



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία:
Εφαρμογή στις λεκάνες απορροής Πύλης και Μουζακίου.



Λαζάρου Δημήτριος

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ευχαριστίες	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Κατάλογος συμβόλων	viii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική Τοποθέτηση του Προβλήματος	1
1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας	1
2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	3
2.1 Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας	3
2.1.1 Υδρολογικά χαρακτηριστικά	3
2.1.2 Ατμοσφαιρικά-κλιματολογικά χαρακτηριστικά.....	4
2.1.3 Γεωλογικά-γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.....	5
2.2 Οι λεκάνες Πύλης και Μουζακίου	5
2.2.1 Οι λεκάνες ανάντη των υδρομετρικών σταθμών	6
2.2.2 Κλιματικές συνθήκες	6
2.2.3 Έδαφος-γεωλογία.....	7
2.2.4 Επιφανειακοί-υπόγειοι υδατικοί πόροι	7
2.2.5 Χρήσεις νερού.....	8
3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ-ΑΠΟΡΡΟΗΣ SWAT	9
3.1 Ορισμός Μοντέλου Βροχόπτωσης-Απορροής	9
3.2 Γενική Ταξινόμηση Μοντέλων.....	9
3.3 Το Μοντέλο SWAT.....	10
3.3.1 Γενικά για τη λειτουργία του μοντέλου	11
3.3.2 Περιγραφή του μοντέλου	14
3.3.3 Επιλογή λογισμικού	23
3.4 Άλλα Μοντέλα Βροχόπτωσης-Απορροής	24
3.4.1 Μοντέλο απλού υδατικού ισοζυγίου.....	24
3.4.2 Συνοπτική παρουσίαση υπόλοιπων μοντέλων	24
3.4.3 Μελλοντικές ανάγκες χρήσης μοντέλων.....	28
3.5 Βαθμονόμηση Μοντέλων - Δείκτες Καταλληλότητας.....	28
3.5.1 Είδη βαθμονόμησης.....	29
3.5.2 Δείκτες καταλληλότητας.....	30

3.5.3	Επαλήθευση	30
4	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	31
4.1	Προετοιμασία Γεωγραφικών Δεδομένων	31
4.1.1	Γενικά.....	31
4.1.2	Ψηφιοποίηση των χαρτών της ΓΥΣ	31
4.1.3	Δημιουργία Ψ.Μ.Ε.	33
4.1.4	Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής	34
4.1.5	Εδαφολογικά στοιχεία.....	35
4.1.6	Χρήσεις γης.....	36
4.2	Προετοιμασία Υδρολογικών Δεδομένων	37
4.2.1	Βροχομετρικά δεδομένα.....	37
4.2.2	Υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα	42
4.2.3	Εξάτμιση και Διαπνοή.....	46
5	ΞΗΡΑΣΙΑ	48
5.1	Εισαγωγή	48
5.2	Ορισμοί και τύποι της Ξηρασίας	48
5.2.1	Υδρολογική ξηρασία.....	49
5.3	Δείκτες ξηρασίας	50
5.3.1	Ο Δείκτης Ξηρασίας SDI (Streamflow Drought Index).....	53
6	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	56
6.1	Γενικά.....	56
6.2	Κύρια Αίτια του Φαινομένου	56
6.3	Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής.....	57
6.3.1	Κλίμα.....	57
6.3.2	Υδατικά αποθέματα	59
6.3.3	Άνοδος της στάθμης της θάλασσας	60
6.3.4	Γεωργία	62
6.3.5	Αλιεία και υδατοκαλλιέργειες.....	63
6.3.6	Βιοποικιλότητα και οικοσυστήματα	64
6.3.7	Μεταφορές και δομημένο περιβάλλον.....	65
6.3.8	Υγεία	66
6.4	Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC)	68
6.4.1	Τέταρτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (2007)	69
6.4.2	Πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (2012).....	76
6.5	Κλιματικά Μοντέλα Πρόβλεψης.....	77

6.5.1	Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (ΑΟΓCMs)	78
6.5.2	Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (RCMs).....	79
6.5.3	Παγκόσμιο Κλιματικό Μοντέλο 3 ^{ης} Γενιάς (CGCM3)	80
6.5.4	Το πρόγραμμα PRUDENCE	81
6.5.5	Το πρόγραμμα ENSEMBLES.....	82
6.6	Επιτροπή Μελέτης των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής.....	83
6.6.1	Γενικά.....	83
6.6.2	Η Έκθεση	84
6.6.3	Η συνεισφορά του Κέντρου Έρευνας Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας	86
7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT ΣΤΙΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΠΥΛΗΣ ΚΑΙ ΜΟΥΖΑΚΙΟΥ	90
7.1	Διαθεσιμότητα Δεδομένων	90
7.2	Δεδομένα Εισόδου	91
7.2.1	Χάραξη Υδροκρίτη	91
7.2.2	Ανάλυση Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης	93
7.2.3	Εγγραφή Δεδομένων Εισόδου.....	96
7.2.4	Επεξεργασία Δεδομένων Εισόδου SWAT	98
7.2.5	Προσομοίωση SWAT	99
7.3	Βαθμονόμηση Μοντέλου.....	100
7.3.1	Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης	101
7.3.2	Βέλτιστες τιμές παραμέτρων.....	103
7.4	Μελέτη Χαρακτηριστικών Ξηρασίας Ιστορικής Χρονοσειράς.....	104
7.4.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων με βάση τον δείκτη SDI.....	104
8	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ	107
8.1	Εισαγωγή	107
8.2	Παραγωγή Μελλοντικών Χρονοσειρών.....	107
8.2.1	Η Κασταλία για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών.....	107
8.2.2	Οι συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.....	112
8.3	Δεδομένα Κέντρου Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας	115
8.3.1	Μεταβολές βροχόπτωσης.....	116
8.3.2	Μεταβολές θερμοκρασίας.....	117
8.3.3	Μεταβολές υπόλοιπων ατμοσφαιρικών παραμέτρων	119
8.4	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Χρονοσειρών Μελλοντικών Απορροών	121
8.5	Έλεγχος Ξηρασίας με τον Δείκτη SDI	122
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129

9.1	Συμπεράσματα.....	129
9.2	Προτάσεις.....	130
Αναφορές		132
	Στην ελληνική γλώσσα.....	132
	Ξενόγλωσσες.....	133
Παράρτημα Α: Πίνακες		136
Παράρτημα Β: Σχήματα		140

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Ναλμπάντη Ιωάννη, Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε και την καθοδήγηση και επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας μελέτης. Επίσης, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κα. Στάμου Λήδα, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, που με βοήθησε σε ότι αφορά το λογισμικό ArcGIS, με οδηγίες και συμβουλές από την κατασκευή χαρτών έως την τελειοποιημένη αισθητική βελτίωση τους. Παράλληλα, να ευχαριστήσω τους κ. Τζελέπη Νικόλαο και Πανόπουλο Ιωάννη, του Κέντρου Γεωπληροφορικής για την πολύτιμη βοήθεια τους, καθώς επίσης και τον κ. Κουβόπουλο Ιωάννη, Πολιτικό Μηχανικό και Τομεάρχη Υδρολογίας της ΔΕΗ, για την παροχή επιπρόσθετων βροχομετρικών δεδομένων που χρειαστήκαμε. Επιπρόσθετα, οφείλω να ευχαριστήσω τις κυρίες Κουκοπούλου Ειρήνη και Αντωνακάκη Θεοδώρα της Τράπεζας της Ελλάδος για την βοήθεια τους και τη μεσολάβηση τους με το Κέντρο Ερεύνης Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών, ενώ ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω και στον κ. Καψωμενάκη Ιωάννη, Διδάκτορα Κλιματολογίας και επιστημονικό συνεργάτη του ΚΕΦΑΚ, αφού χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του για την χορήγηση των κλιματικών μεταβολών των παραμέτρων, η διπλωματική αυτή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που μου συμπαραστάθηκαν όλο αυτό τον καιρό και ιδιαίτερα την Κατερίνα, και φυσικά τους γονείς μου για τη διαρκή υποστήριξή τους, που συνέβαλλε στην επιτυχή ολοκλήρωση του τεύχους αυτού αλλά και των σπουδών μου συνολικά.

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία αυτή πραγματεύεται την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία. Η μελέτη των χαρακτηριστικών της υδρολογικής ξηρασίας υπό την επίδραση κλιματικών αλλαγών εκτιμήθηκε μέσω των χαμηλών απορροών με τη χρήση δείκτη υδρολογικής ξηρασίας, τον δείκτη SDI (Streamflow Drought Index). Η περιοχή μελέτης που μας ανατέθηκε και εφαρμόσαμε τις υπολογιστικές τεχνικές που παρουσιάζονται είναι η περιοχή των λεκανών απορροής Πύλης και Μουζακίου, δύο γειτονικών λεκανών στα δυτικά όρια του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Αρχικό βήμα ήταν η συγκέντρωση όλων των μετεωρολογικών δεδομένων και η κατασκευή όλων των απαραίτητων ψηφιακών χαρτών που απαιτούνται για την προσομοίωση του μοντέλου SWAT (Soil & Water Assessment Tool), αφού αυτό χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής. Το SWAT, ως ολοκληρωμένο μοντέλο φυσικής βάσης για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου, απαιτεί λεπτομερή περιγραφή της λεκάνης απορροής, ως προς το ανάγλυφο, τις χρήσεις γης και το έδαφος και τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες. Οι σχετικοί χάρτες προέκυψαν από ψηφιοποίηση στο περιβάλλον του ArcGIS, στο οποίο στη συνέχεια εργαστήκαμε και για τη λειτουργία του μοντέλου (εργαλείο ArcSWAT). Τα μετεωρολογικά δεδομένα έπρεπε να είναι σε ημερήσιο βήμα για τις βροχοπτώσεις και τις θερμοκρασίες αέρα, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι αρκούσε να είναι σε μηνιαίους μέσους όρους. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από υπάρχουσες μελέτες, αλλά και δημόσιους φορείς (ΔΕΗ), ενώ τα κενά στις μετρήσεις έπρεπε να συμπληρωθούν. Επόμενο στάδιο αποτέλεσε η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα για την προσομοίωση μέσω του μοντέλου. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε χειροκίνητα αλλάζοντας τιμές σε παραμέτρους σημαντικές (δηλαδή με σημαντική επίδραση στην απορροή), ενώ τα αποτελέσματα ελέγχονταν κάθε φορά με ιστορικές παροχομετρήσεις της κάθε λεκάνης, χρησιμοποιώντας έναν δείκτη καταλληλότητας. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε γέννηση συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας μέσω του υπολογιστικού υποσυστήματος Κασταλία, για το οποίο επιλέχθηκαν χρονοσειρές διάρκειας 80 ετών, από το 2020 έως το 2100, ώστε να εφαρμόσουμε τις κλιματικές αλλαγές. Οι κλιματικές αλλαγές εξετάστηκαν υπό τα Σενάρια Αερίων Εκπομπών (SRES) που προτείνονται από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), ενώ οι κλιματικές μεταβολές εφαρμόστηκαν για τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100, υπό τα σενάρια A1B, A2 και B2. Οι κλιματικές μεταβολές ελήφθησαν όπως αυτές εκτιμήθηκαν για κάθε σενάριο μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης περιοχικών κλιματικών μοντέλων (PRUDENCE & ENSEMBLES). Οι εκτιμήσεις έγιναν από το Κέντρο Ερεύνης Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών και μας χορηγήθηκαν. Εφαρμόζοντας τις μεταβολές αυτές στις συνθετικές χρονοσειρές, λάβαμε νέα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο και λήφθηκαν νέα αποτελέσματα απορροών υπό το σενάριο A1B για την πρώτη περίοδο και υπό τα 3 σενάρια για τη δεύτερη. Τα τελικά αποτελέσματα των προσομοιωμένων απορροών προέκυψαν βάσει των τιμών που δόθηκαν για τις ιστορικές απορροές. Σε κάθε περίπτωση, έγινε η παραδοχή ότι δεν υπάρχουν μεταβολές στις χρήσεις γης για το χρονικό ορίζοντα που μελετάμε. Οι μηνιαίες χρονοσειρές απορροών μας βοήθησαν να εκτιμήσουμε την υδρολογική ξηρασία με χρήση του δείκτη SDI, παρουσιάζοντας τα συγκριτικά αποτελέσματα και εξάγοντας τα τελικά συμπεράσματα για την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία για μελλοντικό χρονικό ορίζοντα ως το 2100.

Abstract

The current thesis addresses the impact of climate change on hydrological drought. The characteristics of hydrological drought under the impact climate change were assessed through using a well-known hydrological drought index, the SDI (Streamflow Drought Index). The study area is comprised of the drainage basins of Pyli and Mouzaki at the western boundaries of the Thessaly Water District. The first step was to collect all the meteorological and hydrological data that are required and construct all digital maps needed for the simulation of SWAT (Soil & Water Assessment Tool), since this was selected as the rainfall-runoff model for hydrological simulation. The SWAT, as a physics-based model simulating the hydrological cycle, requires a detailed description of the drainage basin, as to its terrain, land use and soil. All maps were constructed after digitizing conventional maps in the environment of ArcGIS, in which the model (ArcSWAT) was also embedded. The meteorological data must be on a daily time step for the time series of precipitation and air temperature, while the remaining variables were monthly means. Those data were collected from existing studies, and public entities, though their gaps of measurements needed to be filled. The next step was the import of data in the program. The model was calibrated manually by altering the values of parameters that significantly affected streamflow, while the results were checked against historical observed streamflows for each basin, using an efficiency criterion. Afterwards, we carried out the construction of synthetic time series for precipitation and temperature through the computer system known as “Castalia”. The final time series concerned an 80-year period, i.e. from 2020 to 2100, in which we implement the climate changes. Climate change is examined under the Special Report on Emissions Scenarios (SRES) proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Those changes applied at two periods, 2020-2050 and 2070-2100, under scenarios A1B, A2 and B2. Parameters’ climate changes were estimated for each scenario through simulation programs using regional climate models (PRUDENCE & ENSEMBLES). The final estimates were obtained from the Research Centre for Atmospheric Physics and Climatology, of Academy of Athens and those were given to us. Applying these changes on synthetic time series, we obtain new data for the model and we extract new results for streamflows under scenario A1B for the first period and under the three scenarios for the second one. The final streamflows were simulated using the parameter values obtained for the historical runoff simulation. In each case, it was assumed that there are no changes on land uses, for the future time horizon we are studying. The monthly streamflows were used to assess the hydrological drought using the SDI. Finally, we created comparative charts of the results and drawn conclusions regarding the impact of climate change on hydrological drought at a future horizon till 2100.

Κατάλογος συμβόλων

S_{\max}	Μέγιστη αποθηκευτικότητα του εδάφους
t	Χρονική στιγμή
S_t	Απόθεμα εδαφικής υγρασίας
Δt	Χρονικό διάστημα
$S_{t+\Delta t}$	Απόθεμα εδαφικής υγρασίας στους χρόνους $t+\Delta t$
P_t	Χωρικά μέση βροχόπτωση σε όρους όγκου νερού
E_t	Χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή
Q_t	Απορροή στην έξοδο της λεκάνης.
SW_t	Το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό
R	Ημερήσια κατακρήμνιση
Q	Ημερήσια απορροή
ET	Εξατμισοδιαπνοή
P	Διήθηση
QR	Υπόγεια ροή
CN_{2S}	Η τιμή του CN_2 προσαρμοσμένη στη εκάστοτε κλίση
CN_3	Η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε υγρές υδρολογικές συνθήκες
S	Μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής.
CN_1	Η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε ξηρές υδρολογικές συνθήκες
s_1	Η τιμή του s που σχετίζεται με τον αριθμό CN_1
SW	Ποσοστό εδαφικής υγρασίας
w_1, w_2	Παράμετροι σχήματος
s	Παράμετρος κατακράτησης
s_{prev}	Παράμετρος κατακράτησης της προηγούμενης μέρας
O	Ρυθμός διήθησης σε mm/ημέρα
SW_0	Περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην αρχή της ημέρας σε mm
TT	Χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από το στρώμα i σε ώρες.
H_i	Υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/ώρα
FC_i	Υδατοϊκανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαρασμού
SC_i	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το στρώμα i σε mm/ώρα
β_i	Παράμετρος που προκαλεί το H_i να πλησιάζει στο μηδέν καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i

O_{i-1}	Η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/ημέρα
TT_{ci}	Χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από τη ρωγμή σε ώρες
S	Αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη (νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα)
q_{lat}	Υποδερμική ροή σε m^3/h
i	Ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m^2/h
L	Μήκος της μισγάγγειας σε m
v	Ταχύτητα ροής στην έξοδο
w	Πλάτος της μισγάγγειας
K_s	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
L_s	Μήκος της κορεσμένης κλιτύς σε m
V_{sa}	Αποθήκευση του επιφανειακού υδροφορέα
R_c	Επαναφόρτιση
re_{vap}	Ροή του νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ
q_{rf}	Υπόγεια ροή
$perc_{gw}$	Το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα
WU_{SA}	Η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα
K_d	Υδραυλική αγωγιμότητα
μ	Ειδική απόδοση
R_c	Τροφοδότηση του επιφανειακού υδροφορέα
h	Το ύψος του νερού
ET_{act}	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ
β_r	Συντελεστής re_{vap}
$re_{vap_{st}}$	Αποθήκευση του εδαφικού στρώματος
E_p	Προβλεπόμενος ρυθμός διαπνοής των φυτών σε mm/ημέρα
E_s	Δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/ημέρα
EA	Δείκτης εδάφους
CV	Το άθροισμα της εδαφικής βιομάζας και των καταλοίπων της καλλιέργειας σε kg/ha
SNO_{mlt}	Η ποσότητα του τηγμένου χιονιού σε mm/ημέρα
b_{mlt}	Παράγοντας τήξης του χιονιού για τη μέρα εκείνη σε $mm/ημέρα-^{\circ}C$
sno_{cov}	Ποσοστό του HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι
T_{snow}	Θερμοκρασία του χιονιού εκείνη την ημέρα σε $^{\circ}C$
T_{mx}	Μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα εκείνη
T_{mlt}	Θερμοκρασία πάνω από την οποία επιτρέπεται η τήξη του χιονιού.
PW	Πιθανότητα μιας υγρής μέρας

NWD	Αριθμός των υγρών ημερών
ND	Ημέρες που έχει ο μήνας
β	Συντελεστής που κυμαίνεται συνήθως από 0.6 - 0.9
R_{day}	Ποσότητα της βροχής για μια συγκεκριμένη μέρα σε mm
μ_{mon}	Μέση ημερήσια βροχόπτωση για ένα μήνα
σ_{mon}	Τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης για ένα μήνα σε mm
SND_{day}	Κανονική τυπική απόκλιση για την ημέρα
g_{mon}	Συντελεστής κύρτωσης.
SDRA	Τυπική απόκλιση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε MJ/m ²
RAMX	Μέγιστη ημερήσια ακτινοβολία στα μέσα του μήνα
RA	Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία
$\mu_{10\text{m}}$	Μέση ταχύτητα του ανέμου σε m/s
$\mu\text{wnd}_{\text{mon}}$	Μέση μηνιαία τιμή του ανέμου
rnd_i	Ένα τυχαίο νούμερο
R_{hWmon}	Μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις υγρές μέρες του μήνα
R_{hDmon}	Μέση ημερήσια σχετική υγρασία για τις ξηρές μέρες του μήνα
b_{H}	Ένας παράγοντας κλίμακας
$T_{\text{soil}}(z, \text{dn})$	Μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z σε mm και την dn ημέρα του μήνα
$\overline{T_{AA}}$	Μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους πάλι σε °C
A_{surf}	Ετήσιο εύρος στη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C
dd	Καθαρό ύψος εφαρμογής σε mm
ω_{tmp}	Γωνιακή συχνότητα
z_{m}	Μέσο υψόμετρο της λεκάνης
z_i	Μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής
A_i	Εμβαδόν της κάθε υποπεριοχής
X_i	Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του σταθμού το υδρολογικό έτος i
i	Η τάξη του νεότερου στοιχείου
$i+1$	Η τάξη του παλαιότερου κατά ένα έτος στοιχείου
α	Συντελεστής αναγωγής
λ_1	Κλίση του νεότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης
λ_2	Κλίση του παλαιότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης
P_X	Ζητούμενη τιμή βροχόπτωσης σε σταθμό όπου δεν υπάρχουν δεδομένα
P_1, P_2, P_3	Τιμές βροχόπτωσης στους σταθμούς βάσης 1, 2 και 3
N_1, N_2, N_3	Τιμές της μέσης βροχόπτωσης στους σταθμούς βάσης 1, 2 και 3

N_x	Μέση βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού
A_i	Η έκταση μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών
A	Η Συνολική έκταση της λεκάνης
$\overline{P}_{i-1,i}$	Μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών
λ	Συντελεστής διόρθωσης
β	Βροχοβαθμίδα
P_o	Τιμή του ύψους βροχής στη υψομετρική αναγωγή
\bar{z}	Σταθμικός μέσος των υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν τη λεκάνη απορροής
T_{\max}	Μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας
T_{\min}	Ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας
T_a	Θερμοκρασία
Z	Υψόμετρο
θ	Θερμοβαθμίδα
e	Τάση των υδρατμών
e_s	Μέγιστη τάση υδρατμών
T_d	Θερμοκρασία σημείου δρόσου
$e_a - e$	Έλλειμμα κορεσμού
A_h	Απόλυτη υγρασία
R_h	Σχετική υγρασία
P	Βροχόπτωση
I	Άρδευση
ΔSW	Η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατανομής
RO	Επιφανειακή απορροή
D	Βαθιά διήθηση
E	Εξάτμιση σε mm/ημέρα
Δ	Κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδάτων σε mmHg/°C
T_a	Θερμοκρασία του αέρα σε °C
R	Η διαφορά ακτινοβολιών λήψεως/εκπομπής
R_A	Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας σε mm/ημέρα
n	Ωρες πραγματικής ηλιοφάνειας
N	Μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια
σ	Σταθερά Stephan – Boltzmann
T_{AK}	Θερμοκρασία του αέρα σε °K

r	Albedo
e	Τάση υδρατμών σε θερμοκρασία T_{AK}
E_a	Παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών
e_w	Τάση κορεσμένων υδρατμών σε mmHg
e	Τάση υδρατμών
RH	Σχετική υγρασία
γ	Ψυχομετρική σταθερά σε mmHg/°C
f	Συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας που εξετάζουμε
E_{rc}	Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d
S_o	Εξωγήινη ακτινοβολία σε kJ/(m ² d)
λ	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε kJ/kg
T_a	Μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C
Ksat	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
R_h	Βαθμός ανάγλυφου
CNII	Αριθμός καμπύλης τύπου II
AWC	Διαθέσιμη εδαφική υγρασία
C_{vx}	Συντελεστής μεταβλητότητας
\bar{x}	Μέση τιμή του δείγματος των ετησίων ελαχίστων τιμών
σ	Τυπική απόκλιση του δείγματος
$V_{i,k}$	Αθροιστικός όγκος απορροής για το υδρολογικό έτος i και για την περίοδο αναφοράς k
k	Περίοδος αναφοράς για $k=1$ Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου, $k=2$ για Οκτώβριο-Μάρτιο, $k=3$ για Οκτώβριο-Ιούνιο και $k=4$ για Οκτώβριο-Σεπτέμβριο
\bar{V}_k	Ο μέσος όρος του αθροιστικού όγκου απορροής
s_k	Η τυπική απόκλιση του αθροιστικού όγκου απορροής
SDI	Ο δείκτης υδρολογικής ξηρασίας- Streamflow Drought Index
$y_{i,k}$	Ο φυσικός λογάριθμος της αθροιστικής απορροής
\bar{y}_k	Ο μέσος όρος του φυσικού λογαρίθμου της αθροιστικής απορροής
$s_{y,k}$	Η τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου της αθροιστικής απορροής
Q_{obsi}	Η παρατηρημένη απορροή του μήνα i
Q_{simi}	Η υπολογισμένη απορροή του μήνα i
\bar{Q}_{obs}	Η μέση παρατηρημένη απορροή για την περίοδο της προσομοίωσης
Eff	Ο δείκτης καταλληλότητας Nash-Nash Coefficient

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική Τοποθέτηση του Προβλήματος

Η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή του περιβάλλοντος, που οφείλεται στις ανεξέλεγκτες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως λόγω της αλόγιστης καύσης γαιανθράκων, αποτελεί ένα παγκόσμιο επίκαιρο πρόβλημα που ερευνητές και επιστήμονες από όλο τον κόσμο «ενώνουν» τις γνώσεις τους για την πρόβλεψη των μελλοντικών επιπτώσεων από τις κλιματικές αλλαγές, καθώς και δραστικές προτάσεις για την αντιμετώπιση τους. Η κλιματική αλλαγή ήδη έχει ξεκινήσει, αφού καθημερινά ερχόμαστε αντιμέτωποι με ακραία φαινόμενα, όπως μακροχρόνιες ξηρασίες, πλημμύρες κ.ά. Τα υδατικά αποθέματα ανά τον κόσμο μειώνονται διαρκώς, αφού άμεσες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση των βροχοπτώσεων. Ο συνδυασμός των μεταβολών των δύο αυτών μετεωρολογικών παραμέτρων οδηγεί σε χαμηλές απορροές, επιφανειακές και υπόγειες, διαταράσσοντας το υδρολογικό ισοζύγιο και άρα τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα.

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία, δηλαδή στην μελέτη των περιόδων υδρολογικού ελλείμματος, όπως των απορροών. Με άλλα λόγια, αφορά στις επιπτώσεις από την έλλειψη βροχοπτώσεων σε ένα υδρολογικό σύστημα. Εμείς θελήσαμε να μελετήσουμε την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία, εφαρμόζοντας τη μελέτη στην περιοχή της Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στις λεκάνες Πύλης και Μουζακίου. Η μελέτη αυτή αφορούσε τις κλιματικές αλλαγές σε μελλοντικό χρονικό ορίζοντα δύο περιόδων του αιώνα που διανύουμε, 2020-2050 και 2070-2100. Οι κλιματικές αλλαγές εκτιμήθηκαν σύμφωνα με τα προτεινόμενα Σενάρια Αερίων Εκπομπών (SRES) που έχουν προταθεί από τους ερευνητές της Τέταρτης Έκθεσης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC). Οι κλιματικές μεταβολές των μετεωρολογικών παραμέτρων υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του Κέντρου Ερεύνης Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας (ΚΕΦΑΚ).

