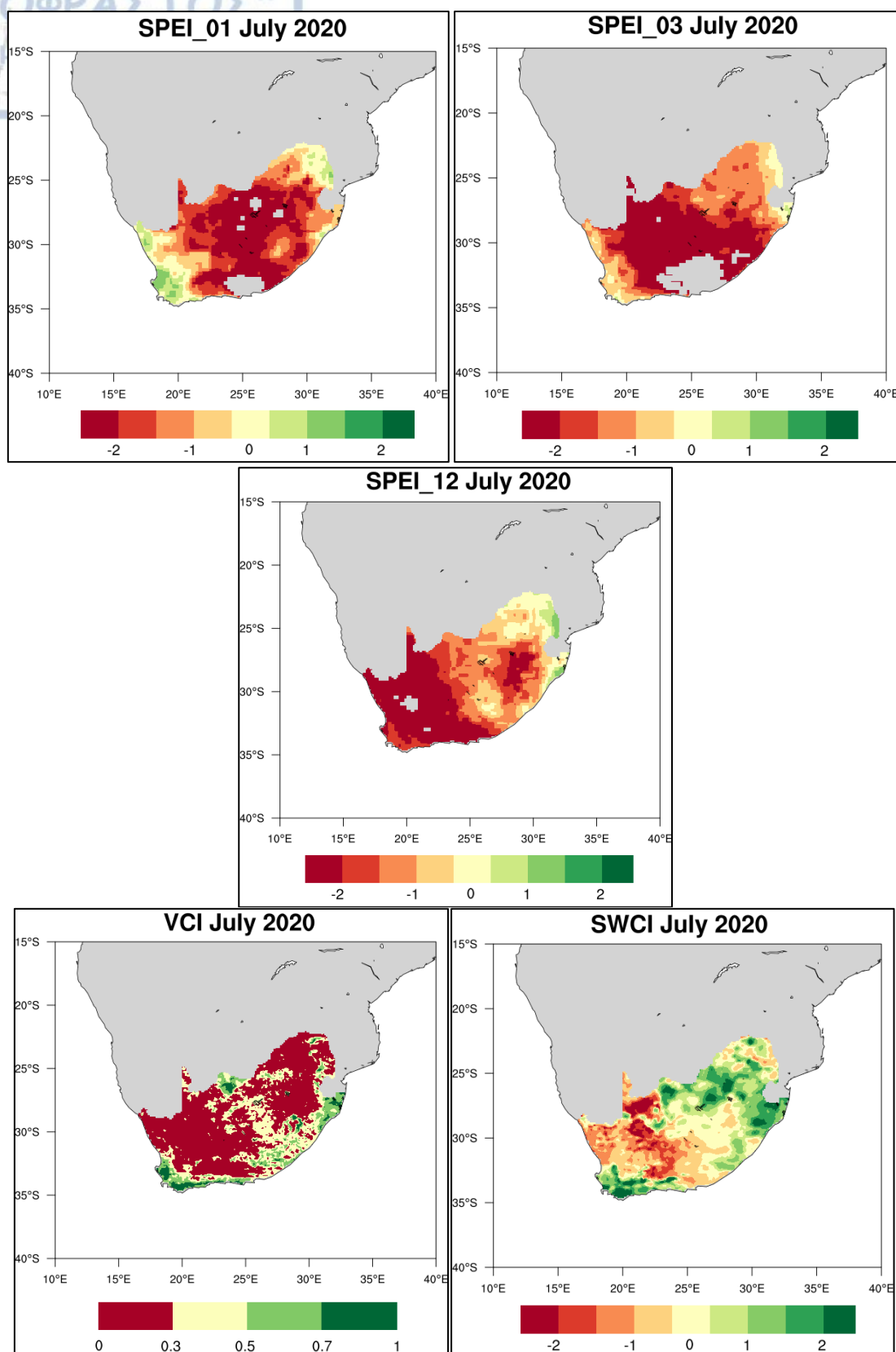
Σχήμα Παρ. 4. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), SPEI_12 (κέντρο) για τον Ιανουάριο του 2018, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



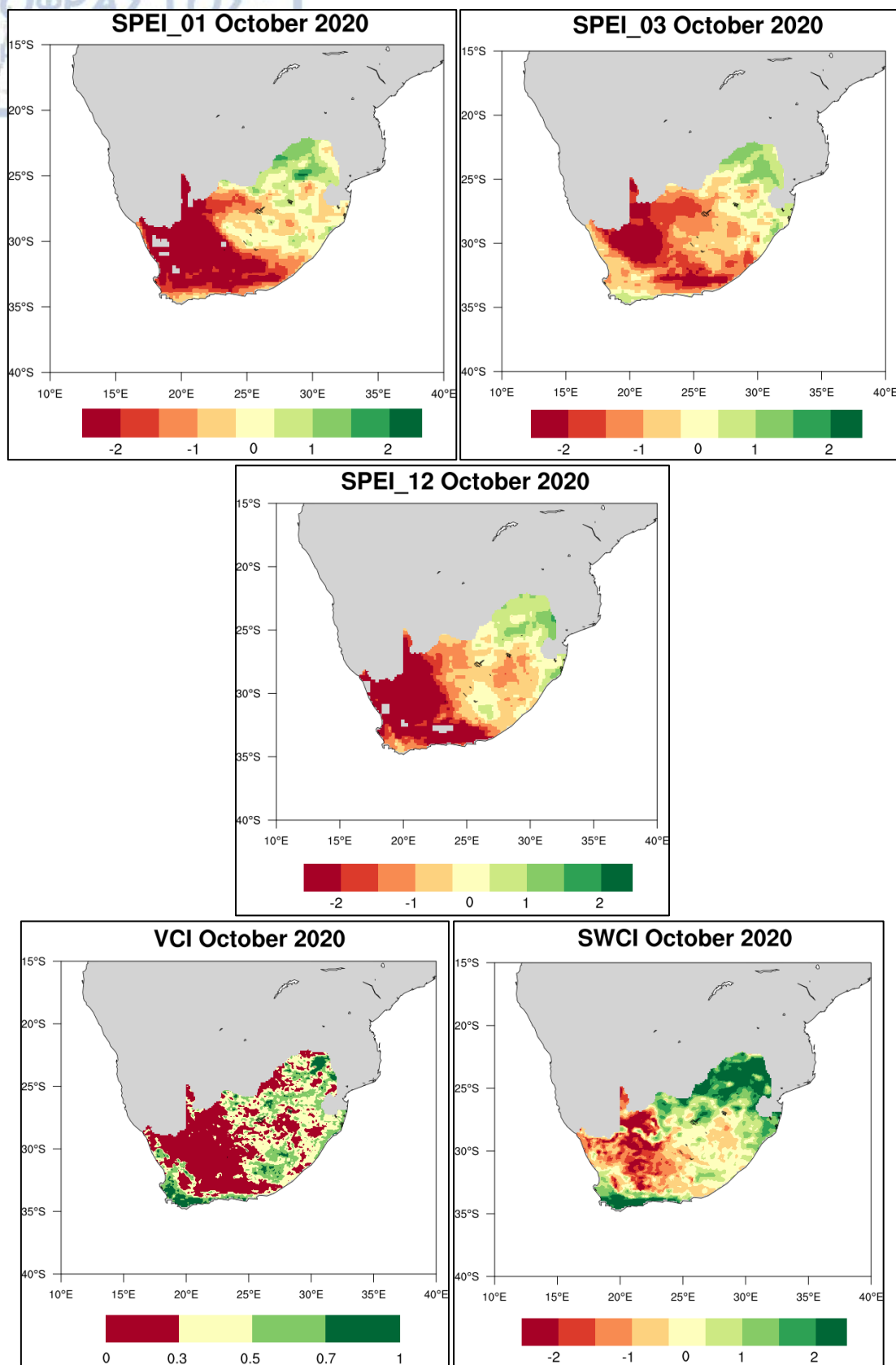
Σχήμα Παρ. 5. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), SPEI_12 (κέντρο) για τον Απρίλιο του 2018, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