Ο υπολογισμός των προσομοιωμένων απορροών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση σύγχρονου υπολογιστικού μοντέλου, του SWAT, εκτιμώντας τις απορροές πρώτα με βάση ιστορικά δεδομένα και ύστερα βάσει μελλοντικών χρονοσειρών. Τα αποτελέσματα των απορροών για κάθε ένα από τα τρία Σενάρια Αερίων Εκπομπών με τα οποία ασχοληθήκαμε, αξιολογήθηκαν και για αυτά εκτιμήθηκε ένας δείκτης υδρολογικής ξηρασίας, ο δείκτης SDI (Streamflow Drought Index), με τον οποίο εντοπίσαμε την κατηγορία της υδρολογικής ξηρασίας (μη ξηρασία, ήπια, μέτρια, σοβαρή και ακραία) για κάθε περίοδο και κάθε σενάριο.

1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία διαχωρίζεται σε 9 κεφάλαια που περιγράφουν με την αντίστοιχη σειρά τις απαραίτητες διαδικασίες και επεξεργασίες που εφαρμόστηκαν και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία των λεκανών απορροής Πύλης και Μουζακίου. Παράλληλα, αναλύθηκαν και θεωρητικά κομμάτια για καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη. Παρακάτω, περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 1^ο

Περιγράφεται συνοπτικά η γενική τοποθέτηση του προβλήματος και το γενικότερο πλαίσιο στο οποίο κινήθηκε η διπλωματική.

Κεφάλαιο 2^ο

Παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης στην οποία εργαστήκαμε, καθώς και το Υδατικό Διαμέρισμα στο οποίο αυτή ανήκει, εν προκειμένω, της Θεσσαλίας, και περιγράφονται γενικά χαρακτηριστικά που αφορούν το κλίμα, το έδαφος, τους υδατικούς πόρους κ.ά.

Κεφάλαιο 3^ο

Παρουσιάζεται το μοντέλο βροχόπτωσης απορροής SWAT, με το οποίο εργαστήκαμε, αναλύονται οι λειτουργίες του για την προσομοίωση, περιγράφονται συνοπτικά άλλα μοντέλα και ο δείκτης καταλληλότητας για την βαθμονόμηση του μοντέλου.

Κεφάλαιο 4^ο

Αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από τη συγκέντρωση των δεδομένων μέχρι την επεξεργασία τους, σε ό,τι αφορά τις μετεωρολογικές μεταβλητές, την ψηφιοποίηση χαρτών, τη δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και, γενικά, όλα τα απαραίτητα προπαρασκευαστικά βήματα πριν την εφαρμογή του μοντέλου.

Κεφάλαιο 5^ο

Παρατίθενται ο ορισμός της υδρολογικής ξηρασίας, οι διαθέσιμοι δείκτες που υπάρχουν για την εύρεση της και η επιλογή του κατάλληλου στην περίπτωση μας, του δείκτη SDI, με αναλυτική παρουσίαση των μεθοδολογιών.

Κεφάλαιο 6^ο

Παρουσιάζεται το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, περιγράφονται οι επιπτώσεις της, αναλύεται το περιεχόμενο της 4^{ης} Έκθεσης της IPCC και τα Σενάρια Αερίων Εκπομπών και αναφέρονται τα μοντέλα προσομοίωσης των κλιματικών αλλαγών.

Κεφάλαιο 7^ο

Αναλύονται τα υπολογιστικά βήματα εφαρμογής του μοντέλου SWAT στις λεκάνες απορροής που μελετάμε, με την εισαγωγή των δεδομένων, την βαθμονόμηση του μοντέλου και την τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και τον υπολογισμό του δείκτη SDI για την εύρεση της ξηρασίας στις ιστορικές προσομοιωμένες απορροές.

Κεφάλαιο 8^ο

Παρουσιάζεται η δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών, η εφαρμογή των κλιματικών μεταβολών που μας δόθηκαν σε αυτές, ο υπολογισμός των τελικών προσομοιωμένων απορροών για κάθε σενάριο κλιματικής αλλαγής και ο υπολογισμός του δείκτη υδρολογικής ξηρασίας SDI για κάθε περίπτωση με τη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 9^ο

Ολοκληρώνεται το τεύχος με την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων που αφορούν στην διαπίστωση της υδρολογικής ξηρασίας στο μέλλον από την εφαρμογή στις λεκάνες απορροής και συστήνεται η άμεση λήψη μέτρων αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και αντίστοιχων προτάσεων μετριασμού των επιπτώσεων.

2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης της διπλωματικής αυτής εργασίας ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας συμπίπτει σχεδόν με το αντίστοιχο γεωγραφικό διαμέρισμα, με κάποιες εξαιρέσεις κυρίως στα νότια και νοτιοδυτικά τμήματα. Πιο συγκεκριμένα, το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας περιλαμβάνει όλο το νομό Λαρίσης, το μεγαλύτερο μέρος των νομών Τρικάλων, Καρδίτσας και Μαγνησίας, ενώ περιλαμβάνει κάποια μικρά τμήματα των νομών Φθιώτιδας στα νότια και Πιερίας και Γρεβενών στα βόρεια. Η συνολική έκταση του υδατικού διαμερίσματος είναι 13153 km², σχεδόν 1000 km² μικρότερη από αυτή του γεωγραφικού διαμερίσματος (14036 km²).

Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού αποτελεί τη μεγαλύτερη πεδινή έκταση της χώρας, συγκεντρώνοντας ταυτόχρονα όλα τα είδη των υδατικών καταναλώσεων, δηλαδή άρδευση, ύδρευση και βιομηχανική χρήση. Οι κύριες ασχολίες των κατοίκων και κατ' επέκταση η οικονομία της περιοχής στηρίζεται στον πρωτογενή τομέα και σχεδόν αποκλειστικά από τη γεωργία. Για αυτό το λόγο η μελέτη και η διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής αποτελεί ένα σημαντικό και συνάμα κρίσιμο αντικείμενο.

2.1.1 Υδρολογικά χαρακτηριστικά

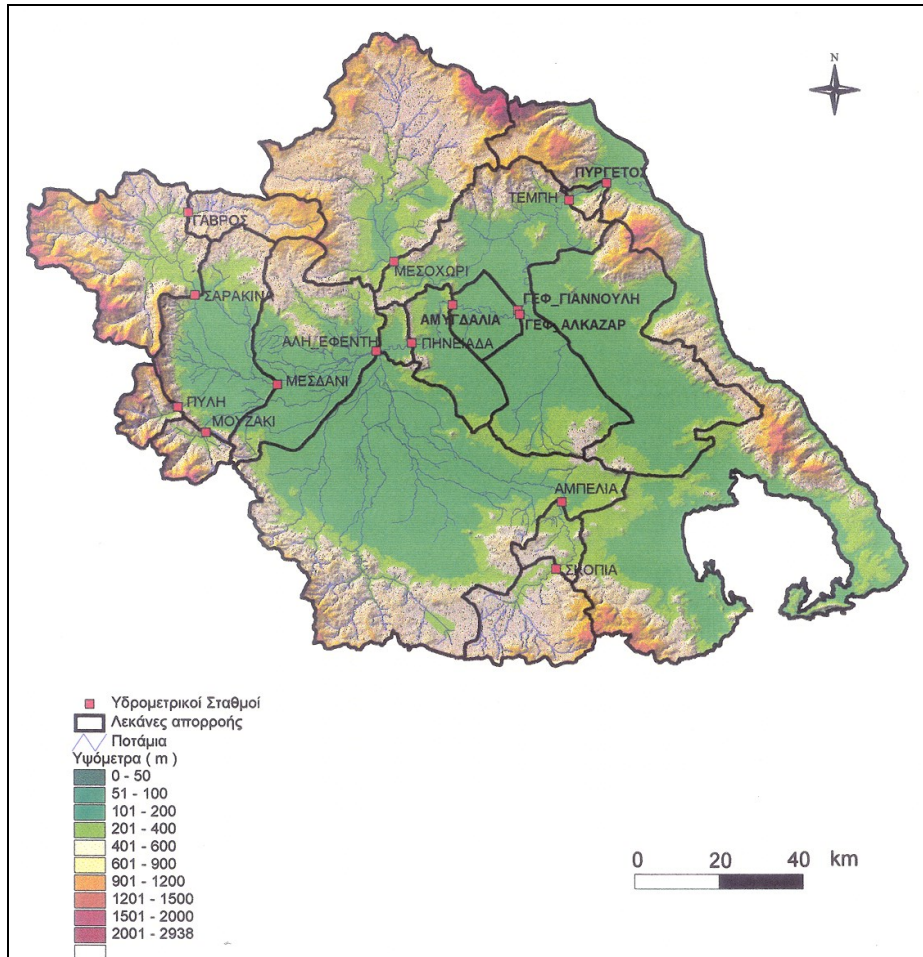
Η κύρια υδρολογική λεκάνη του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας είναι η λεκάνη του Πηνειού με έκταση λίγο λιγότερο από 9500 km² στη θέση Πυργετός, που είναι κοντά στις εκβολές του Πηνειού. Κυριότεροι παραπόταμοι του Πηνειού είναι προς τα νότια ο Ενιπέας, ο Φαρσαλιώτης, ο Σοφαδίτης και ο Καλέντζης, προς τα δυτικά και νοτιοδυτικά ο Πλιούρης ή Πάμισος, ο Πορταϊκός και το Μουργκάνι και στο βόρειο μέρος ο Ληθαίος, ο Νεοχωρίτης και ο Τιταρήσιος. Στο υδατικό διαμέρισμα βρίσκεται ακόμη και η κλειστή λεκάνη της Κάρλας, καθώς και άλλα μικρότερα ρέματα (Ναλμπάντης & Κουτσογιάννης, 1997).

Σε ό,τι αφορά στα έργα για τα επιφανειακά νερά, μέχρι σήμερα στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας έχουν κατασκευασθεί και τεθεί σε λειτουργία ο ταμιευτήρας Ν. Πλαστήρα, με τον οποίο εκτρέπονται τα νερά του Ταυρωπού από το Υδατικό Διαμέρισμα της Στερεάς Ελλάδας προς το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για άρδευση και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ο ταμιευτήρας Σμοκόβου. Οι υπόλοιπες υπολεκάνες στις οποίες έχουν μελετηθεί ή προγραμματιστεί σημαντικά έργα για την εκμετάλλευση των υδατικών πόρων είναι οι ακόλουθες:

1. Στη νότια περιοχή της λεκάνης του Πηνειού: η υπολεκάνη Ενιπέα ανάντη της θέσης φράγματος Παλιοδερλί, με έκταση 427.6 km².
2. Στη δυτική περιοχή της λεκάνης του Πηνειού: (α) η υπολεκάνη Πλιούρη (Παμίσου), ανάντη της θέσης φράγματος Μουζακίου, με έκταση 146.8 km², (β) η υπολεκάνη Πορταϊκού, ανάντη της θέσης φράγματος Πύλης, με έκταση 133.8 km² και (γ) η υπολεκάνη Πηνειού, ανάντη της θέσης φράγματος Κρύας Βρύσης, με έκταση 952.7 km².
3. Στη βόρεια περιοχή της λεκάνης Πηνειού: (α) η υπολεκάνη Ληθαίου, ανάντη της θέσης φράγματος Θεόπετρας, με έκταση 127.8 km², (β) η υπολεκάνη Νεοχωρίτη, ανάντη της θέσης φράγματος Νεοχωρίου, με έκταση 170.7 km², (γ) η υπολεκάνη Τιταρήσιου, ανάντη

της θέσης φράγματος Καλούδας, με έκταση 466.5 km² και (δ) η υπολεκάνη Ελασσονίτικου ανάντη της θέσης φράγματος Παλιομονάστηρου, με έκταση 209.8 km².

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο χάρτης του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας μαζί με τις λεκάνες απορροής ανάντη των υδρομετρικών σταθμών.



Σχήμα 2.1: Ο χάρτης του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: Ναλμπάντης & Κουτσογιάννης, 1997).

2.1.2 Ατμοσφαιρικά-κλιματολογικά χαρακτηριστικά

Στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας κυριαρχούν τρεις τύποι κλίματος που αλλάζουν ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, στην ανατολική παραθαλάσσια περιοχή το κλίμα είναι μεσογειακό, στον Θεσσαλικό κάμπο, που βρίσκεται στο κέντρο του διαμερίσματος, το κλίμα είναι ηπειρωτικό, ενώ στη δυτική περιοχή, λόγω του αναγλύφου, το κλίμα είναι ορεινό.

Η θερμοκρασία στο Υδατικό Διαμέρισμα γίνεται χαμηλότερη όσο κινούμαστε στα δυτικά και απομακρυνόμαστε από τη θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, η μέση ετήσια θερμοκρασία στην κεντρική και παράκτια περιοχή φτάνει τους 17°C, ενώ στη δυτική ορεινή περιοχή πέφτει στους 10°C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι γύρω στους 22°C. Οι ψυχρότεροι μήνες είναι από τον Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο, ενώ αντίθετα οι θερμότεροι είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος.

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά και σταδιακά μειώνεται στο πεδινό τμήμα, ενώ πάλι αυξάνεται στα ορεινά ανατολικά. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στα δυτικά, και συγκεκριμένα στο σταθμό Μουζακίου φτάνει τα 1142 mm, ενώ στα πεδινά από μετρήσεις στο σταθμό Λάρισας φτάνει στα 468 mm και στο σταθμό Τυρνάβου, η μέση ετήσια βροχόπτωση δεν ξεπερνάει τα 550 mm (ΕΜΠ, 1988). Επιπρόσθετα, η περίοδος που εμφανίζει την μεγαλύτερη συχνότητα βροχοπτώσεων και παρατηρούνται τα υψηλότερα ύψη κατακρημνισμάτων, για το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, είναι από την έναρξη του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος) έως τον Ιανουάριο, ενώ αντίθετα η πιο ξηρή περίοδος είναι κατά το θέρος και πιο συγκεκριμένα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο.

Οι χιονοπτώσεις συναντώνται συχνά στα ορεινά τμήματα του Υδατικού Διαμερίσματος, με αυτές να γίνονται εντονότερες προς τα βόρεια και δυτικά ορεινά. Η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης χιονοπτώσεων παρατηρείται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Ωστόσο, στα δυτικά και βορειοδυτικά ορεινά τμήματα του διαμερίσματος, αυτές ξεκινάνε πολλές φορές από τον Σεπτέμβριο και φθάνουν ως τις αρχές του Ιουλίου. Από παρατηρήσεις, ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών χιονιού έχει υπολογιστεί για το Βόλο στις 3.4 ημέρες, τη Λάρισα στις 4.0 ημέρες και για τα Τρίκαλα στις 6.2.

Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% στα πεδινά και φθάνει μέχρι 72% στα πιο υγρά ορεινά. Επίσης, το κλάσμα ηλιοφάνειας υπολογίζεται σε 0.57 για την Αγχίαλο και 0.56 για την Λάρισα. Τέλος, η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου ανέρχεται στα 1.8 m/s, με την επικρατούσα φορά να ποικίλει (βορειοδυτική και νότια στο Βόλο, ανατολική στη Λάρισα και δυτική στα Τρίκαλα).

2.1.3 Γεωλογικά-γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα με τα ορεινά τμήματα του να συναντώνται περιμετρικά της περιοχής, δηλαδή ανατολικά, δυτικά, νότια και βόρεια, ενώ οι πεδινές εκτάσεις συγκεντρώνονται στα κεντρικά τμήματα. Το Θεσσαλικό Πεδίο είναι ένα τεκτονικό βύθισμα, που περιβάλλεται από τις οροσειρές του Ολύμπου-Καμβουνίων στα βόρεια, της Πίνδου στα δυτικά, της Όθρυος στα νότια και του Πηλίου-Όσσας στα ανατολικά. Το Θεσσαλικό Πεδίο χωρίζεται από τα χαμηλά Χαλκηδόνια Όρη στις πεδινές εκτάσεις της δυτικής Θεσσαλίας και τις πεδινές εκτάσεις της ανατολικής Θεσσαλίας. Οι δύο αυτές περιοχές είναι ανεξάρτητες από υδρογεωλογική άποψη. Γενικά, το μέσο υψόμετρο του υδατικού διαμερίσματος διαμορφώνεται γύρω στα 285 m.

Στο υδατικό διαμέρισμα αναπτύσσονται από τα ανατολικά προς τα δυτικά τρεις γεωτεκτονικές ζώνες με κατεύθυνση βορειοδυτικά-νοτιοανατολικά. Αυτές είναι: (α) η Πελαγονική ζώνη με παλαιά μεταμορφωμένα σχιστογενεσιακά και ανθρακικά πετρώματα, (β) η Υποπελαγονική ζώνη με ασβεστοσχιστοκερατολιθικούς σχηματισμούς και κατά θέσεις οφιόλιθους, και (γ) η Ζώνη Ολωνού-Πίνδου με μεσοζωικούς ασβεστολιθικούς ορίζοντες και πυριτόλιθους. Απαντώνται επίσης φλυσχικοί και οι μολασσικοί ανωμεσοζωικοί και παλαιογενείς σχηματισμοί, νεογενή και πλειστοκαινικά ιζήματα και αλλουβιακές αποθέσεις στις χαμηλότερες περιοχές (Ναλμπάντης & Κουτσογιάννης, 1997).

2.2 Οι λεκάνες Πύλης και Μουζακίου

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιορίζεται σε ένα μόνο κομμάτι του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, που οριοθετείται σε ένα μικρό τμήμα στα δυτικά του διαμερίσματος. Η περιοχή αυτή αφορά δύο μικρές υδρολογικές λεκάνες, της

Πύλης και του Μουζακίου, υπολεκάνες της ευρύτερης λεκάνης του Πηνειού, με συνολική έκταση που δεν ξεπερνά το τρία τοις εκατό (3%) της λεκάνης του Πηνειού. Οι λεκάνες διοικητικά ανήκουν στον Νομό Τρικάλων και Καρδίτσας (η λεκάνη Πύλης ανήκει επί τω πλείστον στο Ν. Τρικάλων και αντίστοιχα η λεκάνη Μουζακίου στο Ν. Καρδίτσας). Παρακάτω παρουσιάζονται πιο αναλυτικά η γεωγραφική θέση των λεκανών, καθώς και άλλα κλιματικά και γεωλογικά δεδομένα.

2.2.1 Οι λεκάνες ανάντη των υδρομετρικών σταθμών

Οι λεκάνες Πύλης και Μουζακίου ξεκινάνε από τα δυτικά όρια του υδατικού διαμερίσματος, φυσικό όριο από την οροσειρά της Νότιας Πίνδου, και από εκεί που πηγάζουν οι δύο ποταμοί των λεκανών Πύλης (Πορταϊκός) και Μουζακίου (Πάμισος). Ανατολικά οι λεκάνες εκτείνονται μέχρι τα όρια των κωμοπόλεων που διασχίζουν, δηλαδή της Πύλης και του Μουζακίου, ενώ έχουν σαν φυσικά όρια τα όρη (από βορρά προς νότο) Κερκέτιον Όρος, Ίταμος Όρος και Άγραφα. Οι λεκάνες έχουν μελετηθεί και εξετασθεί αναλυτικά ως κομμάτι του μεγάλου έργου της εκτροπής του Αχελώου και έχουν προταθεί γεωγραφικές θέσεις για την κατασκευή φραγμάτων. Οι ταμιευτήρες Μουζακίου και Πύλης είναι διασυνδεδεμένοι και σχεδιάζονται να δεχτούν τα νερά του Αχελώου. Η συνολική έκταση της λεκάνης της Πύλης είναι 132.34 km² και η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανέρχεται στα 15 hm³ (κυβικά εκατόμετρα), ενώ η έκταση της λεκάνης του Μουζακίου είναι 150.10 km² και η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανέρχεται στα 530 hm³ (Ναλμπάντης & Κουτσογιάννης, 1997).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσαμε της λεκάνες μέχρι της θέσεις των υδρομετρικών σταθμών και όχι ανάντη των θέσεων φραγμάτων. Αυτό έγινε για πρακτικούς λόγους, καθώς επίσης γιατί δεν σκοπεύουμε στην τρέχουσα διπλωματική να εξετάσουμε τις λεκάνες με ταμιευτήρα στην έξοδο τους. Έτσι, οι λεκάνες σχεδιάστηκαν ανάντη των θέσεων των υδρομετρικών σταθμών, Πύλη-Πορταϊκός και Μουζάκι-Πλιούρης. Η έκταση τους βρέθηκε για την λεκάνη της Πύλης ίση με 132.98 km² και για την λεκάνη του Μουζακίου ίση με 140.14 km². Το Σχήμα Β.1 του Παραρτήματος Β απεικονίζει τις δύο λεκάνες ανάντη των υδρομετρικών τους σταθμών.

2.2.2 Κλιματικές συνθήκες

Το κλίμα της περιοχής μελέτης είναι κατά κύριο λόγο ορεινό, λόγω του μεγάλου ορεινού όγκου που διασχίζει τη περιοχή. Ωστόσο, το κλίμα γίνεται ηπειρωτικό στα όρια της περιοχής, εκεί που το ανάγλυφο είναι ηπιότερο και πεδινό.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία για την λεκάνη της Πύλης είναι 12.4°C, ενώ για την λεκάνη του Μουζακίου είναι 12.9°C. Η μέση μέγιστη θερμοκρασία για όλο το έτος για την λεκάνη της Πύλης είναι 17.3°C και η μέση ελάχιστη φτάνει τους 7.5°C. Αντίστοιχα για την λεκάνη του Μουζακίου οι θερμοκρασίες κυμαίνονται πολύ κοντά με αυτές της Πύλης. Πιο συγκεκριμένα, η μέση μέγιστη θερμοκρασία για όλο το έτος είναι 17.8°C και η αντίστοιχη ελάχιστη είναι 7.9°C. Οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και Αύγουστος με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 32°C, ενώ στον αντίποδα ψυχρότεροι είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με θερμοκρασίες που πέφτουν κάτω από το μηδέν (περίπου -2°C).

Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψη κατακρημνισμάτων, καθώς εδώ σημειώνονται τα υψηλότερα ύψη βροχής σε όλο το υδατικό διαμέρισμα. Αυτός είναι και ένας λόγος που έχει μελετηθεί η κατασκευή ταμιευτήρων, αφού ο μεγάλος όγκος κατακρημνισμάτων τους χειμερινούς μήνες πάει χαμένος και εκβάλλεται στη θάλασσα. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση για τις λεκάνες αγγίζει τα 123 mm, ενώ η μέση ετήσια ξεπερνάει

τα 1470 mm. Οι μήνες με τη μεγαλύτερη ξηρασία είναι ο Ιούλιος, ενώ οι πιο υγροί, από άποψης κατακρημνισμάτων, ο Νοέμβριος και ο Δεκέμβριος.

Η μέση μηνιαία σχετική υγρασία είναι 68.2%, με την μέγιστη να εμφανίζεται τον Δεκέμβριο (79.2%) και την ελάχιστη τον Ιούλιο (54.7%). Η μέση μηνιαία πραγματική ηλιοφάνεια για την περιοχή μελέτης είναι περίπου 205 ώρες (h), ενώ η αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία σε μονάδες SI είναι 14.8 MJ/m²/day. Τέλος, οι άνεμοι σημειώνουν μέση μηνιαία ταχύτητα γύρω στα 1.8 m/s και εμφανίζονται ενισχυμένοι κατά τους θερινούς μήνες (2.0-2.4 m/s).

2.2.3 Έδαφος-γεωλογία

Το έδαφος της περιοχής μελέτης είναι ορεινό-ημιορεινό στο μεγαλύτερο μέρος του με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις. Ενδεικτικά, οι κλίσεις του εδάφους για τη λεκάνη της Πύλης είναι πάνω από το 70% μεγαλύτερες από 30% (κλίση) και μάλιστα το 35% από αυτές αντιστοιχεί σε κλίσεις μεγαλύτερες του 60%. Παρόμοια, φαίνεται να είναι και τα ποσοστά για την λεκάνη του Μουζακίου, με λίγο ομαλότερο το ανάγλυφο. Πιο συγκεκριμένα, οι αντίστοιχες κλίσεις του εδάφους για άνω του 30%, συγκεντρώνουν το 65% της συνολικής έκτασης, ενώ από αυτές το 27% αντιστοιχεί σε κλίσεις άνω του 60%.

Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης του Μουζακίου είναι περίπου 825 m, με το μέγιστο να αγγίζει τα 2000 m και το ελάχιστο να φτάνει λίγο πάνω από τα 200 m. Λόγω του εντονότερου αναγλύφου, το μέσο υψόμετρο της λεκάνης της Πύλης είναι εμφανώς μεγαλύτερο (946 m), ωστόσο το μεγαλύτερο υψόμετρο της λεκάνης δεν ξεπερνάει τα 1870 m, και το ελάχιστο να εμφανίζεται ελαφρώς υψηλότερο από το αντίστοιχο του Μουζακίου (247 m).

Από γεωλογικής άποψης, η περιοχή μελέτης συγκεντρώνει πλήθος διαφορετικών εδαφολογικών τύπων, ανάλογα τη γεωμορφολογία, το βάθος του εδάφους, τις κλίσεις κ.α. Οι εδαφολογικοί αυτοί χάρτες μας παραχωρήθηκαν από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης, σε κλίμακα 1 προς 50000 (1:50000) και είναι αντίστοιχοι με αυτούς της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Ωστόσο, από όλη την πληροφορία που διαθέτουν εμείς αξιοποιήσαμε μόνο την γεωμορφολογική που αφορά τον μητρικό τύπο εδάφους. Οι μητρικοί τύποι εδαφών που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης είναι ο ψαμμιτικός φλύσσης, ο αργιλικός φλύσσης, οι σκληροί ασβεστόλιθοι, οι περιδοτίτες, οι τριτογενείς αποθέσεις, τα αλλούβια, τα κολλούβια φλύσση, τα κολλούβια ασβεστόλιθων, οι σάρρες και οι κοίτες ποταμών. Άλλα εδάφη επικρατούν στην περιοχή σε μεγαλύτερες εκτάσεις και άλλα σε μικρές. Τα μητρικά εδάφη που κυριαρχούν είναι ο ψαμμιτικός φλύσσης και οι σκληροί ασβεστόλιθοι σε ποσοστό περίπου 80% αθροιστικά, ενώ άλλα εδάφη σε μικρότερα ποσοστά είναι ο αργιλικός φλύσσης σε ποσοστό 10%, τα κολλούβια φλύσση σε ποσοστό 5% και, τέλος, τα υπόλοιπα εδάφη σε ποσοστό μόλις 5%.

2.2.4 Επιφανειακοί-υπόγειοι υδατικοί πόροι

Το επιφανειακό υδατικό δυναμικό της περιοχής αποτελείται από τις απορροές του φυσικού υδρογραφικού δικτύου. Για τη λεκάνη της Πύλης ο κύριος υδάτινος υδροφορέας είναι ο παραπόταμος του Πηνειού, Πορταϊκός. Ο ποταμός Πορταϊκός, που πηγάζει από τα δυτικά της λεκάνης ανάμεσα από τον οικισμό Στουρναραίικα και Παλαιοκαρυνά, ενισχύεται νότιο-δυτικά από τα ρέματα Γκρόπας και Χήρας, ενώ βόρεια από το Ποτάμι. Η μέση μηνιαία παροχή του Πορταϊκού στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Πύλης, όπως αυτή μετρήθηκε με σταθμήμετρο, είναι 4.57 m³/s, με τις μέγιστες απορροές να σημειώνονται τον Φεβρουάριο και Μάρτιο και τις ελάχιστες τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο. Για την λεκάνη του Μουζακίου ο κύριος υδροφορέας είναι ο Πάμισος ή Πλιούρης ποταμός. Ο ποταμός πηγάζει από τα βορειοδυτικά της λεκάνης και κινούμενος βόρεια προς τον οικισμό Βαστουριά, ενισχύεται βόρεια από το Ξερόρρεμα και νότιο-δυτικά από το Κακόρρεμα. Στη συνέχεια ο ποταμός

στρέφεται προς τα νότιο-ανατολικά, όπου ενισχύεται από τα νότια με αρκετά ρέματα, τα μεγαλύτερα είναι το Ρέμα, το Μέγα ρέμα, οι Εννέα Βρύσες και το Κερασιώτικο ρέμα, που συνενώνονται, και κατόπιν ο ποταμός κινείται βόρεια προς το Μουζάκι. Η μέση μηνιαία παροχή του ποταμού είναι $3.07 \text{ m}^3/\text{s}$, όπως αυτή μετρήθηκε στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Μουζάκι. Από τα μετρημένα ιστορικά δεδομένα, τη μεγαλύτερη μέση μηνιαία παροχή φαίνονται να παρουσιάζουν οι μήνες Μάρτιος και Απρίλιος και τη μικρότερη ο Ιούλιος και Αύγουστος.

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι που αναπτύσσονται είναι οι υδροφορείς Πορταϊκού και Παμίσου, που αναπτύσσονται υπόγεια των ομώνυμων ποταμών. Οι υπόγειοι υδροφορείς αυτοί έχουν υψηλό δυναμικό φρεάτιο υδροφορέα, που τροφοδοτείται από τις διηθήσεις των ποταμών αλλά και από την κατείσδυση της βροχής. Ωστόσο, λόγω έλλειψης έργων επιφανειακής ταμίευσης, πλην των έργων Πλαστήρα και Σμοκόβου, παρατηρείται έντονη εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων για την κάλυψη κυρίως των αρδευτικών αναγκών, γεγονός που έχει συμβάλλει στην έντονη ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα κατά τους θερινούς μήνες, ειδικά για τον ποταμό Πάμισο.

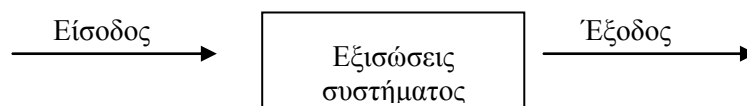
2.2.5 Χρήσεις νερού

Η κύρια χρήση νερού είναι η άρδευση, λόγω της μεγάλης έκτασης του Θεσσαλικού Κάμπου και της αντίστοιχης μεγάλης ζήτησης για την κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών. Η υδροδότηση των χωριών και των πόλεων έχει πάψει να γίνεται από τα επιφανειακά ύδατα των ποταμών. Ειδικά για την περιοχή της Πύλης, μέχρι το 1947 η πόλη υδροδοτείτο από τον Πορταϊκό, ενώ σταμάτησε με την κατασκευή υδραγωγείου. Για την λεκάνη του Μουζακίου, όπως και για όλο τον δήμο Καρδίτσας, η ύδρευση γίνεται πλέον μέσω ολοκληρωμένου συστήματος αγωγών ύδρευσης από τον ταμιευτήρα του Πλαστήρα. Επομένως, τα νερά των ποταμών Παμίσου και Πορταϊκού εκμεταλλεύονται εξ ολοκλήρου για άρδευση των γύρω καλλιεργειών, μέχρι που ενισχύουν τα νερά του Πηνειού και διακλαδώνονται στο Θεσσαλικό Κάμπο. Επιπρόσθετα, και λόγω της μεγάλης ζήτησης του νερού, ειδικά τους θερινούς μήνες, για άρδευση, έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια πολλές γεωτρήσεις που απομυζούν τους υπόγειους υδροφορείς (όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο). Η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων καταστρέφει το οικοσύστημα και δεν είναι εφικτή η ομαλή λειτουργία του υδρολογικού κύκλου. Από την άλλη μεριά οι καλλιέργειες απαιτούν νερό και το αντίθετο θα είχε καταστροφικές συνέπειες στην οικονομία και της χώρας (εξαγωγές), και των αγροτών που είναι η βασική πηγή εσόδων τους, αλλά και όλων κατοίκων της χώρας, λόγω της αύξησης των τιμών. Για τον λόγο αυτό είναι επιτακτική η μετριασμένη εκμετάλλευση των υδάτων επιτηρούμενων από την Πολιτεία, και η μελέτη και κατασκευή ολοκληρωμένου συστήματος ταμιευτήρων, που θα εξασφαλίζουν τη συνεχή και ομαλή απόληψη νερού για άρδευση και ύδρευση της ευρύτερης περιοχής.

3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ-ΑΠΟΡΡΟΗΣ SWAT

3.1 Ορισμός Μοντέλου Βροχόπτωσης-Απορροής

Ως μοντέλο βροχόπτωσης - απορροής ορίζεται ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων, είτε αλγεβρικών είτε διαφορικών εξισώσεων ή λογικών σχέσεων, που συσχετίζουν τη βροχόπτωση με την απορροή (Ναλμπάντης, 2007). Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο ονομάζεται υδρολογική προσομοίωση. Η προσομοίωση (simulation) ορίζεται ως η τεχνική μίμησης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού συστήματος σε ότι αφορά στη χρονική του εξέλιξη. Σχηματικά, ένα υδρολογικό μοντέλο αναπαρίσταται ως εξής:



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικού μοντέλου

Ως δεδομένα εισόδου συνήθως εμφανίζονται διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως είναι τα κατακρημνίσματα, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου κλπ. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή (κατακράτηση, εξατμισοδιαπνοή, διήθηση, επιφανειακή απορροή, ενδιάμεση απορροή, εδαφική υγρασία, αποθήκευση υπόγειου ορίζοντα). Τα τελευταία χρόνια, το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, οδήγησε στην εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διεργασιών. Τέλος, αυτό που προκύπτει από τη συνδυασμένη χρήση όλων αυτών των εξισώσεων είναι η απορροή που αποτελεί και το ζητούμενο στοιχείο εξόδου (Τσακίρης, 1995).

3.2 Γενική Ταξινόμηση Μοντέλων

Τα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται βάσει κάποιων κριτηρίων. Τέτοια κριτήρια είναι η χωρική μεταβλητότητα διεργασιών, το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, ο χειρισμός της αβεβαιότητας, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κλπ. Ο συνήθης διαχωρισμός των μοντέλων είναι πρώτον σε μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και συνεχή μοντέλα και κατόπιν σε ενιαία μοντέλα (lumped) και κατανεμημένα (discrete).

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, τα μοντέλα ανάλογα με τη λειτουργία τους σε σχέση με το χρόνο διαχωρίζονται σε μοντέλα υδρολογικού γεγονότος (event-based) και μοντέλα συνεχούς χρόνου (continuous-time). Στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο λειτουργεί ανά πλημμυρικό γεγονός και αναπαράγει μόνον τις κύριες φυσικές διεργασίες των πλημμυρών (υδρογράφημα πλημμύρας), ενώ το δεύτερο είδος μοντέλου αναπαριστά την πλήρη χρονική εξέλιξη των

υδρολογικών διεργασιών (σε υγρές και ξηρές περιόδους). Ο δεύτερος διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με τη χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών και τα μοντέλα διαχωρίζονται σε αδιαμέριστα και κατανεμημένα. Στα πρώτα η λεκάνη είναι μια χωρική ενότητα με ενιαία υδρολογικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά, ενώ στα δεύτερα η λεκάνη διασπάται σε τμήματα με διαφορετικά υδρολογικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά. Τα συνεχή μοντέλα βροχής-απορροής μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια: (α) το κριτήριο του είδους των εξισώσεων και (β) το κριτήριο χειρισμού αβεβαιότητας. Σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο, αυτά χωρίζονται σε μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box), εννοιολογικά μοντέλα (conceptual) και μοντέλα φυσικής βάσης (physics-based). Το πρώτο είδος μοντέλου χρησιμοποιεί σχέσεις της θεωρίας της ανάλυσης συστημάτων χωρίς θεώρηση φυσικών νόμων ούτε και εμπειρικών σχέσεων. Το δεύτερο είδος χρησιμοποιεί μαθηματικές σχέσεις που έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο και το τρίτο είδος κάνει χρήση μαθηματικών σχέσεων που αναπαριστούν φυσικούς νόμους. Το κριτήριο χειρισμού αβεβαιότητας, που βασίζεται στο αν λαμβάνεται υπ' όψιν η τυχαιότητα των φαινομένων, τα μοντέλα ταξινομούνται σε αιτιοκρατικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic). Στα αιτιοκρατικά τα υδρολογικά μεγέθη έχουν σταθερές τιμές χωρίς αβεβαιότητα, ενώ στα στοχαστικά ορισμένα εκ των υδρολογικών μεγεθών έχουν αβεβαιότητα (Τσακίρης, 2006).

3.3 Το Μοντέλο SWAT

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) είναι ένα σύνολο επιμέρους μοντέλων φυσικής βάσης ή εννοιολογικών (Τσακίρης, 2006). Η γενικότερη ιδέα του μοντέλου είχε αρχίσει να αναπτύσσεται σχεδόν 30 χρόνια πριν και συγκεκριμένα το πρόγραμμα SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) θεωρείται πρόγονος του SWAT που δημιουργήθηκε από τους Arnold και Williams το 1987. Ωστόσο, το 1995 ο Arnold και οι συνεργάτες του ένωσαν δύο προγράμματα, SWRRB και το ROTO (Routing Outputs to Outlets) για να αντιμετωπίσουν προηγούμενους περιορισμούς του προγράμματος, όπως το όριο για υπολογισμούς μέχρι δέκα υπολεκάνες. Το αποτέλεσμα ήταν το SWAT το οποίο αναπτύχθηκε σε συνεργασία του Arnold με το Αμερικανικό Υπουργείο Γεωργίας (U.S. Department of Agriculture) και το Πανεπιστήμιο του Τέξας (Texas A&M University) και η ανάπτυξή του συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.

Το μοντέλο SWAT είναι ένα εξελιγμένο υπολογιστικό μοντέλο που προσομοιώνει μια σειρά από φυσικές και χημικές διεργασίες στη λεκάνη απορροής και μπορεί να προβλέπει τις μεταβολές και επιπτώσεις των μετεωρολογικών δεδομένων, των εδαφολογικών, των χρήσεων γης, των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων, της ρύπανσης των υδάτων, της διάβρωσης των εδαφών, της γονιμότητας και ανάπτυξης των καλλιεργειών. Το μοντέλο αυτό βοηθάει στην κατανόηση της πολυπλοκότητας του οικοσυστήματος και των διεργασιών των διαθέσιμων υδατικών πόρων, της ποιότητας των υδάτων, της ευπάθειας και της ανάπτυξης των αγροτικών προϊόντων, όπως επίσης και κοινωνικοοικονομικά δημογραφικά ζητήματα σε όλο τον κόσμο.

Για τη χρήση του μοντέλου αυτού, σε ό,τι αφορά τις υδρολογικές διεργασίες, απαιτούνται γεωγραφικοί χάρτες των περιοχών που θα μελετήσουμε, την κατασκευή ψηφιακού μοντέλου εδάφους με καλή χωρική ανάλυση, την ψηφιακή μορφή χρήσεων γης της περιοχής, χρονοσειρές υδρολογικών μεγεθών (βροχοπτώσεις, θερμοκρασίες), τις γεωγραφικές θέσεις των βροχομετρικών-μετεωρολογικών σταθμών, που θα χρησιμοποιηθούν, πολύ καλή γνώση της γεωλογίας της περιοχής και δημιουργία ανάλογων ψηφιακών χαρτών. Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις μεταβλητές που αντιστοιχούν στην κάθε μια παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Προσομοίωση του κλίματος:

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Θερμοκρασία αέρα
- Θερμοκρασία νερού
- Θερμοκρασία εδάφους
- Ταχύτητα ανέμου
- Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- Τήξη χιονιού
- Υδρατμοί
- Σχετική υγρασία αέρα
- Καιρικές συνθήκες
- Κλιματική αλλαγή

2. Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών:

- Παραγωγή απορροής (μέθοδοι SCS, Green and Ampt)
- Εξατμισοδιαπνοή (μέθοδοι Penman-Monteith, Priestley-Taylor και Hargreaves)
- Πραγματική εξατμισοδιαπνοή
- Διακίνηση του νερού στο έδαφος (ακόρεστη ροή)
- Διακίνηση του νερού σε υπόγειους υδροφορείς (κορεσμένη ροή)

3. Προσομοίωση παραγωγής θρεπτικών

4. Προσομοίωση διακίνησης φερτών υλών

5. Προσομοίωση ανάπτυξης καλλιεργειών

6. Προσομοίωση καλλιεργητικών μεθόδων και πρακτικών

7. Προσομοίωση διακίνησης νερού και ρύπων σε υδάτινα σώματα

Ως χωρική κλίμακα το μοντέλο χρησιμοποιεί τα λεγόμενα HRU ή αλλιώς μονάδες υδρολογικής απόκρισης που είναι υδρολογικά ομογενείς περιοχές της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Η χρονική κλίμακα του μοντέλου είναι ημερήσια ενώ τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να είναι και σε μηνιαία αλλά και ετήσια κλίμακα.

3.3.1 Γενικά για τη λειτουργία του μοντέλου

Η βασική αρχή ανάπτυξης του SWAT στηρίζεται στην κατασκευή ενός μοντέλου που να προβλέπει την επίδραση της διαχείρισης της γης στο νερό, τα φερτά και τα αγροτικά χημικά, σε μεγάλες λεκάνες απορροής με βάση υδρομετεωρολογικά στοιχεία. Για την ικανοποίηση αυτού του στόχου το μοντέλο έχει τις εξής ιδιότητες:

1. Έχει φυσική βάση, δηλαδή απαιτεί συγκεκριμένες πληροφορίες για τον καιρό τις ιδιότητες του εδάφους, τη βλάστηση, την τοπογραφία και τις διαχειριστικές πρακτικές στην λεκάνη απορροής.
2. Είναι υπολογιστικά ταχύ, έτσι ώστε να εφαρμόζεται σε μεγάλες λεκάνες σε λογικό χρόνο.

3. Είναι συνεχές, μπορεί δηλαδή να προσομοιώνει μεγάλες περιόδους για την μελέτη των επιπτώσεων από τις αλλαγές στη διαχείριση.

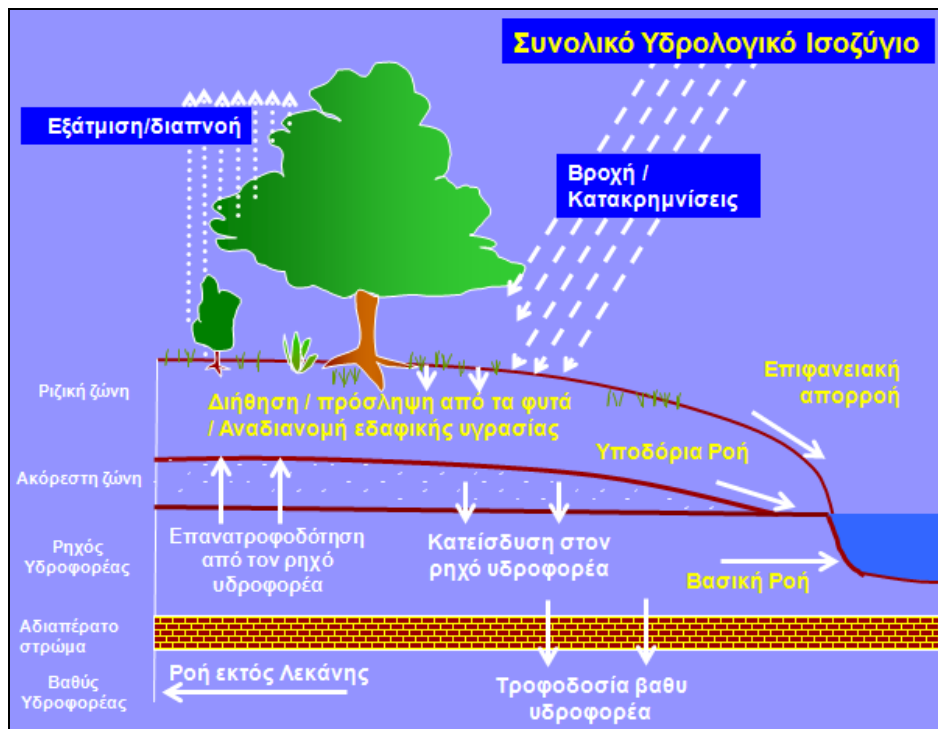
Το μοντέλο αυτό δεν έχει πάψει να εξελίσσεται. Μάλιστα, από το 2005 και έπειτα έχουν υπάρξει αρκετές εκδόσεις, που βελτιώνουν την ακρίβεια του μοντέλου. Οι βασικές του αρχές όμως και η λειτουργία του δεν έχουν αλλάξει από τότε. Αυτό που έχει συμβεί είναι να προστεθούν και κάποιες άλλες παράμετροι ώστε η εκτίμηση της απορροής ενός ποταμού να είναι ακόμα πιο ακριβής. Οι παράμετροι αυτές, ωστόσο, είναι πολύ εξειδικευμένες και μόνο ένα μέρος τους θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική, γιατί τα δεδομένα για τον προσδιορισμό τους είναι δυσεύρετα.

Κάποια από τα μοντέλα τα οποία το SWAT εξέλιξε, ανέπτυξε και ενσωμάτωσε τις διαδικασίες τους, είναι τα παρακάτω:

1. CREAMS: Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
2. EPIC: Erosion Productivity Impact Calculator
3. GLEAMS: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems
4. SWRRB: Simulator for Water Resources in Rural Basins
5. QUAL2E: In Stream Nutrient Processes
6. ROTO: Routing Outputs to Outlet

Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος που προσομοιώνει το μοντέλο αυτό συμβαδίζει απόλυτα με το τι συμβαίνει στη λεκάνη και παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.2. Η λογική της κίνησης του νερού στη λεκάνη απορροής στηρίζεται σε γνωστούς τύπους και μεθοδολογίες που παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Υδρολογικός κύκλος που προσομοιώνει το μοντέλο SWAT (Πηγή: Neitsch et al.,2005)

Χρησιμοποιώντας τις πιο γνωστές μεθόδους της επιστήμης και της υδρολογίας, το SWAT προσομοιώνει τα σημαντικότερα φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος στη λεκάνη απορροής, όπως η μετατροπή της κατακρήμνισης σε απορροή, η διήθηση, η εξάτμιση, η υπόγεια απορροή, η διόδευση στα υδατορεύματα, η στερεομεταφορά, η μεταβολή της συγκέντρωσης των χημικών και άλλες κατακρημνίσματα που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής. Έχει επίσης τη δυνατότητα παραγωγής των κατακρημνισμάτων μέσω γέννησης χρονοσειρών με βάση ιστορικά δεδομένα, αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, χρησιμοποιώντας μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης για τον καθορισμό μιας ημέρας ως βροχερής ή όχι και μιας στατιστικής κατανομής για τον υπολογισμό του ύψους βροχόπτωσης.

Με στατιστικές κατανομές και ιστορικά μέσα μηνιαία δεδομένα γεννώνται χρονοσειρές για τις υπόλοιπες μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα ανέμου και η σχετική υγρασία, αν και οι τρεις τελευταίες είναι απαραίτητες μόνο στην περίπτωση που η επιλεγμένη μέθοδος για την προσομοίωση της χρονοσειράς δυναμικής εξατμισοδιαπνοής το απαιτεί. Η κατακρήμνιση εμφανίζεται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, ανάλογα με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Η χιονόπτωση σχηματίζει στρώση χιονιού στο έδαφος, το οποίο τήκεται όταν η εδαφική θερμοκρασία το επιτρέψει. Η δε συμπεριφορά του λιωμένου χιονιού είναι αντίστοιχη με αυτή της βροχόπτωσης (Neitsch et al., 2005).

Το νερό της βροχής απορρέει επιφανειακά ή διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που απορρέει ρυθμίζεται από το συντελεστή απορροής ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τις χρήσεις γης. Η εκτίμηση του συντελεστή απορροής γίνεται με μια τροποποίηση της μεθόδου SCS για τον υπολογισμό του αριθμού καμπύλης απορροής CN. Το νερό που απορρέει επιφανειακά καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες και είναι αυτό που αποτελεί τον πλημμυρικό όγκο του επεισοδίου. Το υπόλοιπο μέρος του νερού, δηλαδή αυτό που διηθείται, ακολουθεί κατακόρυφη ή οριζόντια διαδρομή μέσα στο έδαφος. Το έδαφος χωρίζεται από το μοντέλο SWAT σε 3 κύριες στρώσεις:

1. Το εδαφικό προφίλ
2. Τον επιφανειακό ή αβαθή υδροφορέα
3. Το βαθύ υδροφορέα

Όσον αφορά την πρώτη στρώση, το εδαφικό προφίλ, ένα μέρος του νερού που απορρέει σε αυτό περνάει στην αέρια φάση είτε με την εδαφική εξάτμιση είτε με τη διαπνοή των φυτών, κατά την οποία δεσμεύεται το νερό από τα φυτά (διαμέσου των ριζών τους) και κατόπιν αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα από την διαπνοή των φυλλωμάτων τους. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιήσει 3 μεθόδους (Priestley-Taylor, Hargreaves και Penman-Monteith) ανάλογα με τα δεδομένα που διαθέτουμε κάθε φορά. Μέρος του νερού που απομένει στο στρώμα αυτό συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την υποδερμική ροή (Lateral flow). Το μέρος του νερού που «περισεύει» διηθείται κατακόρυφα στην επόμενη στρώση. Η κατακόρυφη ροή λαμβάνει χώρα όταν η υδατοϊκανότητα μιας εδαφικής στρώσης υπερβαίνει το όριο κορεσμού της και η κάτω στρώση δεν έχει ακόμη κορεστεί. Η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους προσομοιώνεται από το μοντέλο SWAT σε κάθε χρονικό βήμα με βάση την ποσότητα νερού που εισέρχεται σε αυτό και της υδατοχωρητικότητας που υπολογίζεται ως διαφορά της περιεκτικότητας νερού στο σημείο υδατοϊκανότητας και του σημείου μόνιμης μάρανσης.

Στη συνέχεια η επόμενη στρώση, που αφορά τον επιφανειακό υδροφορέα, τροφοδοτείται με διήθηση από υδατορεύματα και ταμιευτήρες. Η αποφόρτιση του γίνεται είτε με την υπόγεια ροή (Return flow), με την οριζόντια δηλαδή κίνηση του νερού που τροφοδοτεί τους

υδάτινους αποδέκτες, είτε με την κατεΐσδησή του στο τελευταίο στρώμα, το βαθύ υδροφορέα. Ταυτόχρονα, ένα μέρος από το νερό του επιφανειακού υδροφορέα μπορεί να κινηθεί προς τα πάνω δηλαδή προς το εδαφικό στρώμα με μια διαδικασία που το πρόγραμμα παρουσιάζει ως «Revar». Το νερό που φτάνει στο τελευταίο στρώμα, το βαθύ υδροφορέα, χάνεται και το μοντέλο θεωρεί ότι καταλήγει εκτός της λεκάνης απορροής που εξετάζει.

Το νερό που τελικά καταλήγει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής. Σε όλες τις φάσεις της μετέπειτα διόδευσης του νερού από μία θέση ποταμού στα κατάντη, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις απώλειες μετάβασης (διήθηση στον πυθμένα του ποταμού και εξάτμιση), που για κάποια υδατορεύματα μπορεί να μην είναι αμελητέες. Οι απώλειες μετάβασης προκύπτουν ως συνάρτηση του μήκους και πλάτους των καναλιών και της διάρκειας της ροής. Οι μέθοδοι διόδευσης που περιλαμβάνει το μοντέλο SWAT είναι αυτή της μεταβλητής αποθήκευσης και η μέθοδος Muskingum, που βασίζονται στο μοντέλο κινηματικού κύματος. Η διόδευση πάντως, μικρή σημασία έχει όταν η λεκάνη απορροής έχει μικρό μέγεθος και χρόνο συγκέντρωσης πολύ μικρότερο της ημέρας ή όταν ο χρήστης μελετά την περιοχή ενδιαφέροντος σε μηνιαίο ή ετήσιο βήμα.

Το μοντέλο σε όλη τη διάρκεια της ροής του νερού υπολογίζει τις απώλειες μετάβασης και απορρόφησης, τις οποίες όμως και αφαιρεί, καθώς αυτές μειώνουν τον όγκο της απορροής. Το SWAT χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lane (USDA, 1983) για την εκτίμηση των απωλειών αυτών, οι οποίες προκύπτουν σε συνάρτηση με το μήκος και το πλάτος των καναλιών ροής του νερού.

Το διάγραμμα ροής, που εκτελείται από το υδρολογικό μοντέλο SWAT και βάσει αυτού πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μεγεθών του υδρολογικού κύκλου, παρουσιάζεται στο Σχήμα Β.2 του Παραρτήματος Β.

3.3.2 Περιγραφή του μοντέλου

Υδρολογικές διαδικασίες

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου του Σχήματος 3.1 σε κάθε υδρολογική μονάδα είναι:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (3.1)$$

Όπου, SW_t είναι η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t , t είναι ο χρόνος σε ημέρες, R η ημερήσια κατακρήμνιση την ημέρα i , Q η ημερήσια απορροή, ET η εξατμισοδιαπνοή, P η διήθηση και QR η υπόγεια ροή. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

i. Επιφανειακή απορροή Q

Με δεδομένη την ημερήσια βροχόπτωση, το μοντέλο προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή, χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μέθοδο των καμπυλών της SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972), όπως προαναφέρθηκε. Η τεχνική αυτή επιλέχθηκε γιατί: (α) έχει προκύψει από πολυετή πειράματα σε μικρές λεκάνες απορροής στις ΗΠΑ και έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια και αυτό την κάνει και αξιόπιστη εκτός από δοκιμασμένη, (β) είναι υπολογιστικά αποδοτική, (γ) τα δεδομένα εισόδου είναι γενικώς διαθέσιμα από τους πίνακες της SCS για δεδομένο τύπο εδάφους και είδος φυτοκάλυψης και (δ) συσχετίζει την απορροή με το έδαφος, τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης, οι οποίες αναφέρονται σε δεδομένα για τη σπορά, το θερισμό, την άρδευση των καλλιεργειών, ακόμη και την περιεκτικότητα φυτοφαρμάκων σε αυτές.