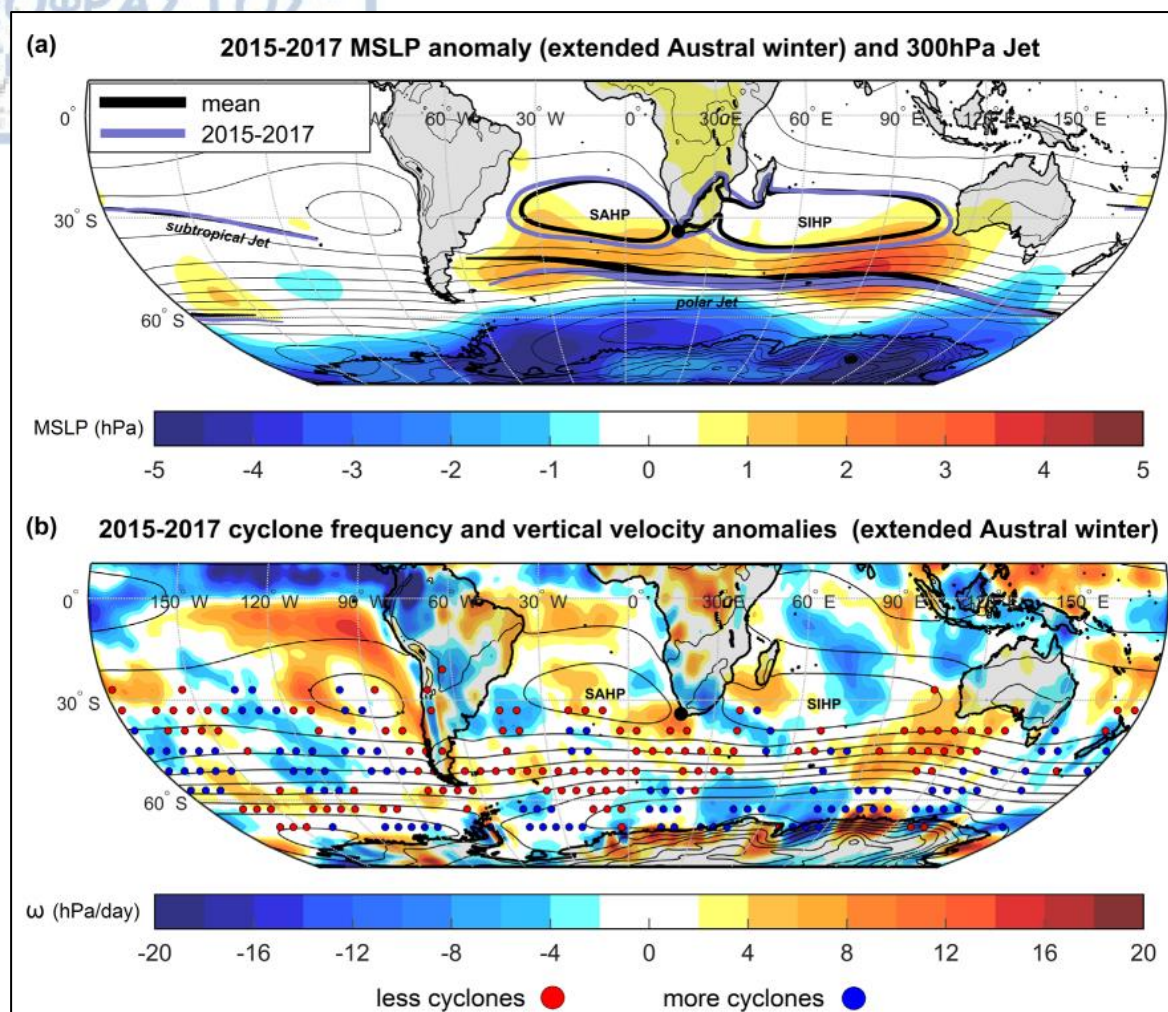
Σχήμα Παρ. 6. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), SPEI_12 (κέντρο) για τον Απρίλιο του 2020, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



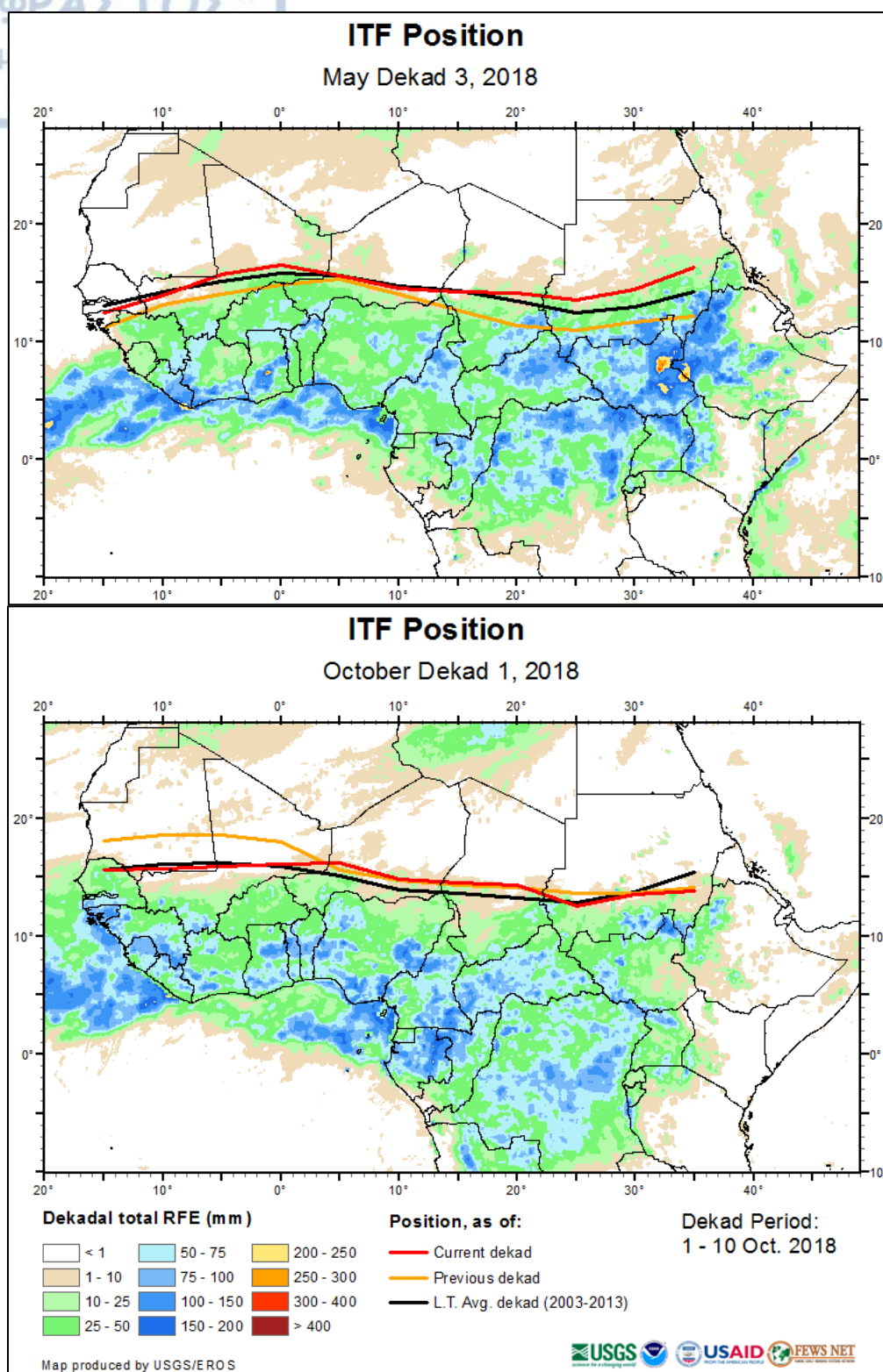
Σχήμα Παρ. 7. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), SPEI_12 (κέντρο) για τον Ιούλιο του 2020, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



Σχήμα Παρ. 8. Απεικόνιση των δεικτών SPEI_1 (πάνω - αριστερά), SPEI_3 (πάνω - δεξιά), SPEI_12 (κέντρο) για τον Οκτώβριο του 2020, και για τους VCI (κάτω - αριστερά) και SWCI (κάτω - δεξιά) για το 2ο δεκαήμερο του μήνα στην Ν. Αφρική.