Η μέθοδος συσχετίζει την επιφανειακή απορροή με τη βροχόπτωση και τη μέγιστη δυνατή κατακράτηση του εδάφους. Η τελευταία είναι απόρροια της υδρομορφίας του εδάφους (A, B, C, ή D, με A να δηλώνει πολύ και D ελάχιστα διαπερατό έδαφος), του είδους φυτοκάλυψης και της πυκνότητας φύτευσης. Οι παράγοντες αυτοί εκφράζονται αθροιστικά με τον αριθμό καμπύλης CN κατά SCS, ενώ πίνακες με τέτοιους αριθμούς υπάρχουν στα σχετικά εγχειρίδια (USDA, Soil Conservation Service, 1972).

Η επιφανειακή απορροή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση με τη χρήση των καμπυλών της μεθόδου SCS:

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{R + 0.8s}, \quad R \geq 0.2s \quad (\text{σε mm}) \quad (3.2)$$

$$Q = 0.0, \quad R \leq 0.2s \quad (3.3)$$

Όπου, Q είναι η ημερήσια απορροή, R η ημερήσια βροχόπτωση και s μία παράμετρος κατακράτησης. Η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται από υπολεκάνη σε υπολεκάνη και ανάλογα με το χρόνο. Συνδέεται άμεσα με τον αριθμό καμπύλης CN σύμφωνα με την εξίσωση SCS (USDA, SCS, 1972) που ακολουθεί:

$$s = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (\text{σε mm}) \quad (3.4)$$

Ο αριθμός CN αναφέρεται σε συνθήκες υγρασίας 2 (CN_2) και λαμβάνεται για κάθε περιοχή από το εγχειρίδιο υδρολογίας της SCS. Ο αριθμός αυτός αναφέρεται κατά αποκλειστικότητα σε κλίσεις εδάφους 5%. Για οποιαδήποτε άλλη κλίση χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος :

$$CN_{2S} = \frac{1}{3} (CN_3 - CN_2) [1 - 2 \exp(-13.86S)] + CN_2 \quad (3.5)$$

Όπου: CN_{2S} είναι η τιμή του CN_2 προσαρμοσμένη στη εκάστοτε κλίση, CN_3 η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε υγρές υδρολογικές συνθήκες και S η μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής.

Ο αριθμός CN_1 που αντιστοιχεί σε ξηρές υδρολογικές συνθήκες συνδέεται άμεσα με τους αριθμούς CN_2 και CN_3 με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + [0.000673(100 - CN_2)]} \quad (3.6)$$

Οι πιο πρόσφατες εκδόσεις του SWAT (2005, 2009) επιτρέπουν στους χρήστες να επιλέξουν ανάμεσα σε 2 μεθόδους για τον υπολογισμό της παραμέτρου κατακράτησης s . Η παραδοσιακή μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις στην εδαφική υγρασία. Η εναλλακτική μέθοδος θέλει την παράμετρο αυτή να μεταβάλλεται ανάλογα με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Ο υπολογισμός του αριθμού CN, σε ημερήσια βάση, προστέθηκε στο πρόγραμμα ως ένας παράγοντας που καθορίζει την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Η προσθήκη αυτή έγινε γιατί η παραδοσιακή μέθοδος προέβλεπε πολύ μεγάλη απορροή για τα ρηχά εδάφη.

Όταν η παράμετρος s διαφοροποιείται ανάλογα με τις διακυμάνσεις στην εδαφική υγρασία χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$s = s_1 \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp[w_1 - w_2(SW)]} \right) \quad (3.7)$$

Όπου, s_1 είναι η τιμή του s που σχετίζεται με τον αριθμό CN_1 , SW είναι το ποσοστό εδαφικής υγρασίας και w_1, w_2 είναι οι παράμετροι σχήματος.

Η τιμή s_1 ορίζεται ως εξής:

$$s_1 = 25.4 \left(\frac{1000}{CN_1} - 10 \right) \quad (3.8)$$

Όταν η παράμετρος s διαφοροποιείται ανάλογα με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι:

$$s = s_{prev} + ET_i * \exp \left(\frac{-cncoef - s_{prev}}{s_1} - R_i - Q_i \right) \quad (3.9)$$

Όπου, s_{prev} είναι η παράμετρος κατακράτησης της προηγούμενης μέρας.

Το πρόγραμμα υπολογίζει την παράμετρο κατακράτησης ακόμα και για παγωμένες επιφάνειες με τον κατάλληλο τύπο.

ii. Διήθηση

Το SWAT υπολογίζει τη ροή μέσα από κάθε στρώμα. Όταν το νερό ρέει σε ένα στρώμα εδάφους το οποίο έχει ήδη κορεστεί, τότε αυτομάτως διηθείται στο αμέσως επόμενο μη κορεσμένο στρώμα εδάφους. Η ποσότητα του νερού που κινείται από το υπερκείμενο κορεσμένο στρώμα προς τα κάτω υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$O_i = SW_{0i} \left[1 - \exp \left(\frac{-\Delta t}{TT_i} \right) \right] \quad (3.10)$$

Όπου, O είναι ο ρυθμός διήθησης σε mm/ημέρα, SW_0 είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην αρχή της ημέρας σε mm, Δt το χρονικό βήμα (24 h) και TT ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από το στρώμα i σε ώρες.

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στο τέλος της ημέρας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$SW_i = SW_{0i} \exp \left(\frac{-\Delta t}{TT_i} \right) \quad (3.11)$$

Συνεπώς, η διήθηση μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας το SW από το SW_0 .

Ο χρόνος διόδευσης TT υπολογίζεται, για κάθε εδαφικό στρώμα χωριστά, με την ακόλουθη γραμμική εξίσωση αποθήκευσης:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{H_i} \quad (3.12)$$

Όπου, H_i είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/ώρα και FC_i η υδατοϊκανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαρασμού. Η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$H_i = SC_i \left(\frac{SW_i}{UL_i} \right)^{\beta_i} \quad (3.13)$$

Όπου, SC_i είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το στρώμα i σε mm/ώρα, β_i είναι η παράμετρος που προκαλεί το H_i να πλησιάζει στο μηδέν καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i .

Όπου απαιτείται, η ροή διαμέσου των ρωγμών δίνεται από σχέσεις παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η ποσότητα του διηθήματος που προκαλείται από κίνηση μέσα από μια ρωγή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$O_i = O_{i-1} \left[\exp \left(\frac{-\Delta t}{TT_{ci}} \right) \right] \quad (3.14)$$

Όπου, O_{i-1} είναι η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/ημέρα ($R-Q$ για το ανώτερο στρώμα) και TT_{ci} είναι ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από τη ρωγή σε ώρες.

iii. Υποδερμική ροή

Το SWAT υπολογίζει την υποδερμική (ή ενδιάμεση) ροή με ένα μοντέλο κινηματικής αποθήκευσης, που χρησιμοποιεί την εξίσωση συνέχειας λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το εδαφικό προφίλ σαν όγκο ελέγχου (Sloan and Moore, 1983). Η ποσότητα νερού που μεταφέρεται με αυτό το είδος της ροής αναμένεται να είναι μεγάλη όταν η υδραυλική αγωγιμότητα του κατώτερου στρώματος του εδάφους είναι μικρή και δεν επιτρέπει την κατείσδυση προς τον αβαθή υδροφορέα και όταν οι κλίσεις εδάφους είναι μεγάλες (Neitsch et al., 2005). Η εξίσωση συνέχειας του συγκεκριμένου μοντέλου την οποία χρησιμοποιεί και το μοντέλο SWAT είναι η εξής:

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = iL - \frac{q_{lat1} + q_{lat2}}{2} \quad (3.15)$$

Όπου, S είναι ο αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη (νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα), t είναι ο χρόνος σε ώρες, q_{lat} είναι η υποδερμική ροή σε m^3/h , i είναι ο ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m^2/h , L το μήκος της μισγάγγειας σε m και οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην αρχή και το τέλος του χρονικού βήματος.

Ο όγκος του νερού που αποστραγγίζεται ανανεώνεται καθημερινά στο μοντέλο της λεκάνης. Η υποδερμική ροή στην έξοδο της μισγάγγειας δίνεται από τον τύπο:

$$q_{lat} = H_0 \cdot v \cdot w \quad (3.16)$$

Όπου, v είναι η ταχύτητα ροής στην έξοδο και w το πλάτος της μισγάγγειας. Η ταχύτητα στην έξοδο υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$v = K_s \sin(a) \quad (3.17)$$

Όπου, K_s είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

Από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$q_{lat} = 0.024 \frac{2SK_s \sin(a)}{\Theta_a L} \quad (3.18)$$

Αν η κορεσμένη ζώνη υψωθεί πάνω από το τελευταίο εδαφικό στρώμα, το νερό θα κινηθεί προς την πιο πάνω στρώση. Η ποσότητα του νερού που κινείται προς τα πάνω υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q_{sat} = \frac{24K_s L_s}{L} \quad (3.19)$$

Όπου, L_s είναι το μήκος της κορεσμένης κλιτύς σε m.

iv. Υπόγεια απορροή

Το υπόγειο νερό που συνεισφέρει στη ροή του ποταμού (βασική ροή) διέπεται από τις εξισώσεις ενός απλού μοντέλου, που υπολογίζει το ισοζύγιο του επιφανειακού υδροφορέα σε ημερήσιο βήμα. Για την ποσότητα του νερού που επιστρέφει στο ριζόστρωμα (*revar*), εκείνη που κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα και χάνεται καθώς και εκείνη που αποτελεί την επιστρέφουσα ροή στο ποτάμι, σημαντικό ρόλο παίζουν οι παράμετροι υπόγειου νερού στα σχετικά αρχεία του προγράμματος. Το SWAT ως μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας χρησιμοποιεί απλουστευμένες εξισώσεις ώστε να επιτρέψει τη συνεισφορά των υπόγειων υδροφορέων στη συνολική παροχή του ποταμού. Για το λόγο αυτό, πολύ συχνά συστήνεται η χρήση φίλτρων που διαχωρίζουν την παρατηρημένη χρονοσειρά παροχής σε χρονοσειρά βασικής και άμεσης απορροής. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συγκρίνει τις συνιστώσες της απορροής, όπως προσομοιώθηκαν από το μοντέλο, με τις αντίστοιχες παρατηρημένες και με εμπειρική μεταβολή των παραμέτρων υπόγειου νερού να επιτύχει μία ικανοποιητική εκτίμηση της υπόγειας συνεισφοράς και επομένως, της αναλογίας μεταξύ αυτής και εκείνης από την άμεση απορροή. Το υδατικό ισοζύγιο για τον επιφανειακό υδροφορέα φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$Vsa_i = Vsa_{i-1} + Rc - revar - q_{rf} - perc_{gw} - WU_{SA} \quad (3.20)$$

Όπου, V_{sa} είναι η αποθήκευση του επιφανειακού υδροφορέα, R_c η επαναφόρτιση, *revar* η ροή του νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ, q_{rf} η υπόγεια ροή, $perc_{gw}$ το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα, WU_{SA} η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα και i η ημέρα.

Η υπόγεια ροή δίνεται από τον τύπο:

$$q_{rf} = \frac{8K_d}{L^2} h \quad (3.21)$$

Όπου, K_d είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, L ο χώρος απορροής και h το ύψος του νερού.

Αν δεχτούμε ότι ο επιφανειακός υδροφορέας τροφοδοτείται με διήθηση από υδατορεύματα ή από το εδαφικό προφίλ (με βροχόπτωση και άρδευση) και αποφορτίζεται από την υπόγεια ροή στα υδατορεύματα, οι μεταβολές στη στάθμη του νερού μπορούν να υπολογιστούν από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Rc - q}{0.8\mu} \quad (3.22)$$

Όπου, R_c η τροφοδότηση του επιφανειακού υδροφορέα και μ η ειδική απόδοση.

Με τον όρο «revar» νοείται το νερό που ρέει από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ και χάνεται με την εξάτμιση ή την πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών. Ο όγκος του δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$revar = \beta_r ET_{act} \quad \text{αν } revar > revar_{st} \quad (3.23)$$

$$revar = 0.0 \quad \text{αν } revar < revar_{st} \quad (3.24)$$

Όπου, ET_{act} είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ, β_r είναι ο συντελεστής $revar$ και $revar_{st}$ είναι η αποθήκευση του εδαφικού στρώματος.

v. Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνει συλλογικά τις μετατροπές του νερού από την υγρή στην αέρια φάση του, δηλαδή την εξάτμιση από λίμνες και ταμειυτήρες, ποτάμια, το έδαφος και τις επιφάνειες του φυλλώματος και επίσης τη διαπνοή από τα φυτά και την εξαέρωση από το χιόνι. Το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Αυτές είναι: η μέθοδος Penman-Monteith (1965), η μέθοδος Hargreaves and Samani (1985) και η μέθοδος των Priestley-Taylor (1972). Οι τρεις αυτές μέθοδοι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα δεδομένα που χρειάζονται. Η πρώτη μέθοδος, των Penman-Monteith, απαιτεί ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία. Η μέθοδος των Priestley-Taylor χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα, ενώ η μέθοδος Hargreaves and Samani μόνο τη θερμοκρασία του αέρα (μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία- T_{max} , T_{min}).

Η εξάτμιση από το έδαφος και τα φυτά υπολογίζεται ξεχωριστά από το μοντέλο. Η πραγματική εξάτμιση του εδαφικού νερού γίνεται με τη χρήση εκθετικών συναρτήσεων του εδαφικού βάθους και της περιεκτικότητας σε νερό. Η δυνητική εξάτμιση υπολογίζεται ως συνάρτηση της δυνητικής εξάτμισης και του δείκτη φυλλωμάτων (Leaf Area Index-LAI). Η διαπνοή των φυτών προσομοιώνεται σε γραμμική συνάρτηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και του δείκτη φυλλωμάτων.

vi. Εξάτμιση και διαπνοή

Το μοντέλο διαχωρίζει την εξάτμιση από τη διαπνοή χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_p = \frac{(E_0)(LAI)}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (3.25)$$

$$E_p = E_0 \quad LAI > 3.0 \quad (3.26)$$

Όπου, E_p είναι ο προβλεπόμενος ρυθμός διαπνοής των φυτών σε mm/ημέρα. Αν η εδαφική υγρασία είναι περιορισμένη, η διαπνοή θα ελαττωθεί.

Η δυνητική εξάτμιση από το έδαφος υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το εδαφικό κάλυμμα ως εξής:

$$E_s = (E_0)(EA) \quad (3.27)$$

Όπου, E_s είναι ο δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/ημέρα και EA ο δείκτης εδάφους. Η τιμή του δείκτη αυτού δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$EA = \exp(-5.0 \times 10^{-5} \cdot CV) \quad (3.28)$$

Όπου, CV είναι το άθροισμα της εδαφικής βιομάζας και των καταλοίπων της καλλιέργειας σε kg/ha.

Η πραγματική εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας υπολογίζεται πάνω στη βάση των ανώτερων 0.2 m του εδαφικού καλύμματος και της χιονοκάλυψης. Αν υπάρχουν περισσότερο από 0.5 mm χιόνι, η λευκαύγεια παίρνει την τιμή 0.6 και ο δείκτης εδάφους γίνεται αυτομάτως 0.5. Το χιόνι εξατμίζεται με αυτό το ρυθμό μέχρι να εξαφανιστεί. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας.

Τέλος, η δυναμική εξάτμιση του εδαφικού νερού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα φυτά και μάλιστα μειώνεται σε περιόδους υψηλής χρήσης του από αυτά. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$E_s^* = \min \left[E_s, \frac{(E_s)(E_0)}{E_s + E_p} \right] \quad (3.29)$$

Όταν το E_p είναι μικρό το E_s^* τείνει στο E_p αλλά όσο το E_p πλησιάζει το E_0 το E_s^* τείνει στο $E_s/(1+EA)$.

vii. Τήξη χιονιού

Η τήξη του χιονιού καθορίζεται από τον αέρα και από τη θερμοκρασία του χιονιού. Αν υπάρχει χιόνι η τήξη του γίνεται σε ημέρες όπου η θερμοκρασία της δεύτερης εδαφικής στρώσης υπερβαίνει τους 0°C. Η τήξη του χιονιού υπολογίζεται από το SWAT μέσω της παρακάτω συνάρτησης:

$$SNO_{mli} = b_{mli} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mli} \right] \quad (3.30)$$

Όπου, SNO_{mli} είναι η ποσότητα του τηγμένου χιονιού σε mm/ημέρα, b_{mli} είναι ο παράγοντας τήξης του χιονιού για τη μέρα εκείνη σε mm/ημέρα-°C, sno_{cov} είναι το ποσοστό του HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι, T_{snow} είναι η θερμοκρασία του χιονιού εκείνη την ημέρα σε °C, T_{mx} είναι η μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα εκείνη και T_{mli} είναι η θερμοκρασία πάνω από την οποία επιτρέπεται η τήξη του χιονιού.

Ο παράγοντας τήξης του χιονιού δέχεται μεταβολές ανάλογα με την εποχή στην οποία θέλουμε να τον υπολογίσουμε. Παίρνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$b_{mli} = \frac{b_{mli6} + b_{mli12}}{2} + \frac{b_{mli6} - b_{mli12}}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (d_n - 81)\right) \quad (3.31)$$

Οι παράγοντες αυτοί αντιστοιχούν στην 21^η Ιουνίου και στην 21^η Δεκεμβρίου αντίστοιχα και το σύμβολο d_n αντιπροσωπεύει την ημέρα του έτους στην οποία βρισκόμαστε. Για τις αγροτικές περιοχές ο παράγοντας αυτός κυμαίνεται από 1.4 - 6.9 mm/ημέρα-°C (Huber & Dickinson, 1988), στις αστικές περιοχές ο παράγοντας αυτός είναι μεγαλύτερος λόγω του κλίματος που δημιουργείται σ' αυτές από τη μόλυνση και τα αυτοκίνητα. Η τιμή του κυμαίνεται από 3.0 - 8.0 (Bengston, 1981).

Μετεωρολογικές διεργασίες

Το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί ως κύρια δεδομένα εισόδου πέντε μετεωρολογικές παραμέτρους: την ημερήσια κατακρήμνιση, τη θερμοκρασία του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Τα δεδομένα αυτά αν είναι διαθέσιμα, τότε μπορούμε να τα εισάγουμε κατευθείαν στο πρόγραμμα, ώστε να συνεχίσουμε με την προσομοίωση. Σε κάθε άλλη περίπτωση έλλειψης κάποιων δεδομένων ή και όλων των δεδομένων μίας ή και περισσότερων παραμέτρων, τότε το SWAT μπορεί να προσομοιώσει αυτά τα δεδομένα για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής ή να διαχωριστούν και να υπολογιστούν ξεχωριστά για την κάθε υπολεκάνη. Παρακάτω αναλύονται οι πέντε μετεωρολογικές παράμετροι.

i. Κατακρήμνιση

Το μοντέλο SWAT παράγει χρονοσειρές κατακρήμνισης χρησιμοποιώντας μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης (Nicks, 1974). Η αλυσίδα Markov πρώτης τάξης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της μέρας σε υγρή ή ξηρή. Συνεπώς, τα δεδομένα εισόδου πρέπει να είναι ημερήσια και για κάθε μέρα πρέπει να ξέρουμε αν η προηγούμενή της είναι υγρή ή ξηρή. Για το λόγο αυτό παράγεται ένας τυχαίος αριθμός και συγκρίνεται με την πιθανότητα υγρής-ξηρής ημέρας. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος ή ίσος με την πιθανότητα, τότε εκείνη την ημέρα υπάρχει κατακρήμνιση.

Αν οι πιθανότητες αυτές δεν είναι διαθέσιμες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μέσος μηνιαίος αριθμός υγρών ημερών. Η πιθανότητα μιας ημέρας να είναι υγρή υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$PW = \frac{NWD}{ND} \quad (3.32)$$

όπου: PW είναι η πιθανότητα μιας υγρής μέρας, NWD ο αριθμός των υγρών ημερών και ND οι ημέρες που έχει ο μήνας.

Η πιθανότητα μιας υγρής ημέρας μετά από μια ξηρή $P(W|D)$ μπορεί να υπολογιστεί ως κλάσμα του PW, δηλαδή θα είναι:

$$P(W/D) = \beta PW \quad (3.33)$$

όπου: β είναι ένας συντελεστής που κυμαίνεται συνήθως από 0.6 - 0.9.

Η πιθανότητα μιας υγρής μέρας μετά από μια υγρή εκτιμάται με την παρακάτω σχέση:

$$P(W/W) = 1.0 - \beta + P(W/D) \quad (3.34)$$

Ο υπολογισμός της κατακρήμνισης που συμβαίνει μια υγρή μέρα έχει προταθεί από τον Nicks (1974) και βασίζεται σε μια κατανομή του Fiering (1967). Η εξίσωση αυτή δίνεται παρακάτω:

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2\sigma_{mon} \cdot \left(\frac{\left[\left(\left(\frac{SND_{day} - g_{mon}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right)^3 - 1 \right]}{g_{mon}} \right) \quad (3.35)$$

όπου: R_{day} είναι η ποσότητα της βροχής για μια συγκεκριμένη μέρα σε mm, μ_{mon} είναι η μέση ημερήσια βροχόπτωση για ένα μήνα, σ_{mon} η τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης για ένα μήνα σε mm, SND_{day} η κανονική τυπική απόκλιση για την ημέρα και g_{mon} είναι ο συντελεστής κύρτωσης.

ii. *Θερμοκρασία αέρα και ηλιακή ακτινοβολία*

Η θερμοκρασία του αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζονται από το SWAT με τη χρήση ενός μοντέλου που αναπτύχθηκε από τον Richardson (1981). Τα ημερήσια μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας παράγονται από μια πολυπαραμετρική κανονική κατανομή.

Ειδικότερα, το μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας απαιτεί ως δεδομένα εισόδου τα μηνιαία μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας και τις τυπικές αποκλίσεις. Όταν αυτές δεν είναι διαθέσιμες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μακροπρόθεσμα παρατηρημένα μέγιστα και ελάχιστα της μηνιαίας θερμοκρασίας. Επίσης, το μοντέλο εκτιμά την τυπική απόκλιση ως το 25% της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της μέσης τιμής κάθε μήνα. Αυτό περιγράφεται και με τον παρακάτω τύπο:

$$SDTMX_s = 0.25(TE_{mx,k} - \overline{T_{mx,k}}) \quad (3.36)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση του μοντέλου ηλιακής ακτινοβολίας είναι η εξής:

$$SDRA_K = 0.25(RAMX_K - RA_K) \quad (3.37)$$

όπου: SDRΑ είναι η τυπική απόκλιση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε MJ/m², RAMX η μέγιστη ημερήσια ακτινοβολία στα μέσα του μήνα και RA η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα k .

Το μοντέλο συσχετίζει τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία με τη βροχόπτωση για κάθε αντίστοιχη ημέρα. Έτσι λοιπόν, η μέγιστη θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία τείνουν να είναι χαμηλότερες κατά τις υγρές μέρες. Τα μεγέθη αυτά έχουν χαμηλότερη τιμή τις υγρές μέρες, αφού το SWAT κάνει χρήση εξισώσεων που τα ελαττώνουν.

iii. *Ταχύτητα ανέμου*

Η ταχύτητα του ανέμου απαιτείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής από το μοντέλο SWAT αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Penman-Monteith. Η μέση ταχύτητα του ανέμου προσομοιώνεται από το πρόγραμμα με τη χρήση της παρακάτω τροποποιημένης εκθετικής εξίσωσης:

$$\mu_{10m} = \muwnd_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0.3} \quad (3.38)$$

όπου: μ_{10m} η μέση ταχύτητα του ανέμου σε m/s, μwnd_{mon} είναι η μέση μηνιαία τιμή του ανέμου και rnd_1 είναι ένα τυχαίο νούμερο από το 0.0 έως το 1.0.

iv. *Σχετική υγρασία*

Το SWAT υπολογίζει τη μέση ημερήσια σχετική υγρασία χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη μηνιαία. Όπως ακριβώς συμβαίνει με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία η μέση ημερήσια σχετική υγρασία προσαρμόζεται ώστε να λαμβάνει υπόψη τις υγρές και τις ξηρές μέρες. Η αντίστοιχη εξίσωση εδώ είναι :

$$R_{hWmon} = R_{hDmon} + b_H \cdot (1 - R_{hDmon}) \quad (3.39)$$

όπου: $R_{hW_{mon}}$ είναι η μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις υγρές μέρες του μήνα, $R_{hD_{mon}}$ είναι η αντίστοιχη για τις ξηρές μέρες του μήνα και b_H είναι ένας παράγοντας κλίμακας που κυμαίνεται μεταξύ 0.0 και 1.0. Η συνήθης τιμή του στο SWAT είναι το 0.9.

Το SWAT 2009 χρησιμοποιεί την μεταβλητή «θερμοκρασία σημείο δρόσου» (dewpoint) για να περιγράψει την υγρασία και αν εφαρμόσει τις απαιτούμενες προσομοιώσεις. Η σχέση που περιγράφει το σημείο δρόσου σε σχέση με την σχετική υγρασία και τη μέση θερμοκρασία της ίδιας χρονικής περιόδου και κλίμακας (π.χ. ημερήσια, μηνιαία), περιγράφηκε σε επόμενο κεφάλαιο (4.2.2) με την σχέση 4.11.

ν. Θερμοκρασία εδάφους

Η μέση θερμοκρασία του εδάφους προσομοιώνεται στο μέσο του εδαφικού στρώματος. Η βασική εξίσωση της θερμοκρασίας του εδάφους αναπτύχθηκε από τους Carslaw and Jaeger (1959) και είναι η εξής:

$$T_{soil}(z, d_n) = \overline{T_{AA}} + A_{surf} \exp(-z/dd) \sin(\omega_{tmp} d_n - z/dd) \quad (3.40)$$

όπου: $T_{soil}(z, dn)$ είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z σε mm κατά την dn ημέρα του μήνα εκφρασμένο σε °C, $\overline{T_{AA}}$ είναι η μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους πάλι σε °C, A_{surf} είναι το ετήσιο εύρος στη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C, dd είναι το καθαρό ύψος εφαρμογής σε mm και ω_{tmp} είναι η γωνιακή συχνότητα. Αν θέσουμε $z=0$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$T_{soil}(0, d_n) = \overline{T_{AA}} + A_{surf} \sin(\omega_{tmp} d_n) \quad (3.41)$$

Η εξίσωση αυτή τώρα δίνει τιμές που αντιστοιχούν στην θερμοκρασία του αέρα.

Αν πάλι θέσουμε $z \rightarrow \infty$ η εξίσωση γίνεται:

$$T_{soil}(\infty, d_n) = \overline{T_{AA}} \quad (3.42)$$

Η τελευταία εξίσωση δίνει στην επιφάνεια του εδάφους θερμοκρασία ίση με αυτή του αέρα κατά τις υγρές ημέρες. Υψηλότερες θερμοκρασίες προκύπτουν για τις ξηρές ημέρες.

Για τον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας το πρόγραμμα SWAT λαμβάνει υπόψη και άλλους παράγοντες όπως η εδαφική βιομάζα, η φυτοκάλυψη και η χιονόστρωση.

3.3.3 Επιλογή λογισμικού

Η προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου με το SWAT αφενός προϋποθέτει ένα μεγάλο πλήθος μετεωρολογικών και χωρικών δεδομένων, αφετέρου η εκτέλεσή του («τρέξιμο») είναι αρκετά εύκολη, καθώς έχουν ξεπεραστεί πολλά από τα προβλήματα του παρελθόντος σε σχέση με τις παλαιότερες εκδόσεις. Επίσης, αποτελεί ευκολία το γεγονός πως τα διαδοχικά βήματα του μοντέλου εκτελούνται σειριακά, δηλαδή το πρόγραμμα δεν επιτρέπει στον χρήστη να προχωρήσει στο επόμενο βήμα, χωρίς να έχει ολοκληρωθεί το προηγούμενο. Ουσιαστικά, το πρόγραμμα καθοδηγεί τον χρήστη για την ορθή εκτέλεση του.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής, χρησιμοποιήσαμε την πρόσφατη έκδοση του SWAT 2009, η οποία έχει το πλεονέκτημα να τρέξει ως επέκταση του λογισμικού ArcGIS. Το πρόγραμμα SWAT μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα προγράμματα/υπολογιστικά πακέτα, όπως για παράδειγμα το MATLAB, οδηγίες για την εφαρμογή του SWAT σε αυτό παρέχονται αναλυτικά από τμήμα διαχείρισης και ανάπτυξης του μοντέλου. Ωστόσο, καταλήξαμε στην επιλογή της έκδοσης ArcSWAT, ως εργαλείο προστιθέμενο στο ArcGIS. Η

επιλογή αυτή στηρίχθηκε αφενός στο ότι, μέσω του ArcSWAT, ο χρήστης διευκολύνεται έχοντας την άμεση εποπτεία των ενεργειών του με ταυτόχρονη άμεση απεικόνιση των αποτελεσμάτων του σε ένα γνώριμο και εύκολο περιβάλλον, όπως αυτό του ArcGIS, αφετέρου όλα τα προκαταρκτικά στάδια, όπως η δημιουργία Ψ.Μ.Ε, και άλλων γραμμικών (υδατορέμματα, ισοϋψείς), σημειακών (υδρομετεωρολογικοί σταθμοί) και χωρικών (χρήσεις γης, εδάφη) δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μέσω του ArcGIS. Επίσης, η συμβατότητά τους με το μοντέλο SWAT, κάνει το στάδιο της επεξεργασίας πιο γρήγορο, πιο ευέλικτο και φυσικά πιο εύκολο.

3.4 Άλλα Μοντέλα Βροχόπτωσης-Απορροής

3.4.1 Μοντέλο απλού υδατικού ισοζυγίου

Το μοντέλο του Απλού Υδατικού Ισοζυγίου (Thornthwaite, 1948, Thornthwaite & Mather, 1955) αποτέλεσε τη βάση για πολλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια (Τσακίρης, 2006). Η μέγιστη αποθηκευτικότητα του εδάφους, που συμβολίζεται με S_{max} , αποτελεί τη μία και μοναδική παράμετρο του απλού αυτού μοντέλου. Ωστόσο, το μοντέλο του απλού υδατικού ισοζυγίου τροποποιήθηκε και εμπλουτίστηκε στη συνέχεια από πολλούς ερευνητές. Στην Ελλάδα, ο Γιακουμάκης και άλλοι συνεργάτες (1991) συνέβαλαν στην προσθήκη μιας δεύτερης παραμέτρου που αφορούσε τη διήθηση σε βαθείς υδροφορείς (βαθιά διήθηση).

Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε μια απλή υδρολογική λεκάνη στην οποία δεν υφίσταται σημαντική υπόγεια υδροφορία ούτε και ανθρωπογενείς επεμβάσεις (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Το μόνο απόθεμα νερού στη λεκάνη σε κάθε χρονική στιγμή t θεωρείται το απόθεμα εδαφικής υγρασίας S_t . Η σχέση που εκφράζει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης για το χρονικό διάστημα Δt μεταξύ των χρονικών στιγμών t και $t+\Delta t$, θεωρώντας όγκο αναφοράς που περιλαμβάνει όλο τον όγκο του εδάφους της λεκάνης, είναι η εξής:

$$S_{t+\Delta t} - S_t = P_t - E_t - Q_t \quad (3.43)$$

Όπου S_t και $S_{t+\Delta t}$ είναι το απόθεμα εδαφικής υγρασίας στους χρόνους t και $t+\Delta t$ αντίστοιχα, P_t είναι η χωρικά μέση βροχόπτωση σε όρους όγκου νερού στο διάστημα $[t, t+\Delta t]$, E_t η χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή και Q_t η απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

3.4.2 Συνοπτική παρουσίαση υπόλοιπων μοντέλων

Πολλά από τα παραμετρικά μοντέλα και τα μοντέλα φυσικής βάσης, που αναπτύχθηκαν τις δεκαετίες του 1960 και 1970, έχουν σήμερα τροποποιηθεί και εξελιχθεί, ώστε να είναι σε θέση να κάνουν πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο. Μερικά από τα μοντέλα τα όποια έχουν αναπτυχθεί διεθνώς είναι τα ακόλουθα:

1. Προσδιοριστικό μοντέλο MORIN με σχετικά απλή δομή
2. Προσδιοριστικό παραμετρικό μοντέλο MERO που έχει εφαρμοσθεί και στον Ελληνικό χώρο
3. Προσδιοριστικό παραμετρικό μοντέλο STANFORD που έχει εφαρμοσθεί σε πολλές λεκάνες σε όλο τον κόσμο.
4. Προσδιοριστικό μοντέλο φυσικής βάσης SHE που αποτελεί ένα σύγχρονο ερευνητικό εργαλείο.

5. Προσδιοριστικό παραμετρικό μοντέλο ILWAS που περιλαμβάνει εκτός από την προσομοίωση της απορροής και αλγορίθμους που προσομοιώνουν τη ρύπανση του ποταμού.

Ακολουθώς, αναλύονται συνοπτικά τα πέντε αυτά μοντέλα.

Μοντέλο MORIN

Το μοντέλο αυτό είναι αντιπροσωπευτικό παράδειγμα απλού προσδιοριστικού μοντέλου. Τα στάδια των υπολογισμών που εκτελούνται στο μοντέλο αυτό είναι με την ακόλουθη σειρά τα εξής:

1. ποσότητα νερού από την τήξη χιονιού
2. εξατμισοδιαπνοή
3. διήθηση
4. ενδιάμεση απορροή
5. υπόγεια απορροή
6. επιφανειακή απορροή
7. αποθήκευση στο άνω στρώμα
8. αποθήκευση στο κάτω στρώμα
9. ολική ποσότητα νερού διαθέσιμη για την απορροή
10. απορροή

Οι παραπάνω διαδικασίες είναι συνεχείς και ταυτόχρονες. Το μοντέλο MORIN περιλαμβάνει 17 παραμέτρους και η ρύθμιση του μπορεί να γίνει με δοκιμές ή αυτόματα με πρόγραμμα βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης στόχου.

Μοντέλο MERO

Το μοντέλο MERO είναι ένα προσδιοριστικό παραμετρικό μοντέλο το οποίο δέχεται ως δεδομένα εισόδου ημερήσιες τιμές υψών βροχής P (mm) και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής E_p (mm), ενώ παράγει συνθετικές χρονοσειρές ημερήσιων τιμών απορροής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (Giakoumakis et al., 1991).

Οι εξισώσεις του μοντέλου οι οποίες περιγράφουν τις διάφορες συνιστώσες της απορροής, καθώς επίσης και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, είναι εμπειρικές και έχουν προκύψει από στοιχεία μακροχρόνιων παρατηρήσεων σε λεκάνες απορροής της Κύπρου, που μελέτησε ο Φαναρτζής (1972) (Τσακίρης, 1995). Το μοντέλο περιέχει 7 άγνωστες παραμέτρους που προσδιορίζονται μετά από βαθμονόμηση, χρησιμοποιώντας μετρημένα στοιχεία υψών απορροής.

Μοντέλο STANFORD

Το μοντέλο STANFORD Watershed IV (SWV) είναι ένα προσδιοριστικό, αδρομερές, παραμετρικό μοντέλο. Για την προσομοίωση της σχέσης βροχής - απορροής απαιτούνται ως δεδομένα εισόδου η ωριαία βροχόπτωση, η ημερήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή καθώς και η ημερήσια θερμοκρασία και ακτινοβολία για τον υπολογισμό της απορροής που προέρχεται από την διαδικασία της τήξης του χιονιού.

Για την εφαρμογή του μοντέλου η λεκάνη απορροής διαιρείται σε υποπεριοχές οι οποίες είναι ομογενείς σε σχέση με τον τύπο εδάφους, βλάστησης, τοπογραφίας κλπ. Κάθε υποπεριοχή

αναπαρίσταται από ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της υποπεριοχής. Ο αριθμός των υποπεριοχών αυτών είναι συνήθως μικρός και συχνά ίσος με τον αριθμό των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Οι διαδικασίες αυτές του υδρολογικού κύκλου προσομοιώνονται ως ακολούθως:

1. Κατακράτηση στη φυτοκάλυψη. Προσομοιώνεται μέσω της αποθηκευτικής ικανότητας κατακράτησης, η οποία θεωρείται ότι είναι μεταξύ 0 και 5 mm. Η βροχόπτωση κατακρατείται στη φυτοκάλυψη μέχρι πλήρωσεως της αποθηκευτικής ικανότητάς της, η οποία εκκενώνεται από τη δυνητική εξάτμιση. Η εξάτμιση κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχής αυξάνει τις απώλειες κατακράτησης στη φυτοκάλυψη.
2. Αδιαπέρατη περιοχή μιας λεκάνης. Προσομοιώνεται με εκτροπή ενός σταθερού ποσοστού της βροχόπτωσης προς το υδατόρευμα. Το ποσοστό αυτό είναι ίσο με το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής της λεκάνης.
3. Διήθηση. Μεταβάλλεται γραμμικά, σαν συνάρτηση του λόγου της υγρασίας της κατώτερης εδαφικής ζώνης προς την ονομαστική αποθήκευση της ζώνης αυτής.
4. Υπεδάφια ροή. Αυξάνει όσο αυξάνει η εδαφική υγρασία. Η υπεδάφια απορροή αποθηκεύεται και ένα τμήμα της απελευθερώνεται προς το υδατόρευμα σε κάθε χρονικό βήμα.
5. Επιφανειακή απορροή. Αυτή είτε αποθηκεύεται στην άνω εδαφική ζώνη, είτε μετατρέπεται σε ροή στην επιφάνεια του εδάφους υπολογιζόμενη από μια απλή εξίσωση συνέχειας.
6. Υπόγεια απορροή. Η ποσότητα νερού που εισέρχεται στο υπόγειο στρώμα είτε προωθείται προς την βαθιά ή αδρανή υπόγεια αποθήκευση μη συνεισφέροντας στην απορροή του υδατορεύματος, είτε προωθείται προς την υπόγεια αποθήκευση από την οποία στη συνέχεια εισέρχεται στο υδατόρευμα.
7. Διόδευση της απορροής. Αυτή γίνεται μέσω του υδατορεύματος και τον υπολογισμό του υδρογραφήματος εξόδου χρησιμοποιώντας είτε τη κινηματική μέθοδο, είτε τη μέθοδο Muskingum.

Μοντέλο SHE

Το μοντέλο SHE (Système Hydrologique Européen) είναι ένα καταναμημένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης το οποίο προσομοιώνει όλες τις κύριες φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, οι διαδικασίες αυτές του υδρολογικού κύκλου προσομοιώνονται ως εξής:

1. Κατακράτηση στη φυτοκάλυψη. Η συνιστώσα αυτή υπολογίζει την καθαρή βροχόπτωση που φτάνει στο έδαφος μέσω της φυτοκάλυψης, το ποσό του νερού που αποθηκεύεται στη φυτοκάλυψη καθώς και την εξάτμιση.
2. Εξάτμιση. Η προσομοίωση της δυνητικής και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται με τρεις διαφορετικές μεθόδους οι οποίες δίνουν στο μοντέλο αυτό την ελαστικότητα να προσαρμόζεται στα δεδομένα των εκάστοτε τοπικών συνθηκών (π.χ. Penman-Monteith).
3. Επιφανειακή απορροή. Για τον υπολογισμό της υιοθετείται μια δισδιάστατη λύση βασισμένη στις εξισώσεις Saint Venant, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.
4. Ποτάμια ροή. Ο υπολογισμός της ροής του υδατορεύματος βασίζεται επίσης στις εξισώσεις Saint Venant οι οποίες επιλύονται σε μονοδιάστατη μορφή.

5. Ακόρεστη υπεδάφια ροή. Η συνιστώσα αυτή του μοντέλου υπολογίζει την εδαφική υγρασία και την κατανομή της πίεσης στην ακόρεστη ζώνη, η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα.
6. Κορεσμένη υπεδάφια ροή. Αυτή η συνιστώσα υπολογίζει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και τη ροή η οποία θεωρείται μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση στην ακόρεστη ζώνη.
7. Τήξη χιονιού. Ο σκοπός της συνιστώσας αυτής είναι να προσομοιώσει το πάχος στρώματος χιονιού, όπως αυτό επηρεάζεται από τα κατακρημνίσματα και την τήξη και να προσομοιώσει το ρυθμό απόληξης από το έδαφος του νερού που προέρχεται από την τήξη του χιονοστρώματος.

Οι περισσότερες από τις παραμέτρους του μοντέλου βασίζονται και προέρχονται από φυσικές μετρήσεις και παρατηρήσεις. Το γεγονός αυτό μειώνει σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που χρειάζονται ρύθμιση και βελτιστοποίηση.

Μοντέλο ILWAS

Σκοπός του μοντέλου ILWAS (Integrated Lake Watershed Acidification Study) είναι ο προσδιορισμός τόσο των ποσοτικών (παροχές στο υδατόρευμα απορροές από κάθε εδαφικό στρώμα) όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών (PH, συγκεντρώσεις ιόντων, αλκαλικότητα) της απορροής. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η επίδραση ανθρωπογενών αλλαγών (π.χ. ατμοσφαιρική ρύπανση κλπ) και διαχειριστικών αποφάσεων (π.χ. αλλαγές στα ποσοστά φυτοκάλυψης, είδη καλλιεργειών κλπ) τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα της απορροής.

Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά υπο-μοντέλα: ένα υδρολογικό και ένα χημικό. Το υδρολογικό υπό-μοντέλο προσομοιώνει τις υδρολογικές διαδικασίες της κατακράτησης στη φυτοκάλυψη, ενδορροή, εξατμισοδιαπνοή, συγκέντρωση και τήξη χιονιού και επιφανειακή και υπόγεια υδραυλική. Το χημικό υπό-μοντέλο προσομοιώνει τις συγκεντρώσεις 16 ανιόντων και κατιόντων, του PH και της αλκαλικότητας, σε κάθε ένα από τα φυσικά τμήματα μιας λεκάνης απορροής. Προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν η ετερογένεια μιας λεκάνης απορροής, αυτή μπορεί να διαχωριστεί σε τμήματα τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Οι βασικές διαδικασίες που προσομοιώνονται από το μοντέλο, χωρισμένες στα υπό-μοντέλα, είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

1. Υδρολογικό υπό-μοντέλο

- Διαχωρισμός βροχής και χιόνος
- Δυναμική κατακράτηση στη φυτοκάλυψη
- Δυναμική εξατμισοδιαπνοή
- Πραγματική κατακράτηση στη φυτοκάλυψη και πραγματική εξάτμιση
- Υπεδάφια και υπόγεια ροή
- Ροή στην επιφάνεια του εδάφους
- Διόδευση κατά μήκος του υδατορεύματος

2. Χημικό υπό-μοντέλο

- Χημικές συγκεντρώσεις ιόντων ενδορροής: (α) ξηρή εναπόθεση στη φυτοκάλυψη, (β) φυλλική έκχυση και (γ) οξείδωση

- Χημικές διαδικασίες οργανικού στρώματος: (α) φυλλόπτωση, (β) απορρόφηση τροφικών συστατικών και (γ) ριζική αναπνοή
- Χημικές διαδικασίες εδαφικού στρώματος: (α) νιτροποίηση, (β) απορρόφηση ιόντων, (γ) ανταλλαγή κατιόντων και (δ) αποσύνθεση πετρωμάτων

3.4.3 Μελλοντικές ανάγκες χρήσης μοντέλων

Σήμερα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αρκετά μεγάλες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Το αυξημένο ενδιαφέρον για αυτές τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (π.χ. κλιματική αλλαγή) έχει οδηγήσει στην ανάγκη για διαρκή καταγραφή και διαχείριση των κρίσιμων καταστάσεων, όπως είναι οι πλημμύρες ή οι ξηρασίες, καταστάσεις οι οποίες απαιτούν την ανάπτυξη ειδικών μοντέλων πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, κάποια ασυνήθιστα φαινόμενα στο περιβάλλον ως αποτέλεσμα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως η όξινη βροχή, η υποβάθμιση του εδάφους, η διάχυση λιπασμάτων και η ρύπανση γενικώς, μπορούν να μελετηθούν μόνο με δυναμικά μοντέλα φυσικής βάσης, τα οποία αναπαριστούν τις βιολογικές και χημικές εξισώσεις που υπεισέρχονται.

Η χρήση κατανεμημένων μοντέλων φυσικής βάσης είναι πλέον δυνατή και πολύ ευκολότερη. Αυτό συμβαίνει, γιατί αφενός υπάρχει διαθεσιμότητα ψηφιακών χαρτών και δορυφορικών εικόνων που έχουν επιτρέψει τη δημιουργία μεγάλων τραπεζών δεδομένων, οι οποίες περιλαμβάνουν πάρα πολλά φυσικά φαινόμενα και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά, και αφετέρου υπάρχει η τεράστια ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι οποίοι έχουν καταστήσει δυνατή τη λύση διαφορικών εξισώσεων σε κανάβους με πολύ υψηλή διακριτοποίηση.

Η ανάγκη για χρήση περισσότερο ή λιγότερο αδρομερών μοντέλων σε μελέτες υδάτινου ισοζυγίου και διαχείρισης υδατικών πόρων έχουν στρέψει το ερευνητικό ενδιαφέρον σε προβλήματα που συναρτώνται με τα προβλήματα της αδρομεροποίησης, όπως ολοκληρώσεις φαινομένων και παραμέτρων στο χώρο και το χρόνο (Τσακίρης, 1995). Επομένως, μιλάμε για πιο απλά μοντέλα που λειτουργούν σε κλίμακα υπολεκάνης και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαχείριση συστημάτων πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο με πάρα πολύ μικρό κόστος.

3.5 Βαθμονόμηση Μοντέλων - Δείκτες Καταλληλότητας

Η διαδικασία της εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής με βάση μετρήσεις των υδρολογικών μεγεθών εισόδου και εξόδου ονομάζεται βαθμονόμηση (calibration). Ουσιαστικά, υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.

Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων, αν και έχει διερευνηθεί διεξοδικά, παραμένει επίκαιρο, δεδομένου ότι τα μοντέλα τείνουν να γίνουν όλο και πιο σύνθετα (μεγάλος αριθμός παραμέτρων) και όλο και πιο απαιτητικά σε δεδομένα, και σε υπολογιστικό φόρτο. Το πρόβλημα αυτό, αν και παραδοσιακά έχει θεωρηθεί ότι αφορά αποκλειστικά στα εννοιολογικά σχήματα, αποδεικνύεται τελικά κοινό και για τις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις προκύπτει η ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων στις παρατηρήσεις του παρελθόντος.

3.5.1 Είδη βαθμονόμησης

Υπάρχουν τριών ειδών βαθμονομήσεις:

- 1 Εμπειρική βαθμονόμηση: Πρόκειται για όχι αυστηρά συστηματική διαδικασία, που βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγει, σύμφωνα με την εμπειρία του, ο μελετητής. Η τελική επιλογή των παραμέτρων γίνεται ελέγχοντας «με το μάτι» την προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα. Αν και η εμπειρική μέθοδος είναι μη αντικειμενική (η επιλογή δεν βασίζεται σε κάποιο αριθμητικό κριτήριο σφάλματος) και εξαιρετικά επίπονη (όταν ο αριθμός των παραμέτρων είναι σχετικά μεγάλος), εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα δεδομένου ότι η εν λόγω διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.
- 2 Αυτόματη βαθμονόμηση: Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης, το οποίο θεωρείται ως η συνάρτηση στόχου ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ευκολία και η αντικειμενικότητά της, ενώ το κύριο μειονέκτημά της είναι η πλήρης εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, τα σφάλματα που μεταφέρονται από τα δεδομένα, τις τυπικές υπολογιστικές αδυναμίες της διαδικασίας αναζήτησης και άλλες πηγές αβεβαιότητας. Για τους παραπάνω λόγους, σε ορισμένες περιπτώσεις ένα υδρολογικό μοντέλο, παρόλο που δείχνει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις μετρήσεις, στην πραγματικότητα λειτουργεί υπό μορφή «μαύρου κουτιού», με παραμέτρους που δεν έχουν φυσικό νόημα και χωρίς να μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των δυνατών αποκρίσεων της λεκάνης.
- 3 Ημιαυτόματη βαθμονόμηση: Πρόκειται για μια διαδραστική μέθοδο, βάσει της οποίας ο μελετητής παρακολουθεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σε αυτή, μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να κατευθύνει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής και αυτόματης βαθμονόμησης, και θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύνθετων σχημάτων, στα οποία είναι και πιο έντονη η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων.

Ανεξάρτητα από την στρατηγική που ακολουθείται, η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται αξιόπιστη εφόσον:

- 1 το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης, με ικανοποιητική ακρίβεια
- 2 στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Πρόκειται για δύο θεμελιώσεις απαιτήσεις, που εξασφαλίζουν ότι το μοντέλο αναπαριστά με συνέπεια τους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης, και το πεδίο εφαρμογής του δεν περιορίζεται στο διάστημα που υπάρχουν ιστορικές παρατηρήσεις (βάσει των οποίων έχει γίνει η προσαρμογή των παραμέτρων του) αλλά επεκτείνεται για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα, είτε στο παρελθόν είτε στο μέλλον. Είναι προφανές ότι αυτό προϋποθέτει ότι τα ιστορικά δείγματα φορτίσεων και αποκρίσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι αντιπροσωπευτικά της υδρολογικής δίαιτας της λεκάνης.

3.5.2 Δείκτες καταλληλότητας

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Ως μέτρο σφάλματος στην προσαρμογή αυτή χρησιμοποιείται ένας δείκτης καταλληλότητας της καλής προσαρμογής των βαθμονομημένων υδρολογικών μοντέλων. Ένας τέτοιος δείκτης είναι και ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination), που είναι το τυπικό μέτρο καλής προσαρμογής υδρολογικών μοντέλων (Nash and Sutcliffe, 1970), που συχνά καλείται και συντελεστής Nash (Nash coefficient). Ο εν λόγω συντελεστής ορίζεται ως εξής:

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.44)$$

όπου: x_i είναι η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής, \bar{x} η μέση τιμή της, y_i η προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής και n ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου.

Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $R = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Εφόσον $R < 0$ η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την μέση παρατηρημένη τιμή \bar{x} . Αντίστοιχα, καλή έως πολύ καλή θεωρείται μια προσαρμογή όταν ο δείκτης είναι πάνω από 0.7 με 0.8.

Άλλοι δείκτες καταλληλότητας είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα MSE (Mean Square Error), η μέση τιμή των απόλυτων τιμών του σφάλματος MAE (Mean Absolute Error) και το μέγιστο σφάλμα MAXE (Maximum Error).

3.5.3 Επαλήθευση

Ο όρος επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν. Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Η προσέγγιση είναι γνωστή ως διαχωρισμός δεδομένων (data-split), και για να έχει νόημα θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί), ώστε να εξασφαλιστεί ότι στη λεκάνη ισχύουν συνθήκες στασιμότητας (stationarity). Διαφορετικά, οι παράμετροι πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, κάτι που περιορίζει δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του μοντέλου.

Μια επιτυχής βαθμονόμηση δεν συνεπάγεται απαραίτητα επιτυχή επαλήθευση του μοντέλου. Η πολύ καλή προσαρμογή ενός μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα κατά την περίοδο βαθμονόμησης, δεν εγγυάται πάντα την επίδοση του μοντέλου με βάση το ίδιο κριτήριο κατά την περίοδο επαλήθευσης. Με την προϋπόθεση της στασιμότητας, αυτό σημαίνει ότι οι βελτιστοποιημένες παράμετροι του μοντέλου δεν αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος και το μοντέλο λειτουργεί ως «μαύρο κουτί», υλοποιώντας μη γραμμικούς μετασχηματισμούς χωρίς φυσικό νόημα. Το φαινόμενο αναφέρεται και ως υπερπροσαρμογή (over-fitting) του μοντέλου.

4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Προετοιμασία Γεωγραφικών Δεδομένων

4.1.1 Γενικά

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός προγράμματος που θα μας επιτρέψει να δημιουργήσουμε εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια ψηφιακούς χάρτες, τους οποίους στη συνέχεια θα πρέπει να διαχειριστούμε για την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους, βάσει υδρολογικών προτύπων, αλλά και στη δημιουργία ψηφιακών δεδομένων εύκολα διαχειρίσιμων και κυρίως συμβατών με το βασικό μας πρόγραμμα, το SWAT. Για το λόγο αυτό, εργαστήκαμε στο ArcMap, που στηρίζεται στο λογισμικό ArcGIS της εταιρείας ESRI. Εξάλλου, το πρόγραμμα SWAT, όπως προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα το διαχειριστούμε μέσα από το ArcGIS, που μπορεί να προστεθεί στο λογισμικό σαν επέκταση (extension).

Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι πολύ χρήσιμο για την διεξαγωγή υδρολογικών μελετών, καθώς διαθέτει ένα σημαντικό αριθμό εργαλείων που εκτελούν υδρολογικές διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα, στην «εργαλειοθήκη» του ArcMap υπάρχει στην επιλογή εργαλείων χωρικής ανάλυσης (Spatial Analyst Tools), εργαλείο με την ονομασία «Hydrology», που εκτελεί 11 διαφορετικές υδρολογικές διεργασίες, μεταξύ αυτών τον υπολογισμό της λεκάνης απορροής (Basin). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης έγινε η χρήση της έκδοσης του ArcMap 9.3.1 και των εργαλείων που εμπεριέχονται σε αυτό. Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, καθώς και η δημιουργία υδρολογικώς ορθού Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Digital Terrain Model), παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

4.1.2 Ψηφιοποίηση των χαρτών της ΓΥΣ

Το πρώτο και πιο βασικό στάδιο κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής αυτής, είναι η ορθή ψηφιακή απεικόνιση της υψομετρικής πληροφορίας της περιοχής μελέτης, καθώς αυτή είναι που θα αποτελέσει το υπόβαθρο για την δημιουργία του πολύ απαραίτητου ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η υψομετρική αυτή πληροφορία μας παρέχεται μέσω γεωγραφικών χαρτών της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Οι χάρτες που μας δόθηκαν από το Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων, αφορούν χάρτες από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού σε κλίμακα 1:50000 και σε προβολικό σύστημα αναφοράς Hatt. Αφού εντοπίστηκαν τα «φύλλα χαρτών», όπως αποκαλούνται τα φύλλα που είναι χωρισμένη η Ελλάδα, που περιλαμβάνουν την περιοχή μελέτης, μετατράπηκαν σε ψηφιακό αρχείο εικόνας μέσω σαρωτή. Τα φύλλα χάρτη που μας αφορούσαν είναι 4, το Μυρόφυλλον, το Μουζάκι, η Καστάνεα και η Καλαμπάκα. Ωστόσο, οι χάρτες αυτοί δεν μπορούν απλά να εισαχθούν στο πρόγραμμα και να αρχίσει η επεξεργασία τους. Οι συντεταγμένες των χαρτών, όπως προαναφέραμε, είναι στο προβολικό σύστημα HATT, που πλέον δεν χρησιμοποιείται στην Ελλάδα. Για αυτό το λόγο και για να μην αντιμετωπίσουμε δυσκολίες ασυμβατότητας με το πρόγραμμα και χρειάζεται να κάνουμε κάθε φορά μετατροπές, χρήζει απαραίτητη η μετατροπή στο σημερινό διαδεδομένο στην Ελλάδα

γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87. Το σύστημα αναφοράς αυτό δίνει τις συντεταγμένες σε x,y και όχι σε φ,λ που δίνει το HATT. Η μετατροπή γίνεται ως εξής: οι τέσσερις χάρτες «φορτώνονται» (κομμένοι στα περιθώρια τους) και επιλέγουμε σαν σύστημα αναφοράς από τα Γεωδαιτικά Συστήματα του προγράμματος, το Εθνικό μας (Greek Grid), που είναι το ΕΓΣΑ '87. Στη συνέχεια με τη χρήση του εργαλείου «Georeferencing», θα πραγματοποιήσουμε τη γεωαναφορά των χαρτών. Στο σημείο αυτό να επισημάνουμε ότι με τον όρο γεωαναφορά εννοούμε το σύνολο των απαραίτητων στροφών και μεταθέσεων του χάρτη στο επίπεδο, ώστε να προκύψει η ορθή προβολή του κάθε σημείου του χάρτη στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Με το εργαλείο που προείπαμε θα επιτύχουμε την αντιστοίχιση των σημείων πάνω στον κάθε χάρτη με τις πραγματικές τους γεωδαιτικές συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ '87. Τα σημεία γνωστών συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα τέσσερα σταυρονήματα σε κάθε φύλλο χάρτη, δηλαδή τα τέσσερα κέντρα που χωρίζουν τον χάρτη σε εννέα ίσα τμήματα των πέντε γεωγραφικών λεπτών (5'x5'). Έτσι, αφού βρέθηκαν τα σημεία πάνω σε κάθε χάρτη (για διευκόλυνση μας τα σταυρονήματα σχεδιάστηκαν πριν σαρωθούν οι χάρτες), αντιστοιχήθηκαν με τις γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες όλων των σημείων είχαν προηγουμένως υπολογιστεί με τη χρήση του προγράμματος COORD. Το πρόγραμμα αυτό μας βοήθησε στην άμεση μετατροπή των συντεταγμένων από το προβολικό σύστημα HATT στο ΕΓΣΑ '87, και μας γλίτωσε από πολύπλοκους υπολογισμούς. Έτσι λοιπόν, τα τέσσερα αυτά πρώτα σημεία μετέθεσαν και έστρεψαν τους χάρτες. Όμως η γεωαναφορά δεν σταμάτησε εδώ. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν διάφορα σημεία χαρακτηριστικά, όπως οι γραμμές των ισοϋψών, για να καταφέρουμε να ενώσουμε όσο το δυνατόν ορθότερα το ένα φύλλο χάρτη με το άλλο. Κατόπιν, ελέγξαμε από τους πίνακες τα τετραγωνικά σφάλματα μετασχηματισμού (RMS errors) για την κάθε εικόνα και απορρίψαμε αυτά με μεγάλο σφάλμα ή διορθώσαμε κάποια από αυτά για να επιτύχουμε μικρότερο σφάλμα. Το αποδεκτό όριο τετραγωνικό σφάλματος μετασχηματισμού στην γεωαναφορά εικόνων πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από το μισό της πλευράς της διάστασης της εικονοψηφίδας του χάρτη (pixel size) σε μονάδες του χάρτη (πολλαπλασιάζουμε με την κλίμακα του χάρτη) (Sloan, 2007). Από υπολογισμούς βρέθηκε το όριο του σφάλματος RMS ίσο με 6.61 m. Το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα που επιτύχαμε ύστερα από διορθώσεις και για τις τέσσερις εικόνες είναι κάτω από τα 2 m.

Ακολουθώντας, αφού ολοκληρώσαμε το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα εργαστούμε, θα συνεχίσουμε με την διαδικασία της ψηφιοποίησης, μια πολύωρη διαδικασία που απαιτεί προσεκτική παρακολούθηση των γραμμικών στοιχείων των χαρτών. Αφού εντοπίσαμε οπτικά την περιοχή μελέτης, ξεκινήσαμε αρχικά με την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών μέσα και περιμετρικά των λεκανών απορροής. Για την ψηφιοποίηση των ισοϋψών δημιουργήθηκε αρχείο τύπου «shapefile» που θα περιλάμβανε δεδομένα τύπου «polyline» και θα είχαν υψομετρική πληροφορία σε m. Με την χρήση «Editor» έγινε η διανυσματική ψηφιοποίηση των ισοϋψών που επιλέξαμε, χειροκίνητα. Υπάρχει από το λογισμικό και αυτόματη διαδικασία, αλλά δεν προτιμήθηκε. Η ψηφιοποίηση των ισοϋψών των λεκανών έγινε ανά 100 m και αρχικά έγινε ψηφιοποίηση ανά 20 m μόνο στην έξοδο κάθε λεκάνης και περιμετρικά του υδροκρίτη. Ωστόσο, αξίζει να αναφέρουμε ότι μετά την δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, παρατηρήσαμε περιοχές με απουσία υψομετρικής πληροφορίας, που δεν απεικόνιζαν το ανάγλυφο με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, επανεξετάστηκαν οι λεκάνες και όπου κρίθηκε σκόπιμο πραγματοποιήθηκε πύκνωση των ισοϋψών, τοπικά, ανά 20 m.

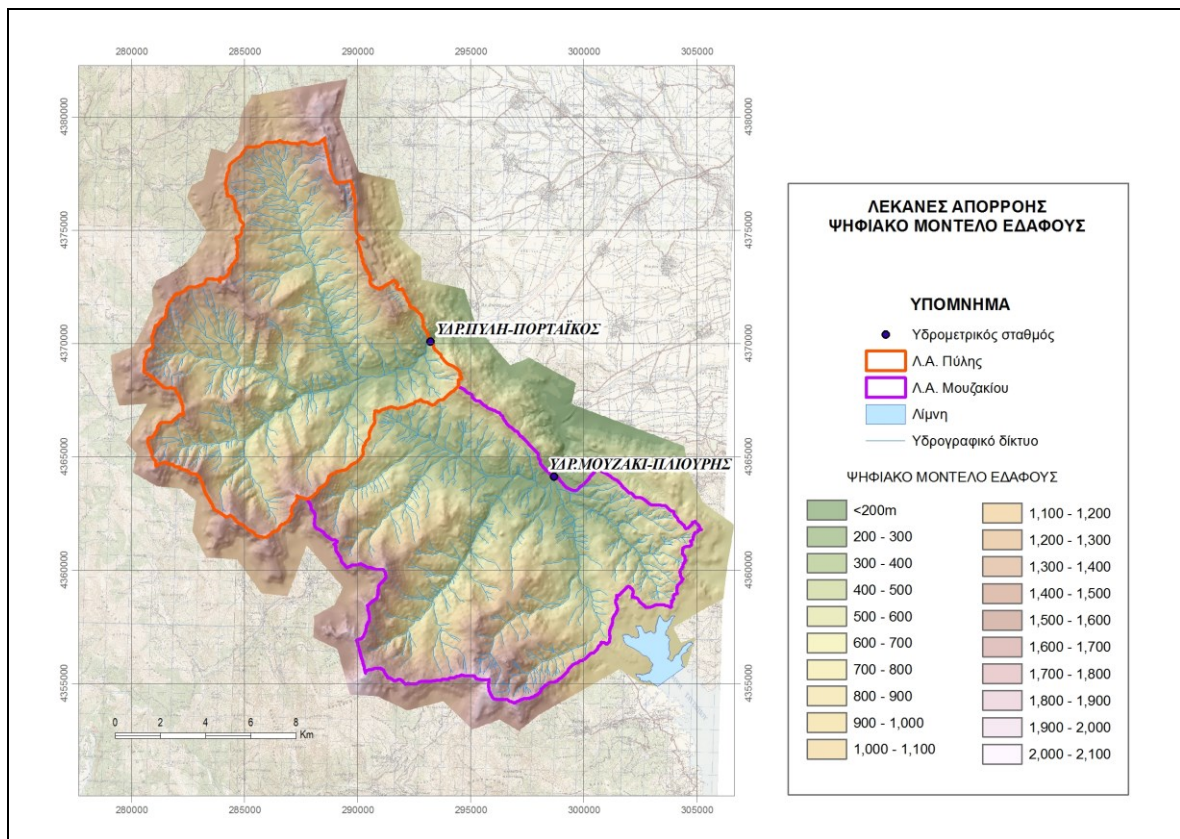
Κατόπιν, ψηφιοποιήθηκαν σημειακά υψομετρικά σημεία (points) που υπήρχαν ήδη στους χάρτες της ΓΥΣ, κυρίως πλησίον του υδροκρίτη, για πύκνωση του υψογραφικού δικτύου. Άλλα, γραμμικά δεδομένα που ψηφιοποιήθηκαν είναι η χάραξη των υδατορεμμάτων και των ποταμών των λεκανών. Όλα τα υδατορέμματα ψηφιοποιήθηκαν προσεχτικά με φορά ανάντη προς κατάντη, δηλαδή από την αρχή τους και με κατεύθυνση προς την έξοδο της λεκάνης.

Αντίθετα, δημιουργείται «θόρυβος» κατά τη δημιουργία του Ψ.Μ.Ε., που περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο και χρειάζεται να διορθωθεί εκ νέου. Τέλος, σχεδιάσαμε ένα διευρυμένο πολύγωνο που περιείχε όλα τα διανυσματικά δεδομένα που ψηφιοποιήσαμε και ξεχώριζε την ευρύτερη περιοχή μελέτη μας από τον υπόλοιπο χάρτη. Η χάραξη του υδροκρίτη για τον υπολογισμό των λεκανών δεν θεωρήθηκε σκόπιμη, αφού υπάρχουν εργαλεία στον ArcMap, που υπολογίζουν από το Ψ.Μ.Ε. και τον υδροκρίτη και τις υπάρχουσες λεκάνες. Εξάλλου, το ArcSWAT, επίσης υπολογίζει τον υδροκρίτη και τις λεκάνες και μάλιστα με μεγαλύτερη ακρίβεια και στο σημείο που επιθυμούμε εμείς σαν σημείο εξόδου της λεκάνης.

4.1.3 Δημιουργία Ψ.Μ.Ε.

Ένα Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους είναι ουσιαστικά μια ψηφιακή αναπαράσταση τμήματος της φυσικής γήινης επιφάνειας. Με άλλα λόγια είναι ένα σύνολο σημείων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς (X,Ψ,Z) το οποίο προσεγγίζει την πραγματική επιφάνεια. Το Ψ.Μ.Ε. ή DTM (digital terrain model) είναι απαραίτητο για να περιγραφεί η συνεχής επιφάνεια με ψηφιακό τρόπο και με πεπερασμένο αριθμό σημείων, αφού η επιφάνεια του εδάφους είναι φαινόμενο συνεχές και όχι διακριτό και επομένως θα χρειαζόταν άπειρα σημεία για την πλήρη περιγραφή της επιφάνειας, και άρα τεράστιος αποθηκευτικός χώρος. Για την δημιουργία ενός υδρολογικά ορθού Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους απαιτείται σαν βάση δεδομένων ισοϋψείς (contours), υψομετρικά σημεία (z points), υδατορέμματα (rivers) και ένα όριο κάλυψης της περιοχής (basin border), λίγο μεγαλύτερο από τα όρια των λεκανών. Το εργαλείο του ArcMap από την εργαλειοθήκη (Arctoolbox), είναι το «3D Analyst Tools → Raster Interpolation → Topo to Raster», που, αφού επιλέξουμε τα δεδομένα εισόδου που προαναφέραμε, δημιουργεί το Ψ.Μ.Ε. με την μέθοδο «Topogrid», δηλαδή την χωρική κατανομή των δεδομένων σε κάνναβο (grid). Το πρωτεύον είδος δεδομένων είναι οι ισοϋψείς, ενώ η ακρίβεια και ανάλυση του Ψ.Μ.Ε. εξαρτάται τόσο από το επιλεγόμενο μέγεθος εικονοψηφίδας (εμείς επιλέξαμε τα $5 \times 5 \text{ m}^2$) όσο και από την πυκνότητα των δεδομένων. Όπου δεν υπάρχει υψομετρική πληροφορία το πρόγραμμα πραγματοποιεί «Παρεμβολή» για τον υπολογισμό των υψομέτρων. Τέλος, εφαρμόσαμε το εργαλείο «Fill» που βρίσκεται στην εργαλειοθήκη (ArcToolbox→Spatial Analyst Tools→Hydrology→Fill), για να πραγματοποιηθεί απαλοιφή των βυθισμάτων.

Παρακάτω, απεικονίζεται το Ψ.Μ.Ε., όπως αυτό δημιουργήθηκε, μαζί με το υδρογραφικό δίκτυο και τις λεκάνη απορροής ανάντη των υδρομετρικών σταθμών.



Σχήμα 4.1: Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης.

4.1.4 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής

Μέγεθος λεκάνης απορροής

Το μέγεθος της λεκάνης απορροής έχει σημασία αφού επηρεάζει γενικά τόσο τη συνολική απορροή (water yield) στην έξοδό της, όσο και το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και κατά συνέπεια και το σχήμα του υδρογραφήματος. Η παραπάνω σχέση δεν είναι βέβαια γραμμική αφού τα γεωλογικά, εδαφικά και άλλα χαρακτηριστικά της λεκάνης κατά κανόνα διαφέρουν. Η σχέση που αναφέρθηκε θα ήταν γραμμική αν τα προηγούμενα χαρακτηριστικά ήταν της ίδιας κατηγορίας και επιπλέον η κατακρήμνιση ήταν ομοιόμορφη σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης (Τσακίρης, 1995).

Για την εκτίμηση του μεγέθους μιας λεκάνης απορροής απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο καθορισμός του υδροκρίτη της λεκάνης, δηλαδή της νοητής εκείνης γραμμής που διαχωρίζει δύο ή και περισσότερες υδρολογικές λεκάνες. Η εκτίμηση του μεγέθους της λεκάνης μπορεί να γίνει στο περιβάλλον του ArcGIS με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος αφορά την χειροκίνητη χάραξη του υδροκρίτη κατά τα γνωστά υδρολογικά πρότυπα, που όμως βασικό μειονέκτημα είναι το σφάλμα του παρατηρητή-χειριστή. Με τον τρόπο αυτό χαράσσεται ένα πολύγωνο και υπολογίζεται στην συνέχεια η επιφάνεια του. Ο δεύτερος και πιο ακριβής τρόπος γίνεται με την χρήση ενός εργαλείου που σχηματίζει αυτόματα τον υδροκρίτη της λεκάνης. Το εργαλείο αυτό βρίσκεται στο «ArcToolbox→Spatial Analyst Tools→Hydrology→Basin» και απαραίτητη είναι η ύπαρξη Ψ.Μ.Ε., αφού αποτελεί βασικό δεδομένο εισόδου. Ένα ίσως μειονέκτημα του είναι ότι δημιουργούνται πάρα πολλές μικρές υπολεκάνες περιμετρικά του κύριου υδροκρίτη, που μπερδεύουν τον αναγνώστη και επίσης

δεν δίνεται η δυνατότητα επιλογής εξόδου της λεκάνης. Σαν αποτέλεσμα, ο υδροκρίτης σχεδιάζεται μέχρι τα όρια του Ψ.Μ.Ε., που θα πρέπει και πάλι χειροκίνητα να σχεδιαστεί ένα τμήμα αυτού στο επιθυμητό σημείο εξόδου. Ο βέλτιστος τρόπος προσφέρεται στο περιβάλλον του ArcSWAT, όπου περιγράφεται σε μεταγενέστερο κεφάλαιο.

Υψόμετρο λεκάνης απορροής

Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής έχει άμεση σχέση τόσο με τα κατακρημνίσματα που δέχεται όσο και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν σε αυτή (Τσακίρης, 1995). Αυτό ερμηνεύεται με την αύξηση των κατακρημνισμάτων όσο κινούμαστε στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης, δηλαδή όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Η αύξηση αυτή φτάνει στο ζενίθ της μέχρι το υψόμετρο των 2500 m, ύστερα παρατηρείται ελάττωση. Από την άλλη μεριά, η θερμοκρασία μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Η σχέση του υψομέτρου με τα κατακρημνίσματα αλλά και με τις θερμοκρασίες, επηρεάζει την απορροή, αφού όσο μεγαλύτερο υψόμετρο, άρα και κατακρημνίσματα, τόσο μεγαλύτερη απορροή. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη η εξάτμιση.

Το πιο σημαντικό από τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά είναι το μέσο υψόμετρο της λεκάνης, αφού βάσει αυτού γίνεται αναγωγή όλο των βροχομετρικών και λοιπών μετεωρολογικών δεδομένων (θερμοκρασία, κ.α.) που αφορούν την λεκάνη απορροής. Το μέσο υψόμετρο μπορεί να υπολογιστεί υπολογίζοντας ξεχωριστά τις επιφάνειες ανάμεσα από δύο διαδοχικές ισοϋψείς καμπύλες και πολλαπλασιάζοντας τα εμβαδά αυτά με το αντίστοιχο μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής. Στη συνέχεια αθροίζουμε τα γινόμενα και διαιρούμε με το άθροισμα των εμβαδών των υποπεριοχών. Ο παρακάτω τύπος εκφράζει αυτή τη σχέση:

$$z_m = \frac{\sum A_i z_i}{\sum A_i} \quad (4.1)$$

όπου:

z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης

z_i : το μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής

A_i : το εμβαδόν της κάθε υποπεριοχής

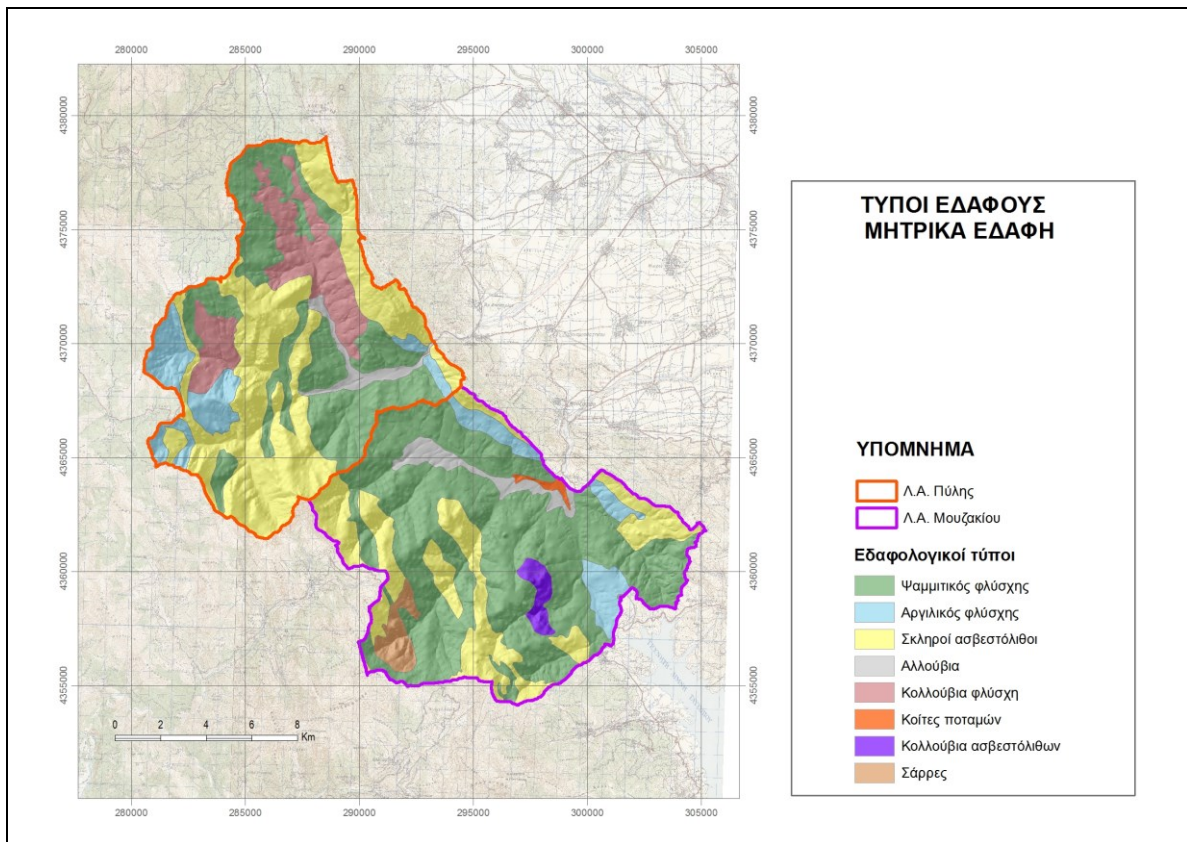
Ο υπολογισμός των υποπεριοχών « A_i » απαιτεί να έχει προϋπάρξει ειδική διαδικασία κατά την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών. Τα σύγχρονα υπολογιστικά πακέτα (ArcGIS) μας γλιτώνουν από αυτή την χρονοβόρα διαδικασία και με την δημιουργία του Ψ.Μ.Ε. μπορούμε άμεσα να μάθουμε το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής και κάθε υπολεκάνης.

Για την λεκάνη της Πύλης το μέσο υψόμετρο είναι 945.89 m, ενώ για την λεκάνη του Μουζακίου το μέσο υψόμετρο ανέρχεται στα 825.28 m. Εξίσου σημαντικά είναι και το μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης απορροής. Στην συγκεκριμένη περιοχή το μέγιστο υψόμετρο για την λεκάνη της Πύλης φτάνει τα 1864.22 m, ενώ το ελάχιστο υψόμετρο είναι λίγο πάνω από τα 246 m (246.34 m). Τέλος, για την λεκάνη του Μουζακίου το μέγιστο υψόμετρο ξεπερνάει τα 1970 m, ενώ το ελάχιστο ανέρχεται μόλις στα 211.56 m.

4.1.5 Εδαφολογικά στοιχεία

Τα εδαφολογικά στοιχεία της περιοχής παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο εκτενώς (2.2.3). Οι χάρτες που περιλάμβαναν τα εδαφολογικά αυτά στοιχεία μας δόθηκαν από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης σε κλίμακα 1:50000 και ακολουθήθηκε κατά τα γνωστά (4.1.2) η εισαγωγή των χαρτών στο περιβάλλον του ArcMap και η ψηφιοποίησή τους. Η ψηφιοποίηση έγινε μόνο για τα μητρικά εδάφη στην περιοχή μελέτης. Στο παρακάτω σχήμα

φαίνονται ψηφιοποιημένα τα διάφορα είδη εδαφών, όπως οι σάρρες, τα κολλούβια ασβεστόλιθων, οι κοίτες ποταμών, τα κολλούβια φλύσχη, τα αλλούβια, οι σκληροί ασβεστόλιθοι, ο αργιλικός φλύσχος και τέλος ο ψαμμιτικός φλύσχος.



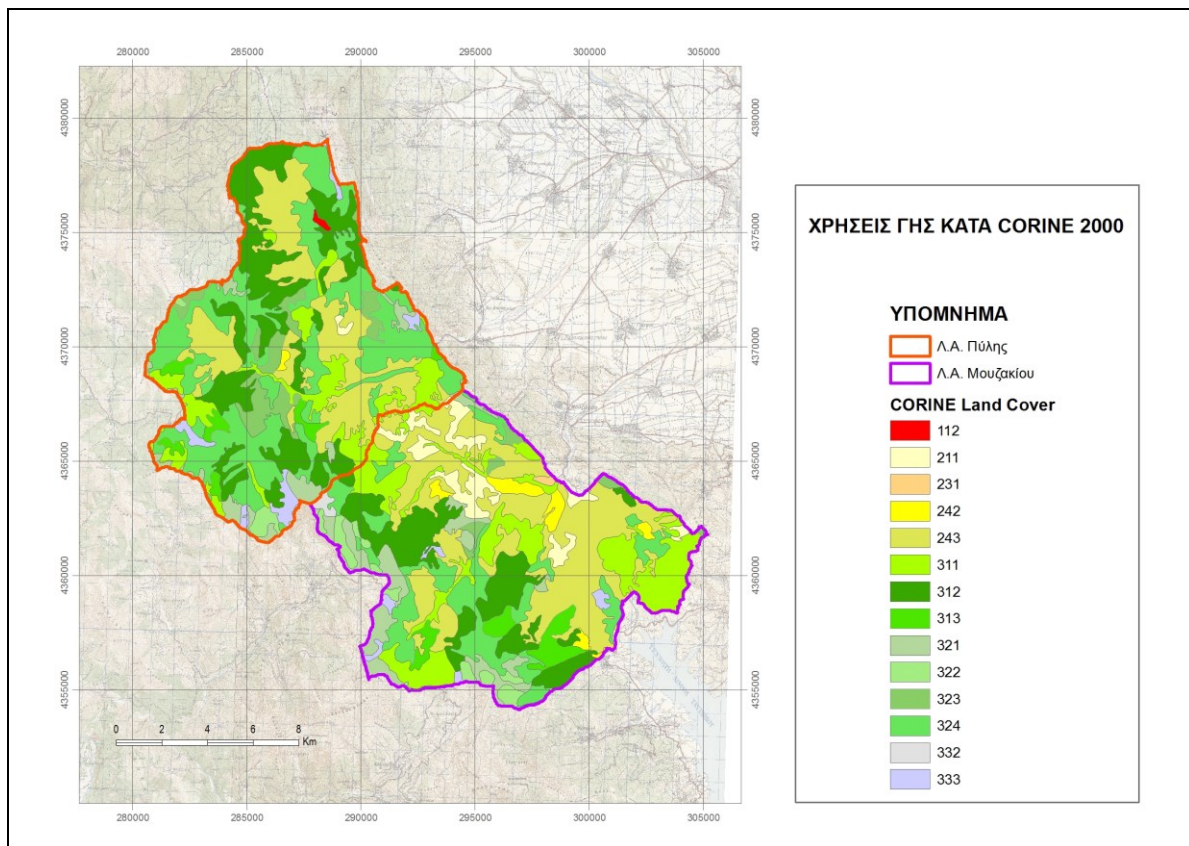
Σχήμα 4.2: Ο χάρτης της περιοχής μελέτης με τα μητρικά εδάφη.