Σχήμα Παρ. 9. Κυκλοφορία μεγάλης κλίμακας: **(α)** Κλιματολογία της μέσης πίεσης στην στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας (MSLP) για την περίοδο 1979-2017 (μαύρες λεπτές γραμμές ισοβαρείς ανα 4 hPa) με τις μέσες κεντρικές θέσεις του αντικυκλώνα του Νότου Ατλαντικού (SAHP) και του αντικυκλώνα του Νότιου Ινδικού (SIHP) και τις μέσες επεκτάσεις τους (λαμβάνοντας υπόψη την ισοβαρή των 1020 hPa). Οι ανωμαλίες MSLP κατά τη διάρκεια του 2015-2017 απεικονίζονται επίσης (σκιασμένα περιοχές). Η θέση του jet-stream στα 300 hPa και η επέκταση του SAHP και του SIHP απεικονίζονται από τις παχύτερες γραμμές, με μαύρο και το μωβ που αντιπροσωπεύουν την κλιματολογία και την ανωμαλία την περίοδο 2015-2017, αντίστοιχα. Περιοχές όπου οι ανωμαλίες MSLP δεν είναι στατιστικά σημαντικές (90%) απορρίφθηκαν. **(β)** Ανωμαλίες στην κατακόρυφη ταχύτητα (ω) στα 700 hPa (σκιασμένες περιοχές) κατά τη διάρκεια 2015-2017. Οι μπλε (κόκκινοι) κύκλοι αντιπροσωπεύουν περιοχές με θετικές (αρνητικές) ανωμαλίες στις συχνότητες εμφάνισης κυκλώνων κατά την ίδια περίοδο. Οι λεπτές μαύρες γραμμές είναι όπως στο πλαίσιο (α). Περιοχές όπου οι ω ανωμαλίες δεν είναι στατιστικά σημαντικές (90%) απορρίφθηκαν (Sousa et al. 2018).



Σχήμα Παρ. 10. Η θέση της ενδοτροπικής ζώνης σύγκλισης ITCZ (κόκκινη γραμμή) το 1^ο δεκαήμερο του Μαΐου του 2018 (πάνω) και το 1^ο δεκαήμερο του Οκτωβρίου του 2018 (κάτω) σε σχέση με την μέση κλιματική της θέση την περίοδο 2003-2013 (μαύρη γραμμή) και την θέση της το προηγούμενο δεκαήμερο (πορτοκαλί γραμμή) (USGS 2018)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II.

ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΤΗΣ ΝΟΤΙΑΣ ΑΦΡΙΚΗΣ

Fynbos

Το Fynbos είναι ένα ενδημικό μεγαοικοσύστημα της Ν. Αφρικής και εμφανίζεται στην νοτιοδυτική και νότια παράκτια ζώνη στις περιοχές Μεσογειακού κλίματος. Η κύρια βλάστηση είναι οι αειθαλείς θάμνοι, ενώ ένας από τους κυρίαρχους φυσικούς παράγοντες που καθορίζουν την εξέλιξη του οικοσυστήματος είναι οι πυρκαγιές και ο βαθμός επαναληψιμότητάς τους που κυμαίνεται από 5-50 χρόνια.

Το Fynbos είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένο για την αξιοσημείωτη ποικιλομορφία φυτικών ειδών και τα επίπεδα ενδημίας του με την ονομασία Cape Floristic Region (CFR), αποτελώντας έτσι ένα παγκόσμιο hot - spot βιοποικιλότητας. Επιγραμματικά, οι κύριες απειλές του Fynbos είναι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, κυρίως η αστικοποίηση, και οι φυσικές μεταβολές όπως η εισαγωγή ξένων ειδών, η τροποποίηση του υφιστάμενου καθεστώσ πυρκαγιών και η κλιματική αλλαγή (Finch and Meadows 2019).

Desert

Ερημικά οικοσυστήματα εντοπίζονται στα βορειοδυτικά της Ν. Αφρικής κατά μήκος των συνόρων με την Ναμίμπια. Κλιματικά χαρακτηριστικά της ζώνης αυτής είναι τα ύψη υετού που δε ξεπερνούν τα 100 mm ετησίως - και οι όποιες βροχοπτώσεις είναι απρόβλεπτες - σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες (Jürgens 2006). Η βλάστηση ποικίλλει από αραιή έως πυκνή, με την τελευταία να περιλαμβάνει αρωματικά φυτά, θάμνους και περιστασιακά δέντρα (Cowling et al. 2004). Το Desert Biome της Ν. Αφρικής, καθώς βρίσκεται στα όρια των ερήμων Kalahari και Namib, έχει αναπτύξει μια σειρά από μοναδικές συμπεριφορικές, μορφολογικές και φυσιολογικές προσαρμογές (Lovegrove 1993) αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής του με τα μεγαοικοσυστήματα που γειτνιάζει.

Succulent Karoo

Το Succulent Karoo Biome (μεγαοικοσύστημα παχύφυτων) βρίσκεται κατά μήκος της δυτικής ακτής της Ν. Αφρικής και είναι μια έρημος χειμερινών βροχοπτώσεων με κατά μέσο όρο 170 χιλιοστά ετησίως (Mucina et al. 2006). Παρουσιάζει μια εξαιρετική ποικιλομορφία παχύφυτων, εκ των οποίων το 40% είναι

ενδημικό, καθιστώντας το ένα από τα δύο hot spot βιοποικιλότητας σε ξηρές περιοχές στον κόσμο (Mittermeier et al. 2004). Το Succulent Karoo είναι καλά διατηρημένο σε σχέση με άλλα hot-spots βιοποικιλότητας παγκοσμίως, καθώς οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι έως και το 29% της έκτασής του παραμένει σε σχετικά αδιατάρακτη κατάσταση (Brooks et al.2004).

Nama-Karoo

Το Nama-Karoo Biome καταλαμβάνει το δυτικό εσωτερικό της Ν. Αφρικής (επαρχία Northern Cape). Είναι ένα ημι-άνυδρο έως άνυδρο μεγαοικοσύστημα, το οποίο λαμβάνει ετήσιες βροχοπτώσεις 70–500 mm (Mucina et al. 2006) και χαρακτηρίζεται από θάμνους χαμηλής ανάπτυξης και βιομάζας, καθώς και από χαμηλή βλάστηση κατάλληλη για βόσκηση. Παρά τη σχετικά χαμηλή παραγωγικότητα (Meadows 2000), το Nama-Karoo είναι μια σημαντική πηγή βόσκησης για τις βιομηχανίες παραγωγής κρέατος στην Ν. Αφρική. Για τους ανωτέρω λόγους είναι πολύ ευαίσθητο σε διαταραχές λόγω υπερβόσκησης. Άλλοι κίνδυνοι διατάραξης της συνοχής του οικοσυστήματος είναι οι πυρκαγιές, η διάβρωση του εδάφους και η μελλοντική εκμετάλλευση των σχιστολιθικών εδαφών του για την παραγωγή ενέργειας.

Albany Thicket

Το Albany Thicket Biome αποτελείται από πυκνούς, ακανθωτούς, παχύφυτους θάμνους και μικρά δέντρα (Cowling et al. 2005), και περιγράφεται από τους Rutherford et al. (2012) ως μια περιοχή ξηρού, χαμηλού δάσους. Βρίσκεται κατά μήκος της νοτιοανατολικής ακτής της Ν. Αφρικής στο όριο της ετήσιας ζώνης βροχόπτωσης (ARZ) και της θερινής ζώνης βροχόπτωσης (SRZ). Το συγκεκριμένο μεγαοικοσύστημα λαμβάνει 200-900 mm μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, η οποία εμφανίζει ενδοετήσια δύο μέγιστα χωρίς καθαρή περίοδο ξηρασίας. Επίσης, αποτελεί το νοτιοδυτικό τμήμα του hot-spot βιοποικιλότητας Maputaland – Pondoland - Albany (Steenkamp et al. 2004). Η υποβάθμιση της γης, η διάβρωση και η υπερβόσκηση αποτελούν απειλές για το οικοσύστημα που χαρακτηρίζεται ως ένα από τα πιο εκτεταμένα υποβαθμισμένα οικοσυστήματα στη χώρα.