4.1.6 Χρήσεις γης

Τα στοιχεία χρήσεων γης ελήφθησαν από τους ψηφιακούς χάρτες του υποβάθρου CORINE (COoRdinate INformation on the Environment), που αφορά στη χαρτογράφηση της εδαφικής κάλυψης των Ευρωπαϊκών χωρών. Το CORINE κατατάσσει την εδαφική κάλυψη στην Ευρώπη σε 44 κατηγορίες. Ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης του CORINE (CORINE landcover) παρέχεται δωρεάν και η πιο πρόσφατη ψηφιακή διανυσματική γεωβάση είναι αυτή του 2000 (CORINE2000 ή CLC2000) και τα διανυσματικά δεδομένα είναι σε μορφή «shapefile» του ArcGIS της εταιρείας ESRI.

Το αρχείο χρήσεων γης CORINE2000 κατά την φόρτωσή του πρέπει να επιλεγεί σε σύστημα αναφοράς ίδιο με τα υπόλοιπα δεδομένα που έχουμε εργαστεί, δηλαδή σε ΕΓΣΑ '87 (Greek Grid), για να μπορέσει να υπάρξει ομοιομορφία δεδομένων, αλλά και για να μην αντιμετωπίσουμε προβλήματα ασυμβατότητας. Το αρχείο που μας δόθηκε από το Εργαστήριο Γεωπληροφορικής περιλαμβάνει όλη την επικράτεια της Ελλάδας. Επειδή εμείς όμως επιθυμούμε μόνο την περιοχή μελέτης μας, θα πρέπει να γίνει περικοπή (clip) και διατήρηση μόνο της περιοχής που μας ενδιαφέρει. Η διαδικασία περικοπής δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στον περιβάλλον του ArcMap και απαιτείται η χρήση του ArcWorkstation, που διαθέτει πιο εξειδικευμένα εργαλεία για διαχείριση και επεξεργασία τέτοιου είδους αρχείων (coverage). Ο ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης του CORINE για την περιοχή μελέτης

φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στον Πίνακα Α1 του Παραρτήματος Πινάκων Α περιγράφονται αναλυτικά οι κωδικοί των χρήσεων γης.



Σχήμα 4.3: Ο χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης κατά CORINE.

4.2 Προετοιμασία Υδρολογικών Δεδομένων

4.2.1 Βροχομετρικά δεδομένα

Τα βροχομετρικά δεδομένα αποτελούν το πιο σημαντικό «πακέτο» δεδομένων, καθώς εκφράζουν το ύψος των κατακρημνισμάτων της περιοχής μελέτης και από αυτά εξαρτώνται και οι τελικές απορροές. Η απουσία κατακρημνισμάτων μπορεί να αποφέρει χαμηλές απορροές (ξηρασία). Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο έλεγχος ορθότητας των βροχομετρικών δεδομένων (σφάλμα παρατηρητή ή οργάνου), πληρότητας (συμπλήρωση κενών), καθώς και ομογένειας σε σχέση με γειτονικούς σταθμούς. Η μέτρηση των βροχομετρικών υψών γίνεται είτε με την παρατήρηση βροχομέτρων, είτε με βροχογράφους, είτε με άλλα πιο σύγχρονα όργανα μέτρησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων τα παίρνουμε από διάφορους κρατικούς φορείς που έχουν τοποθετήσει τέτοια όργανα, όπως η ΔΕΗ, η Ε.Μ.Υ. και το Υπουργείο Γεωργίας, που επιθυμούν να εξυπηρετήσουν διάφορους τομείς, όπως η μελέτη κατασκευής εγγειοβελτιωτικών έργων, έργων διαχείρισης, ύδρευσης, πρόβλεψης και πρόληψης πλημμυρικών γεγονότων και περιόδων ξηρασίας.

Βροχομετρικοί σταθμοί

Οι βροχομετρικοί σταθμοί μας πληροφορούν για το ύψος των κατακρημνισμάτων στο επιθυμητό χρονικό βήμα (δεκάλεπτο, ωριαίο, ημερήσιο), ανάλογα τον σταθμό. Για την

παρούσα διπλωματική και βάσει των απαιτήσεων του προγράμματος SWAT, χρειαστήκαμε ημερήσια δεδομένα βροχοπτώσεων. Οι βροχομετρικοί σταθμοί που θα χρησιμοποιούσαμε θα έπρεπε να καλύπτουν τις λεκάνες, δηλαδή τα πολύγωνα Thiessen μεταξύ των σταθμών που δημιουργούνται να επιδρούν πάνω στις λεκάνες. Αναζητήσαμε σταθμούς εντός των λεκανών αλλά και περιμετρικά αυτών από μια πληθώρα σταθμών που εντοπίσαμε στο ερευνητικό έργο «Υδροσκόπιο-Προκαταρτική Εφαρμογή στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας» (Μαμάσης & Ξανθοπούλου, 1996). Στο Σχήμα Β.3 του Παραρτήματος Β απεικονίζεται το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας με μερικούς από τους βροχομετρικούς σταθμούς. Τα ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα αντλήθηκαν από το Παράρτημα Α του ερευνητικού αυτού έργου.

Οι σταθμοί που επιλέξαμε αρχικά ήταν τρεις, ο σταθμός Μουζάκι, ο σταθμός Μορφοβούνι και ο σταθμός Στουρναραίικα. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής συσχέτισης μεταξύ τους και κυρίως των μεγάλων κενών, ελλείψεων δηλαδή, βροχοπτώσεων, που δεν μπορούσαν να συμπληρωθούν, έπρεπε να ανατρέξουμε σε άλλους φορείς, όπως η ΔΕΗ. Η ΔΕΗ μας παρείχε ημερήσια δεδομένα για άλλους δύο σταθμούς, τον σταθμό Αργιθέα και τον σταθμό Δρακότρυπα, αλλά και δεδομένα για τον σταθμό Στουρναραίικα. Επιπρόσθετα, από παλαιότερες ερευνητικές εργασίες και μεταπτυχιακές εργασίες, εντοπίσαμε πληροφορίες και για τον σταθμό Ελάτη. Οι σταθμοί αφού εξετάστηκαν ως προς την ομογένεια τους, που περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο, και ελέγχθηκαν για την πληρότητα των δεδομένων τους και κατά πόσο είναι εφικτή η συμπλήρωση των κενών παρατηρήσεων, επιλέχθηκαν οι εξής βροχομετρικοί σταθμοί: Ελάτη, Μουζάκι, Δρακότρυπα και Μορφοβούνι. Οι άλλοι δυο σταθμοί απορρίφθηκαν, διότι είτε είχαν μεγάλα κενά που θα ήταν δύσκολη και ανέφικτη η συμπλήρωσή τους (Στουρναραίικα), είτε είχαν σφάλματα οι μετρήσεις, όπως για παράδειγμα, για τον σταθμό Αργιθέα, μηδενικά ύψη βροχόπτωσης σε βροχερές περιόδους που οι γειτονικοί σταθμοί ξεπερνούν τα 100 mm ισοδύναμου ύψους βροχής.

Έλεγχος ομογένειας σταθμών

Για τον έλεγχο της ποιότητας των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού είναι απαραίτητος ο έλεγχος ομογένειας των παρατηρήσεων. Ελέγχεται δηλαδή κατά πόσο το σύνολο των παρατηρήσεων προέκυψε με τις ίδιες συνθήκες μετρήσεως (Τσακίρης, 1995). Η αλλαγή της θέσης του οργάνου, η αντικατάσταση του οργάνου και η αλλαγή του παρατηρητή οδηγούν συνήθως σε μη ομογενή δεδομένα. Ο έλεγχος της ομογένειας των δεδομένων ενός σταθμού γίνεται με τη σύγκρισή του με ομάδα γειτονικών σταθμών, που αποτελούν τους σταθμούς βάσης και έχουν ελεγχθεί ως προς την ομογένειά τους. Η μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος της διπλής αθροιστικής καμπύλης.

Η μεθοδολογία της διπλής αθροιστικής καμπύλης έγκειται στον έλεγχο των ετήσιων υψών βροχής και αναγκαία προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του σταθμού που εξετάζεται και του σταθμού βάσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εφαρμόσαμε την μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης στο περιβάλλον του λογισμικού «Υδρογνώμων». Η μέθοδος είναι ημιεμπειρική και συνδυάζει την γραφική απεικόνιση βροχομετρικών δεδομένων με στατιστικές υποθέσεις και με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να γίνεται σε σταθμούς με ισχυρή συσχέτιση, ενώ η διόρθωση είναι καλό να τεκμηριώνεται με στοιχεία από το ημερολόγιο του σταθμού. Οι συντελεστές που προκύπτουν από την διόρθωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για αναγωγή όλων των χρονοσειρών μικρότερου χρονικού βήματος, αρχικά από ετήσιο σε μηνιαίο και στην συνέχεια σε ημερήσιο. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται στον άξονα των τετμημένων και ο εξεταζόμενος σταθμός στον άξονα των τεταγμένων.

Ο έλεγχος της συσχέτισης των δεδομένων γίνεται με τον συντελεστή R^2 , ο οποίος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (4.2)$$

όπου:

x_i : το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για τον σταθμό βάσης

y_i : το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για τον εξεταζόμενο σταθμό

\bar{x} , \bar{y} : τα αντίστοιχα μέσα ετήσια βροχομετρικά ύψη

Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή R^2 τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση παρουσιάζουν τα δεδομένα των εξεταζόμενων σταθμών.

Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρούνται στην διπλή αθροιστική καμπύλη θλάσεις οι οποίες σηματοδοτούν την έναρξη της αλλαγής των συνθηκών μέτρησης. Ο εντοπισμός των θλάσεων αυτών γίνεται πιο εμφανής με τον αντίστροφο της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Για την απαλοιφή των θλάσεων γίνεται διόρθωση των παλαιότερων δεδομένων, καθώς οι πιο πρόσφατες μετρήσεις θεωρούνται πιο αξιόπιστες. Η διόρθωση γίνεται με τον πολλαπλασιασμό επί ένα συντελεστή αναγωγής, ο οποίος είναι ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθύγραμμων τμημάτων της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Ο συντελεστής αυτός δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$a = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (4.3)$$

όπου:

a : ο συντελεστής αναγωγής

λ_1 : η κλίση του νεότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης

λ_2 : η κλίση του παλαιότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης

Για την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού βάσης, όταν δεν δίνονται περαιτέρω δεδομένα για το αν ο σταθμός έχει ελεγχθεί για την ομογένεια του, όπως στην περίπτωση μας, υπολογίζεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανά δύο σταθμούς, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (4.4)$$

όπου:

x_i , y_i : το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για τον κάθε ένα από τους εξεταζόμενους σταθμούς

\bar{x} , \bar{y} : τα αντίστοιχα μέσα ετήσια βροχομετρικά ύψη

Οι αντίστοιχοι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης της περιοχής που μελετούμε, που θα μας βοηθήσουν να επιλέξουμε σταθμό βάσης, φαίνονται στον Πίνακα Α2 του Παραρτήματος Πινάκων. Όπως διαπιστώνουμε, τις καλύτερες συσχετίσεις με τους υπόλοιπους σταθμούς συγκεντρώνει ο σταθμός Μουζάκι, που θα επιλέξουμε ως σταθμό βάσης για έλεγχο ομογένειας μέσω των διπλών αθροιστικών καμπυλών. Τα γραφήματα από τα αποτελέσματα των διπλών αθροιστικών καμπυλών (double masses curves) απεικονίζονται στα σχήματα Β.4.α, Β.4.β και Β.4.γ του Παραρτήματος Β. Διαπιστώνουμε ότι οι ευθείες προσαρμόζονται ικανοποιητικά και επομένως δεν απαιτείται διόρθωση αυτών για την ομογενοποίηση τους.

Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Η συμπλήρωση των βροχομετρικών παρατηρήσεων μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση που λείπουν παρατηρήσεις από το σταθμό που ελέγχουμε. Οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να συμπληρωθούν με την βοήθεια γειτονικών σταθμών που διαθέτουν πλήρη δεδομένα και έχουν ελεγχθεί για την ομογένεια των δεδομένων και τον βαθμό συσχέτισης με τον εξεταζόμενο σταθμό. Στην περίπτωση που διαθέτουμε τρεις γειτονικούς σταθμούς βάσης, τότε για την συμπλήρωση μιας τιμής, P_x , του εξεταζόμενου σταθμού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\frac{N_x P_1}{N_1} + \frac{N_x P_2}{N_2} + \frac{N_x P_3}{N_3} \right] \quad (4.5)$$

όπου:

P_1, P_2, P_3 : οι αντίστοιχες τιμές στους σταθμούς βάσης 1, 2 και 3

N_1, N_2, N_3 : οι τιμές της μέσης βροχόπτωσης στους σταθμούς αυτούς

N_x : η μέση βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού

Ένας ακόμη τρόπος για την περίπτωση που χρειαστεί συμπλήρωση των παρατηρήσεων και δεν διαθέτουμε βροχομετρική πληροφορία από τρεις γειτονικούς σταθμούς με καλή συσχέτιση, τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε την μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Αυτή θα γίνει στα μηνιαία δεδομένα, μεταξύ του μηνιαίου ύψους στον εξεταζόμενο σταθμό και του μηνιαίου ύψους σε ένα από τους γειτονικούς σε αυτόν σταθμούς που θα είναι ο σταθμός βάσης. Σαν σταθμό βάσης θα επιλέξουμε αυτόν με τον μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για τον εξεταζόμενο μήνα. Επομένως, θα υπολογιστούν οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης χωριστά για κάθε μήνα (12 συντελεστές, π.χ. μεταξύ υψών Οκτωβρίου του ενός και υψών του Οκτωβρίου του άλλου σταθμού).

Όπου χρειαζόταν συμπλήρωση των τιμών των παρατηρήσεων, εφαρμόσαμε τη μεθοδολογία που άρμοζε σε κάθε περίπτωση, ακολουθώντας την αντίστοιχη διαδικασία. Τις περισσότερες φορές διαπιστώνουμε ότι το σημειακό ύψος βροχής αυξάνεται με την αύξηση του υψόμετρου και η παρατήρηση αυτή μπορεί να μας φανεί πολύ χρήσιμη και βοηθητική κατά τη συμπλήρωση των βροχομετρικών δεδομένων.

Πολύγωνα Thiessen και αναγωγή στο υψόμετρο της λεκάνης απορροής

Τα «Πολύγωνα Thiessen» είναι η μέθοδος που χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε το ποσοστό επηρεασμού του κάθε σταθμού στην λεκάνη απορροής και άρα να υπολογίσουμε το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τον παράγοντα βάρους που αντιστοιχεί στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού του κάθε σταθμού, όπως αυτά προκύπτουν με την χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν, μπορούμε να εντοπίσουμε το ποσοστά επηρεασμού του κάθε σταθμού

διαιρώντας κάθε φορά το εμβαδόν επηρεασμού (πολύγωνο) του αντίστοιχου σταθμού διά της συνολικής επιφάνειας της λεκάνης απορροής.

Με τα ποσοστά αυτά μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το μέσο βροχομετρικό ύψος ανηγμένο στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής (επιφανειακό ύψος βροχής). Αρκεί να προσθέσουμε τα γινόμενα των ποσοστών επηρεασμού κατά Thiessen με το αντίστοιχο βροχομετρικό ύψος του εκάστοτε σταθμού.

Η διαπίστωση ότι το σημειακό ύψος βροχής αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου, μπορεί να γενικευτεί σε οποιαδήποτε αναγωγή βροχομετρικών παρατηρήσεων σε διαφορετικό υψόμετρο από αυτό που αρχικά ανήκουν. Το παραπάνω γεγονός επιβεβαιώνεται και από τον ορισμό της βροχοβαθμίδας που είναι η μέση αύξηση του ετήσιου σημειακού βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου (Τσακίρης, 1995). Η βροχοβαθμίδα προκύπτει για κάθε περιοχή από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών των σταθμών μιας περιοχής σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των αντίστοιχων σταθμών. Συνεπώς, η βροχοβαθμίδα είναι απαραίτητο εργαλείο για την αναγωγή των βροχομετρικών χρονοσειρών στο υψόμετρο της λεκάνης απορροής.

Η υψομετρική αναγωγή των βροχομετρικών παρατηρήσεων γίνεται με τον πολλαπλασιασμό στα βροχομετρικά δεδομένα ενός διορθωτικού συντελεστή λ . Η διόρθωση αυτή εξαρτάται από τη βροχοβαθμίδα, το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής και το σταθμισμένο μέσο υψόμετρο, που υπολογίζεται από τα ποσοστά Thiessen και τα αντίστοιχα υψόμετρα των βροχομετρικών σταθμών. Η εξίσωση που δίνει τον διορθωτικό συντελεστή λ είναι η παρακάτω:

$$\lambda = 1 + \frac{\beta}{P_0 \cdot 100} (z_m - \bar{z}) \quad (4.6)$$

όπου:

λ : ο συντελεστής διόρθωσης

β : η βροχοβαθμίδα

P_0 : η τιμή του ύψους βροχής στη υψομετρική αναγωγή

z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής

\bar{z} : ο σταθμικός μέσος των υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν τη λεκάνη απορροής

Η εφαρμογή των πολυγώνων Thiessen στις λεκάνες Πύλης και Μουζακίου μας έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

Για την λεκάνη της Πύλης οι βροχομετρικοί σταθμοί που επιδρούσαν πάνω στην λεκάνη ήταν οι σταθμοί Ελάτη και Δρακότρυπα. Τα αντίστοιχα ποσοστά επηρεασμού είναι 0.5499 ή 54.99% και 0.4501 ή 45.01%. Το άθροισμα τους προφανώς δίνει 100%.

Για την λεκάνη του Μουζακίου οι βροχομετρικοί σταθμοί που επηρεάζουν την λεκάνη είναι οι σταθμοί Δρακότρυπα με ποσοστό επηρεασμού 54.6%, Μουζάκι με ποσοστό 31.63% και Μορφοβούνι με ποσοστό 13.76%.

Με τα αθροίσματα των γινομένων των ποσοστών αυτών με τα αντίστοιχα ημερήσια ύψη βροχής κάθε σταθμού σχηματίσαμε τις επιφανειακές χρονοσειρές βροχόπτωσης κάθε λεκάνης σε ημερήσιο χρονικό βήμα.

Επόμενο στάδιο ήταν ο υπολογισμός της βροχοβαθμίδας. Αρχικά, η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης που χαράσσεται για τον προσδιορισμό της βροχοβαθμίδας προέκυψε με χαμηλό βαθμό γραμμικής συσχέτισης. Στην περίπτωση αυτή έπρεπε να εξαιρέσουμε μερικούς σταθμούς και να αναζητήσουμε άλλους γειτονικούς, που μπορεί να μην τους χρησιμοποιήσαμε λόγω έλλειψης δεδομένων, ωστόσο γνωρίζαμε το μέσο ετήσιο ύψος βροχής από παλαιότερες μελέτες στην περιοχή, όπως οι σταθμοί Αργιθέα και Στουρναραίικα. Τελικά, η βροχοβαθμίδα υπολογίστηκε ίση με 0.8359 mm/m.

Το σταθμικό μέσο υψόμετρο, που όπως προαναφέραμε υπολογίζεται από το άθροισμα των ποσοστών Thiessen του κάθε σταθμού στη λεκάνη πολλαπλασιασμένο με το υψόμετρο του σταθμού, είναι για την λεκάνη της Πύλης ίσο με 800.985 m, ενώ για την λεκάνη του Μουζακίου ίσο με μόλις 550.149 m.

Ο διορθωτικός συντελεστής λ υπολογίστηκε ίσος με 1.21125 για την λεκάνη της Πύλης και 2.29979 για την λεκάνη του Μουζακίου και να τονίσουμε ότι ο συντελεστής λ δεν ορίζεται για μηδενικές παρατηρήσεις. Κατά τον σχηματισμό της τελικής χρονοσειράς βροχόπτωσης ανηγμένης στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης έπρεπε να σχηματίσουμε μία λογική εξίσωση (if) που θα μας απέρριπτε την εφαρμογή του διορθωτικού συντελεστή λ σε μηδενικές παρατηρήσεις και θα άφηνε την τιμή μηδέν. Τελικά, σχηματίσαμε τα ανηγμένα ύψη βροχόπτωσης για κάθε μία από τις δύο λεκάνες απορροής.

Άρα, στην ουσία τα τελικά ύψη βροχόπτωσης της κάθε λεκάνης είναι τα ύψη βροχόπτωσης ενός θεωρητικού σταθμού που έχει συντεταγμένες που ορίζονται από τα ποσοστά Thiessen των σταθμών της κάθε λεκάνης και τις αντίστοιχες συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών, και υψόμετρο το μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Ο σταθμός αυτός καλείται μέσος σταθμός και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει. Με απλά λόγια θα μπορούσαμε να πούμε ότι γίνεται μια αναγωγή της επιφάνειας της λεκάνης σε ένα σημείο, όπου και μελετούμε. Οι συντεταγμένες του μέσου σταθμού για την λεκάνη της Πύλης (Μέσος Σταθμός Πύλης) είναι $X=290405.158$ m και $Y=4371760.887$ m και μέσο υψόμετρο $Z_m=945.889$ m. Οι αντίστοιχες συντεταγμένες για τον Μέσο Σταθμό Μουζακίου είναι $X=296976.292$ m και $Y=4365045.291$ m, ενώ το μέσο υψόμετρο είναι $Z_m=825.276$ m.

4.2.2 Υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα

Άλλα μετεωρολογικά δεδομένα που αφορούν τις λεκάνες απορροής που μελετούμε και είναι απαραίτητα για την εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου απορροής SWAT, είναι η θερμοκρασία αέρος, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία της ατμόσφαιρας και η ταχύτητα του ανέμου. Στα παρακάτω εδάφια αναλύονται το κάθε ένα ξεχωριστά

Θερμοκρασία αέρος

Όταν αναφέρουμε θερμοκρασία αέρος εννοούμε την θερμοκρασία του αέρα υπό σκιά. Η μέτρηση της πραγματοποιείται με τα θερμόμετρα και τους θερμογράφους που τοποθετούνται στους μετεωρολογικούς κλωβούς όπου ο αέρας κυκλοφορεί ελεύθερα και τα όργανα προστατεύονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Από τα όργανα αυτά μπορούν να υπολογιστούν οι παρακάτω παράμετροι:

- 1 Η απόλυτη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας (T_{max} και T_{min} αντίστοιχα) που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ορισμένης χρονικής περιόδου
- 2 Η μέση ημερήσια θερμοκρασία (\bar{T}_d)
- 3 Η μέση μηνιαία θερμοκρασία (\bar{T}_{mo}), που υπολογίζεται από την μέση ημερήσια θερμοκρασία των ημερών του συγκεκριμένου μήνα

- 4 Η μέση ετήσια θερμοκρασία (\bar{T}_E), που υπολογίζεται από την μέση μηνιαία των δώδεκα μηνών
- 5 Το ημερήσιο θερμομετρικό εύρος (ΗΘΕ), δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία του 24ώρου.
- 6 Το ετήσιο θερμικό εύρος (ΕΘΕ), δηλαδή η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας του ψυχρότερου μήνα από τη μέση του θερμότερου μήνα του έτους.

Η θερμοκρασία του αέρα μεταβάλλεται με την αύξηση του ύψους της ατμόσφαιρας. Ωστόσο, στην Υδρολογία μας ενδιαφέρει περισσότερο η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα εντός της τροπόσφαιρας, του χαμηλότερου στρώματος της ατμόσφαιρας, και στην περίπτωση αυτή αύξηση του υψομέτρου σημαίνει μείωση της θερμοκρασίας. Οι κυριότεροι λόγοι της μείωσης αυτής είναι η αραίωση του αέρα και των υδρατμών όσο το ύψος αυξάνεται, καθώς και η μείωση της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας.

Η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε σχέση με τη μονάδα του ύψους, λέγεται θερμοκρασιακή βαθμίδα ή κατακόρυφη θερμοβαθμίδα (Wilson, 1974) και δίνεται από την σχέση:

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z} \quad (4.7)$$

Όπου: T_a η θερμοκρασία και Z το υψόμετρο.

Το αρνητικό πρόσημο τοποθετείται για να δηλώσει ότι η αύξηση του ύψους αντιστοιχεί σε ελάττωση της θερμοκρασίας. Ως μονάδα του ύψους λαμβάνονται τα 100 m ή το 1 km. Επομένως, η θερμοβαθμίδα εκφράζεται σε $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ή σε $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ και η μέση τιμή της είναι 0.6°C . Η τιμή αυτή μεταβάλλεται κυρίως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που μπορεί να γίνει πολύ θερμή την ημέρα και να ψυχθεί τη νύχτα με αποτέλεσμα και η θερμοβαθμίδα να λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή την ημέρα κ μικρότερη τη νύχτα.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήσαμε ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας από οκτώ γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς (Αργιθέα, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Φράγμα Ταυρωπού, Λεοντίτο, Βακάριο, Παχτούρι, Πολυνέρι) και αντιστοιχίζοντας τα υψόμετρα των σταθμών με την μέση ετήσια θερμοκρασία κάθε σταθμού, υπολογίσαμε γραφικά την θερμοβαθμίδα, που βρέθηκε ίση με $\theta = -0.4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

Για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής και βάσει των απαιτήσεων του ArcSWAT, αλλά και για τον ευκολότερο υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, που θα αναλυθεί παρακάτω, χρειαστήκαμε δεδομένα θερμοκρασίας αέρος μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας τιμής. Τις ημερήσιες αυτές παρατηρήσεις δεν μπορούμε να της χρησιμοποιήσουμε πριν πρώτα τις επεξεργαστούμε. Η επεξεργασία αυτή αφορά την αναγωγή των θερμοκρασιακών δεδομένων στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής. Η θερμοκρασιακή αναγωγή που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης με το μέσο υψόμετρο των δεδομένων, πολλαπλασιασμένο με την θερμοβαθμίδα. Ο συντελεστής αναγωγής των μέγιστων και ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας για τη λεκάνη της Πύλης υπολογίστηκε ίσος με -1.624°C και για τη λεκάνη του Μουζακίου -1.141°C . Ο συντελεστής αυτός προστέθηκε στις τιμές.