Savanna

Η βιοκλιματική ζώνη της Σαβάνας καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση της Ν. Αφρικής, σε σχέση με τα υπόλοιπα μεγαοικοσυστήματα, και αποτελεί την νοτιότερη

επέκταση των αφρικανικών σαβανών. Εντοπίζεται στα βόρεια της χώρας, καθώς και στο εσωτερικό της ανατολικής παράκτιας ζώνης. Κυριαρχεί η υψηλή ποώδης και θαμνώδης βλάστηση με παρουσία διάσπαρτων μόνο δένδρων. Αυτός ο τύπος βλάστησης διανέμεται στην θερμή ζώνη βροχοπτώσεων (SRZ) και χαρακτηρίζεται από μια υγρή περίοδο (DJF) και από μια διακριτή ξηρή περίοδο (JJA) (Cowling et al. 2004). Οι σαβάνες της Ν. Αφρικής είναι οικονομικά σημαντικές, συμβάλλοντας σε μια ποικιλία τύπων χρήσης γης, όπως η εκτροφή, η καλλιέργεια και ο τουρισμός μεταξύ άλλων (Grossman and Gandar 1989) Συγκεκριμένα, η Savanna φημίζεται για τη μεγάλη πανίδα θηλαστικών (Rutherford et al. 2006), που αποτελεί ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της βιομηχανίας τουρισμού της άγριας ζωής της Ν. Αφρικής. Επιπλέον, οι σαβάνες παρέχουν μια σειρά φυσικών πόρων για τις γύρω κοινότητες, όπως ξυλεία, φρούτα, λαχανικά και χορτοδοτικά προϊόντα ζωοτροφών (Shackleton 2004). Σημαντικές απειλές για το μεγαοικοσύστημα αποτελούν τα είδη ξενιστές, η υπερεκμετάλλευση και ο μετασχηματισμός των ενδιαιτημάτων (π.χ. για αστική ανάπτυξη ή γεωργία).

Grassland

Το Grassland Biome βρίσκεται στις κεντρικές ηπειρωτικές περιοχές της Ν. Αφρικής, συμπεριλαμβανομένου του κεντρικού οροπεδίου και του ανατολικού Great Escarpment. Χαρακτηρίζεται κλιματολογικά από ψυχρούς, ξηρούς χειμώνες και χιονοπτώσεις σε μεγάλα υψόμετρα. Βρίσκεται στην θερμή ζώνη βροχοπτώσεων (SRZ) και λαμβάνει μέση ετήσια βροχόπτωση 400-2.500 mm (Carbutt et al. 2011). Ένα στρώμα βλάστησης που κυριαρχείται από γρασίδι είναι χαρακτηριστικό αυτού του οικοσυστήματος. Τα λιβάδια της Ν. Αφρικής είναι πλούσια σε ποικιλομορφία φυτικών ειδών (Cowling et al. 2004), ενώ η παραγόμενη βιομάζα είναι πλούσια και υψηλής θρεπτικής αξίας. Οι μείζονες απειλές του περιλαμβάνουν τους τομείς της γεωργίας, της εξόρυξης και της δασοκομίας, με σχετικά λίγα λιβάδια να προστατεύονται βάσει κάποιου νομικού πλαισίου.

Forest

Το Forest αποτελεί τη μικρότερη, σε έκταση, από τις βιοκλιματικές ζώνες της Ν. Αφρικής και εντοπίζεται στις νότιες ακτές της χώρας κατά μήκος του Great Escarpment και των παράκτιων πεδινών περιοχών. Εμφανίζει δύο τύπους δασών, το Afrotropical (Southern Cape Forests) και το παράκτιο. Τα δάση Afrotropical εντοπίζονται στο γκρεμό και κατά μήκος της ακτής του νότιου ακρωτηρίου, και

αποτελούν μέρος της περιοχής Afromontane. Τα παράκτια δάση εμφανίζονται στις παράκτιες περιοχές του KwaZulu-Natal και στο Ανατολικό Ακρωτήριο (Eastern Cape). Η σύνθετη δομή με πολυστρωματικούς θόλους κυριαρχείται από αειθαλή και φυλλοβόλα δέντρα, με ύψος που κυμαίνεται από 3 έως 30 μέτρα (Mucina et al. 2006). Κατά την αποικιακή περίοδο, πολλά δάση εκμεταλλεύτηκαν σε μεγάλο βαθμό για τη συγκομιδή ξυλείας, επηρεάζοντας τη σύγχρονη δασική ποικιλομορφία (Adie et al. 2013). Τα δάση της Ν. Αφρικής συνεχίζουν να παρέχουν μια σημαντική βάση φυσικών πόρων όπως ξυλεία, φαρμακευτικά φυτά, υλικά χειροτεχνίας, καύσιμα, δομικά στοιχεία, μέλι και κυνήγι (Lawes et al. 2004), από την οποία οι αγροτικές κοινότητες εξαρτώνται σημαντικά. Η καταστροφή και ο κατακερματισμός των ενδιαιτημάτων αποτελούν ανησυχία για τη διατήρηση των δασών στη Ν. Αφρική, με συγκεκριμένα ζητήματα, συμπεριλαμβανομένης της επιλεκτικής υλοτομίας και της λαθροθηρίας (Castley and Kerley 1996).

Indian Ocean Coastal Belt

Η παράκτια ζώνη του Ινδικού Ωκεανού (Indian Ocean Coastal Belt) εκτείνεται κατά μήκος μιας στενής λωρίδας μήκους 800 km από τα σύνορα της Μοζαμβίκης έως το Eastern Cape (Mucina et al. 2006). Η συγκεκριμένη βιοκλιματική ζώνη είναι πυκνοκατοικημένη και σε μεγάλο βαθμό μετασχηματισμένη, παρουσιάζοντας έτσι σήμερα μια πολύ διαφορετική εικόνα σε σχέση με την αρχική της. Οι Mucina et al. (2006) υποστηρίζουν την άποψη ότι, πριν από τον μετασχηματισμό, η παράκτια ζώνη αποτελούνταν κυρίως από δασική βλάστηση και διάσπαρτα λιβάδια σε περιοχές με κατάλληλα εδάφη και διαθεσιμότητα υγρασίας. Το Indian Ocean Coastal Belt αποτελεί μέρος του hot-spot βιοποικιλότητας Maputaland-Pondoland-Albany, του δεύτερου πλουσιότερου στην Αφρική με βάση τον αριθμό των ειδών (Steenkamp et al. 2004). Σημαντικές απειλές για τη διατήρηση του μεγαοικοσυστήματος αποτελούν η γεωργία, και η δασική εκμετάλλευση, καθώς και η περαιτέρω αστική ανάπτυξη.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ (STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX - SPI)

Ο υπολογισμός του SPI πραγματοποιείται με την κατανομή Γάμμα:

$$P(x) = \frac{x^{a-1} e^{-x/\beta}}{\beta^a \Gamma(\alpha)} \quad \alpha > 0$$

Ο υπολογισμός των παραμέτρων α και β μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα (1, 3, 6, 9, 12 μήνες). Ο προσδιορισμός των παραμέτρων γίνεται με τις εξισώσεις:

$$\alpha = \left(\frac{1}{4A}\right) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right), \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

όπου $A = \ln \bar{x} - (\sum \ln(x) / n)$ και n ο αριθμός των παρατηρήσεων. Για το λόγο του ότι η συνάρτηση Γάμμα δεν ορίζεται για $x = 0$, ενώ η χρονοσειρά της βροχόπτωσης είναι δυνατόν να περιλαμβάνει μηδενικές τιμές. Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας παίρνει τη μορφή:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x)$$

όπου q είναι η πιθανότητα μηδενικών τιμών, $G(x)$ είναι η αθροιστική πιθανότητα της μη πλήρους συνάρτησης Γάμμα. Η αθροιστική πιθανότητα $H(x)$ μετασχηματίζεται στην τυποποιημένη τυχαία μεταβλητή Z με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση ένα, η οποία δίνει τις τελικές τιμές του SPI σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Z_{SPI} = \frac{(X_{ij} - X_{im})}{\sigma}$$

όπου X_{ij} είναι η εποχική βροχόπτωση σε ένα συγκεκριμένο σταθμό, X_{im} η μέση εποχική βροχόπτωση και σ είναι η τυπική απόκλιση (Bhuiyan et al. 2006, Khalili et al. 2011).