Ηλιακή ακτινοβολία

Η κύρια πηγή ενέργειας για την επιφάνεια της γης είναι εκείνη που προέρχεται από τον ήλιο και γι' αυτό καλείται ηλιακή ενέργεια ή ηλιακή ακτινοβολία (Τσακίρης, 1995). Αυτή δραστηριοποιεί μερικές από τις φάσεις του υδρολογικού κύκλου και η ποσότητα αυτής που φτάνει στις επιφάνεια της γης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ αυτών η μέση

απόσταση της γης από τον ήλιο, που επηρεάζει την συνολική ηλιακή εκπομπή, η μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο, λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης (περιήλιο και αφήλιο), το ύψος του ηλίου στον ορίζοντα, που μεταβάλλεται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την εποχή του έτους και την ώρα της ημέρας, καθώς επίσης και από τη διάρκεια της ημέρας, που και πάλι εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής μελετούμε την σχέση της ηλιακής ακτινοβολίας με τον υδρολογικό κύκλο. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε μια περιοχή επιδρά σημαντικά στον υδρολογικό κύκλο του τόπου και μάλιστα τον επηρεάζει, αφού από την ηλιακή ακτινοβολία σχετίζεται άμεσα με την εξάτμιση του υδατικού δυναμικού.

Η ηλιακή ακτινοβολία μετράται με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι η μέτρηση της πραγματικής ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, ενός μήνα ή ενός έτους. Ωστόσο, εμείς χρησιμοποιήσαμε δεδομένα που εκφράζουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε μονάδες κιλοβατώρες (kWh) ή Megajoules (MJ) ανά επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου ανά ημέρα, δηλαδή kWh/m²/day MJ/m²/day. Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν η τυπική τιμή της λευκάγειας για την Ελλάδα ($\alpha=0.25$) και το μέσο γεωγραφικό πλάτος των λεκανών, κοντά στις 39°5'. Τα αποτελέσματα αντλήθηκαν από το διαδίκτυο μέσω ηλεκτρονικής φόρμας, που έχει δημιουργήσει ο συγγραφέας και τεχνολόγος Michael Boxwell, με το «Εγχειρίδιο της Ηλιακής Ενέργειας». Οι τιμές δίνονται σε μονάδες kWh/m²/day και επειδή το λογισμικό SWAT απαιτεί τις τιμές σε SI, χρειάστηκε να κάνουμε τη μετατροπή, όπου ισχύει 1kWh=3.6MJ.

Υγρασία ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα περιέχει πάντοτε μια μεταβαλλόμενη ποσότητα υγρασίας (υδρατμών) που προέρχεται από την εξάτμιση του νερού των ωκεανών, των υγρών επιφανειών της ξηράς και τη διαπνοή των φυτών. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται άμεσα με τη θερμοκρασία και μειώνεται με το υψόμετρο, ακολουθώντας το ρυθμό ελάττωσης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (Τσακίρης, 1995). Όμως η υγρασία της ατμόσφαιρας δε μεταβάλλεται μόνο με το υψόμετρο αλλά και με τη μεταβολή του γεωγραφικού πλάτους ενός τόπου και είναι μεγαλύτερη στις περιοχές κοντά στον Ισημερινό και μικρότερη σε εκείνες κοντά στους Πόλους.

Για να αντιληφθούμε καλύτερα τις μεταβολές της υγρασίας στην ατμόσφαιρα, παραθέτουμε παρακάτω κάποιες υδρομετρικές παραμέτρους:

- 1 Τάση των υδρατμών (e). Αποτελεί μέρος της συνολικής ατμοσφαιρικής πίεσης και είναι η πίεση που ασκείται από τους υδρατμούς στην επιφάνεια της γης.
- 2 Κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας. Ο αέρας είναι κορεσμένος όταν περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει σε μια ορισμένη θερμοκρασία και πριν αρχίσει η συμπύκνωση. Η πίεση που ασκούν οι υδρατμοί στις συνθήκες αυτές ονομάζεται μέγιστη τάση υδρατμών (e_s).
- 3 Θερμοκρασία σημείου δρόσου (T_d). Είναι η θερμοκρασία στην οποία μία ακόρεστη αέρια μάζα, όταν ψυχθεί κάτω από σταθερή πίεση, μετατρέπεται σε κορεσμένη.
- 4 Έλλειμμα κορεσμού ($e_a - e$). Είναι η διαφορά των τάσεων υδρατμών κορεσμένου και ακόρεστου αέρα σε θερμοκρασία T_a . Η παράμετρος αυτή δείχνει την επιπλέον ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία, μέχρι να γίνει κορεσμένος.
- 5 Απόλυτη υγρασία (A_h). Είναι η ποσότητα υδρατμών του αέρα σε γραμμάρια που περιέχεται στη μονάδα όγκου ($1m^3$) και εκφράζεται με τη σχέση:

$$A_h = \frac{M}{V} \quad (\text{gr}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (4.8)$$

6 Σχετική υγρασία (R_h). Είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών M_u που περιέχονται σε ορισμένο όγκο ακόρεστου αέρα, προς τη μάζα των υδρατμών M_{su} που θα περιείχε ο ίδιος όγκος αν ήταν κορεσμένος κάτω από τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Δηλαδή:

$$R_h = \frac{M_U}{M_{SU}} \quad (4.9)$$

Ο λόγος αυτός ισούται επίσης με την εκατοστιαία αναλογία της πραγματικής προς τη μέγιστη τάση υδρατμών στην ίδια θερμοκρασία. Δηλαδή:

$$R_h = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (4.10)$$

Υπάρχουν και άλλες υδρομετρικές παράμετροι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιες άλλες υδρολογικές μελέτες, όπως η αναλογία μείγματος, η ειδική υγρασία και η κατακρημνίσιμη ποσότητα νερού, ωστόσο αναφέραμε τις πιο σημαντικές και συνηθέστερες.

Η σχετική υγρασία είναι ο συνηθέστερος τρόπος έκφρασης και καταμέτρησης της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής αντλήσαμε από ιστορικά δεδομένα τις μέσες ετήσιες τιμές της σχετικής υγρασίας, που εκφράζονται ποσοστιαία (%). Όμως, το λογισμικό ArcSWAT διαχειρίζεται την υγρασία της ατμόσφαιρας με την υδρομετρική μεταβλητή της θερμοκρασίας σημείο δρόσου (dewpoint). Για τον υπολογισμό της παραπάνω μεταβλητής δίνεται η παρακάτω σχέση συναρτήσεως της σχετικής υγρασίας και της μέσης θερμοκρασίας:

$$T_D = \left(\frac{f}{100} \right)^{\frac{1}{8}} (112 + 0.9T) + 0.1T - 112 \quad (4.11)$$

όπου:

T_D : η θερμοκρασία σημείο δρόσου ($^{\circ}\text{C}$)

f : η σχετική υγρασία (%)

T : η μέση μηνιαία θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)

Ταχύτητα Ανέμου

Άνεμος καλείται κάθε κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την οριζόντια διεύθυνση (Τσακίρης, 1995). Όμως, εκτός από τις οριζόντιες, υπάρχουν και κινήσεις του αέρα προς τα πάνω και προς τα κάτω που ονομάζονται ανοδικοί και καθοδικοί άνεμοι. Η κίνηση των ανέμων οφείλεται στη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της από τη Δύση προς την Ανατολή, στη δύναμη τριβής με την επιφάνεια του εδάφους, στη διαφορά πιέσεων μεταξύ δύο περιοχών κλπ.

Ο άνεμος προσδιορίζεται από τη διεύθυνση ή κατεύθυνση και την ένταση ή ταχύτητα. Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος και προσδιορίζεται με ανεμοδείκτες και ανεμογράφους. Η ταχύτητα εκφράζεται σε m/s ή km/h ή κόμβους ανά ώρα και μετράται με τους ανεμογράφους. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιείται επίσης και η κλίμακα Beaufort, η οποία βασίζεται στις

επιδράσεις του ανέμου επάνω σε ορισμένα αντικείμενα, όπως φύλλα, στέγες σπιτιών κ.α. Από κλιματολογικής άποψης οι άνεμοι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: σε εποχιακούς, ημερήσιους και τοπικούς.

4.2.3 Εξάτμιση και Διαπνοή

Γενικά, η εξάτμιση είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου ένα υλικό μεταπίπτει από την υγρή κατάσταση ή την στερεά σε αέρια. Η εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα γίνεται από τις υδάτινες μάζες, όπως είναι η θάλασσα, οι λίμνες και τα ποτάμια, από τα έλη και από τις υδάτινες καλλιέργειες. Ακόμη, ένα σημαντικό ποσοστό του εξατμιζόμενου νερού είναι νερό που έχει περάσει στο φυτό και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα κυρίως μέσω των στομάτων των φυλλωμάτων του φυτού. Η εξάτμιση του νερού που έχει περάσει στο φυτό καλείται διαπνοή. Ο όρος εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιείται για να εκφράσει τις δύο παραπάνω διεργασίες μεταφοράς ύδατος στην ατμόσφαιρα με μια λέξη, καθώς είναι δύσκολο να διαχωρίσουμε τους υδρατμούς από την κάθε διεργασία, αφού πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στη φύση.

Πρακτική σημασία της εξάτμισης και διαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης είναι από τις σημαντικές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Ο υδρολογικός κύκλος ξεκινά με την διαρκή προσφορά του νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης υπό την μορφή υδρομετεώρων που καταλήγουν στους ποταμούς, στις λίμνες και στις θάλασσες, είτε μέσα από τη διήθηση των υπόγειων νερών είτε άμεσα σαν επιφανειακή απορροή (Τσακίρης, 1995). Ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά του νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.

Το νερό όταν έχει φτάσει στη φάση της εξάτμισης είναι μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι βρίσκονται σε οριακό σημείο σε πολλά μέρη του κόσμου και το γεγονός αυτό κάνει επιβεβλημένη τη γνώση της εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή μαζί με τη βροχόπτωση καθορίζουν τη ποσότητα της επιφανειακής απορροής των υδρολογικών λεκανών. Επιπρόσθετα, η εξατμισοδιαπνοή και η βροχόπτωση μπορούν να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά των λεκανών που μπορούν να προκαλέσουν ραγδαία επιφανειακή απορροή ή πλημμύρες σε περίπτωση μεγάλης βροχόπτωσης. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή πολλές φορές θεωρείται ως η απαιτούμενη παροχή νερού στο σχεδιασμό των προτεινόμενων αρδευτικών συστημάτων. Η ποσότητα και ο ρυθμός εξάτμισης από υδατικές επιφάνειες είναι απαραίτητη πληροφορία για το σχεδιασμό φραγμάτων ή την εκτίμηση των φυσικών λιμνών που απαιτούνται για την οικιακή και τη βιομηχανική παροχή νερού, την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων κλπ.

Όλα όσα αναφέρθηκαν μπορούν να εκφραστούν με μια εξίσωση. Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου και εκφράζει τη διατήρηση της μάζας σε μία εδαφική κατατομή. Η εξίσωση αυτή είναι η παρακάτω:

$$P + I + \Delta SW \pm RO - D - ET = 0 \quad (4.12)$$

όπου:

P : η βροχόπτωση

I : η άρδευση

RO : η επιφανειακή απορροή

D : η βαθιά διήθηση

ΔSW: η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατατομής

ET: η εξατμισοδιαπνοή

Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής

Οι καθημερινές αυξανόμενες ανάγκες για νερό χρήζουν επιτακτική την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής και μάλιστα με μεγάλη ακρίβεια. Ο όγκος που χάνεται από την εξατμισοδιαπνοή και επηρεάζει τελικά την απορροή μια λεκάνης, μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορους μεθόδους που προσομοιώνουν τις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής. Κάποιες μέθοδοι είναι ακριβείς και αξιόπιστες, ενώ κάποιες άλλες παρέχουν απλές προσεγγίσεις. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από το είδος της λεκάνης που μελετάται, από την ακρίβεια που απαιτεί η συγκεκριμένη μελέτη και από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα. Άλλοι παράγοντες επίσης σημαντικοί είναι το κόστος, η ευκολία και η τεχνική δυνατότητα της κάθε μεθόδου.

Μία από τις πιο γνωστές μεθόδους είναι η μέθοδος Penman, που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των μεθόδων του ενεργειακού ισοζυγίου και της μεθόδου «συντελεστή μαζικής μεταφοράς» για την θερμότητα και τους υδρατμούς και προσδιορίζει την εξάτμιση πάνω από ελεύθερο νερό και κεκορεσμένες επιφάνειες γης. Η εξίσωση Penman έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα, ειδικά σε υδρολογικές και γεωργικές εφαρμογές.

Άλλες αξιοσημείωτες μέθοδοι είναι η μέθοδος Thornthwaite, που κάνει εκτίμηση των μηνιαίων τιμών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε mm, αλλά και η μέθοδος Hargreaves που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Hargreaves

Είναι μια σχετικά πρόσφατη εμπειρική μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς, και είναι πολύ απλή, γιατί απαιτεί μόνο θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου. Η μέθοδος Hargreaves βασίζεται στην απλή εξίσωση:

$$E_{rc} = 0.0023 \left(\frac{S_o}{\lambda} \right) (T_a + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (4.13)$$

Όπου, E_{rc} η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d, S_o η εξωγήινη ακτινοβολία σε $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{d})$, λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε kJ/kg , T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}\text{C}$, και $T_{\max}-T_{\min}$ η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας πάλι σε $^{\circ}\text{C}$.

Η μέθοδος αυτή φαίνεται ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με σφάλμα της τάξης του 10-15% ή του 1 mm/d (το μεγαλύτερο από τα δύο) και συστήνεται ως μια ανεκτή προσέγγιση για την περίπτωση που τα μόνα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα είναι τα θερμοκρασιακά (Shuttleworth, 1993). Επίσης, η διαφορά εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής της μεθόδου Penman με την μέθοδο Hargreaves, έχει αποδειχτεί από προγενέστερες ερευνητικές μελέτες ότι είναι αρκετά μικρή και δεν επηρεάζει ούτε την ποιότητα ούτε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων κατά την τελική εξαγωγή εκτιμώμενων απορροών με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής, όπως το SWAT.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής, λόγω της έλλειψης συγκεκριμένων μετεωρολογικών δεδομένων, επιλέξαμε στο πρόγραμμα SWAT ως μέθοδο εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής την μέθοδο Hargreaves.

5 ΞΗΡΑΣΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Η ξηρασία σαν φαινόμενο απασχολούσε τον άνθρωπο από την αρχαιότητα κιόλας, πριν ακόμα ζήσει σε οργανωμένες κοινωνίες. Οι πρωτόγονοι άνθρωποι ήταν κυρίως νομάδες, γιατί η ανάγκη τους για νερό και τροφή τους ανάγκαζε να μετακινούνται από περιοχές που αντιμετώπιζαν προβλήματα ξηρασίας και κατ' επέκταση λειψυδρίας. Και αργότερα όμως, όταν ο άνθρωπος ζούσε σε οργανωμένες κοινωνίες και η καθημερινότητα του στηριζόταν στην ύπαρξη είτε μέσω της γεωργίας είτε μέσω της κτηνοτροφίας, μακρές περιόδους ξηρασίας οδήγησαν στην κατάρρευση αρχαίων πολιτισμών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πτώση του μεγάλου πολιτισμού των Μάγιας μεταξύ του 800 και 950 μ.Χ. Μείωση των τροπικών καταιγίδων της τάξης του 25 έως 40% ετησίως, αποτέλεσαν την αρχή του τέλους του σπουδαίου αυτού πολιτισμού της Αμερικάνικης Ηπείρου. Άλλες μαρτυρίες δείχνουν ότι στην γειτονική μας Αίγυπτο, πριν από περίπου 4200 χρόνια, το Παλαιό Βασίλειο της Αρχαίας Αιγύπτου εξαφανίστηκε λόγω περιόδου μεγάλης ξηρασίας, όπως μαρτυρούν ευρήματα σε βαθιά θαμμένα ιζήματα στο Δέλτα του Νείλου. Οι προσπάθειες των αρχαίων πολιτισμών να αντιμετωπίσουν την ξηρασία έφταναν μέχρι τις επικλήσεις, τις προσφορές και τις θυσίες στους θεούς, αφού δεν κατείχαν την τεχνογνωσία για μέτρα αυτοπροστασίας. Ο πολύ γνωστός σε όλους μας «χορός της βροχής» των Ινδιάνων, αποτελεί ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα.

Σήμερα, η ξηρασία αποτελεί ένα φαινόμενο που απασχολεί όλους τους λαούς, μεταξύ αυτών και τη χώρα μας, λόγω της γενικότερης λειψυδρίας που παρατηρείται. Επιστημονικές ομάδες μελετούν διαρκώς την ξηρασία, κάνουν στατιστικές προβλέψεις εμφάνισης τους, προτρέπουν σε λύσεις μέσω εφαρμογής μέτρων και κατασκευής έργων καλύτερης διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων. Ωστόσο, συχνά πολίτες και κυβερνήσεις αδιαφορούν για τα μέτρα προστασίας από την ξηρασία, μέχρι φυσικά την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Όπως και να έχει, η ξηρασία σαν γεγονός είναι ακραίο και δυστυχώς, σε αντίθεση με τα άλλα ακραία γεγονότα όπως οι πλημμύρες και οι καταιγίδες, έχει συνήθως μεγάλη χρονική διάρκεια. Και μάλιστα, το φαινόμενο της ξηρασίας έχει τις μεγαλύτερες και σπουδαιότερες αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο, αφού προσβάλλει τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα, το περιβάλλον και κατ' επέκταση όλους τους τομείς της οικονομίας.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής, θα μελετήσουμε το φαινόμενο της ξηρασίας στην περιοχή των λεκανών Πύλης και Μουζακίου, και θα εντοπίσουμε τα χαρακτηριστικά της μέσω δεικτών. Παρακάτω θα ορίσουμε την ξηρασία σαν φαινόμενο, καθώς και τους τύπους αυτής, και θα αναλύσουμε τους δείκτες ξηρασίας και την επιλογή του πλέον κατάλληλου δείκτη για τις ανάγκες της διπλωματικής.

5.2 Ορισμοί και τύποι της Ξηρασίας

Ξηρασία είναι ένα φυσικό φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από σημαντική μείωση του διαθέσιμου νερού κατά τη διάρκεια μιας αξιοσημείωτης χρονικής περιόδου και εκτείνεται σε μεγάλη περιοχή. Σύμφωνα με ένα γενικό ορισμό ξηρασία για ένα υδατικό σύστημα είναι το

φαινόμενο κατά τη διάρκεια εμφάνισης του οποίου το υδατικό σύστημα βρίσκεται κάτω από κρίσιμο επίπεδο σε σχέση με την κανονική του λειτουργία (Τσακίρης, 1995). Η ξηρασία επηρεάζει τις κοινωνικό-οικονομικές δραστηριότητες του ανθρώπου, τις ίδιες τις ανθρώπινες ζωές, καθώς και τα διάφορα στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως τα φυσικά οικοσυστήματα.

Λόγω της πολυπλοκότητας του παγκόσμιου υδρολογικού κύκλου είναι πρακτικά αδύνατο να προσδιοριστεί η προέλευση της ξηρασίας και να θεωρηθεί ως το σημείο έναρξης του υδρολογικού κύκλου. Κατά παραδοχή, η μείωση των βροχοπτώσεων θεωρείται ως η αρχή της ξηρασίας. Η εμφάνιση του φαινομένου αυτού οδηγεί σε μείωση του όγκου αποθήκευσης και των εκροών που εμπλέκονται στον υδρολογικό κύκλο. Έτσι, θίγονται θέματα, όχι μόνο της προσφοράς του νερού, αλλά και εκείνα της ζήτησης και της αποθήκευσης.

Ανάλογα με την επιλογή των υδρολογικών μεταβλητών και των μεταβλητών ενδιαφέροντος, η ξηρασία διακρίνεται σε μετεωρολογική, υδρολογική και γεωργική:

Μετεωρολογική ξηρασία είναι μια περίοδος χωρίς αρκετή βροχή. Το όριο που εντοπίζει την διαφορά με τις κανονικές συνθήκες διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) καθορίζεται ως μείωση μεγαλύτερη ή ίση του 40% του ετήσιου νετού της περιοχής, για μεγάλη διάρκεια (περισσότερο από δύο συνεχόμενα έτη), σε έκταση που να καλύπτει τουλάχιστον το 50% της περιοχής. Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί και ως μείωση του αριθμού ημερών βροχόπτωσης κάτω από ένα όριο.

Υδρολογική ξηρασία είναι η περίοδος υδρολογικού ελλείμματος, για παράδειγμα στην απορροή, στην αποθήκευση σε ταμιευτήρες, στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα.

Γεωργική ξηρασία είναι μια περίοδος με χαμηλά επίπεδα εδαφικής υγρασίας και επάρκειας νερού, που είναι πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Ουσιαστικά συνδέει την μετεωρολογική ξηρασία με τις επιπτώσεις στην γεωργία.

Παρακάτω, αναλύουμε ξεχωριστά την υδρολογική ξηρασία, γιατί αυτή μας ενδιαφέρει και με αυτή θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική.

5.2.1 Υδρολογική ξηρασία

Η υδρολογική ξηρασία (hydrological drought) αφορά στις επιπτώσεις της έλλειψης βροχόπτωσης σε ένα υδρολογικό σύστημα. Ορίζεται ως μια σημαντική μείωση των διαθέσιμων πόρων του νερού σε όλες τις μορφές του, που εμφανίζονται στη φάση του υδρολογικού κύκλου που αφορά τη γη, δηλαδή την κίνηση του νερού πάνω και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και τις φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις της κίνησης αυτής με τα εδαφολογικά στοιχεία. Αυτές οι μορφές αναφέρονται σε διάφορες υδρολογικές μεταβλητές, όπως η απορροή (συμπεριλαμβανομένων το λιώσιμο του χιονιού), τα επίπεδα λιμνών και ταμιευτήρων, όπως επίσης και το επίπεδο των υπογείων υδάτων. Μεταξύ αυτών των μεταβλητών, η απορροή είναι, μακράν, η πιο σημαντική μεταβλητή από άποψη της ποσότητας του νερού. Ως εκ τούτου, το γεγονός της υδρολογικής ξηρασίας σχετίζεται με το έλλειμμα της απορροής σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες. Επισημαίνεται ότι ο Whipple (1966) ορίζει ένα έτος ως υδρολογικά ξηρό όταν η απορροή σε μια λεκάνη απορροής είναι κάτω από κάποιο όριο. Το όριο αυτό είναι διαφορετικό για κάθε λεκάνη απορροής και για κάθε υδατικό μέσο.

Κάθε γεγονός της ξηρασίας χαρακτηρίζεται από τρία γνωρίσματα: (α) τη σοβαρότητα του, που εκφράζεται από ένα δείκτη ξηρασίας, (β) το χρόνο της έναρξης και τη διάρκεια του γεγονότος, και (γ) την χωρική κατανομή.

Η σοβαρότητα της ξηρασίας αναφέρεται, κυρίως, στη μείωση της βροχόπτωσης και στη σοβαρότητα των επιπτώσεων της μείωσης αυτής. Γενικά, μπορεί να καθοριστεί με τον

υπολογισμό διαφόρων δεικτών ξηρασίας, οι οποίοι υπολογίζονται σε σχέση με τις κανονικές τιμές της βροχόπτωσης. Εκτενέστερη περιγραφή και ανάλυση των δεικτών ξηρασίας γίνεται στο επόμενο υποκεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Το δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό της ξηρασίας είναι η έναρξη και η διάρκεια του γεγονότος. Ένα επεισόδιο ξηρασίας μπορεί να παρουσιάζει ένα μικρό χρονικό διάστημα υστέρησης της εμφάνισης του (1-3 μήνες) σε σχέση με την πρώτη ελάττωση ή την πλήρη απουσία της βροχόπτωσης, ενώ στη συνέχεια μπορεί να διατηρείται για μήνες ή και για χρόνια, παρά το γεγονός ότι στο διάστημα αυτό μπορεί να καταγραφούν βροχοπτώσεις, μικρής όμως σημαντικότητας. Επομένως η έναρξη της ξηρασίας υποδηλώνεται από την μείωση των βροχοπτώσεων σε σχέση με τα κανονικά επίπεδα, ενώ η διάρκεια του φαινομένου μπορεί να είναι από μερικούς μήνες, μέχρι αρκετά έτη ή ακόμα και μόνιμο φαινόμενο, που δημιουργεί ερημικές εκτάσεις.

Το τρίτο χαρακτηριστικό της ξηρασίας είναι η χωρική κατανομή. Οι περιοχές που επηρεάζονται από ακραία φαινόμενα ξηρασίας αυξάνονται (επεκτείνονται) σταδιακά όσο η ξηρασία διατηρείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Μεγάλες χώρες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Κίνα και η Ινδία σπάνια επηρεάζονται ολόκληρες από κάποιο επεισόδιο ξηρασίας. Αντίθετα, δεν είναι σπάνιο να παρατηρηθεί ξηρασία σε ολόκληρο το πλάτος και μήκος των μικρών χωρών, όπως είναι η Ελλάδα. Η γνώση της χωρικής κατανομής της ξηρασίας ανά περιοχή έχει πολύ μεγάλη σημασία και μάλιστα, πολύ περισσότερο ανά λεκάνη απορροής. Αυτό συμβαίνει διότι ο σχεδιασμός για τη διαχείριση της ξηρασίας αλλά και ευρύτερα, για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, γίνεται συνήθως σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που έχουν να κάνουν με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και τα φυσικά φαινόμενα που την επηρεάζουν κλιματικά, ή ακόμα να πρόκειται και για τυχαίο γεγονός, δηλαδή η συχνότητα εμφάνισης τους δεν ακολουθεί κάποια χρονική πορεία. Ο Μαχαίρας (1992) ταξινόμησε την ξηρασία σε τρεις τύπους σύμφωνα με την συχνότητα εμφάνισής τους: στη μόνιμη ξηρασία, στην περιοδική ή εποχική ξηρασία και στην τυχαία ξηρασία. Η μόνιμη ξηρασία οδηγεί στη δημιουργία ερήμων και οφείλεται στους υποτροπικούς αντικυκλώνες, στην ηπειρωτικότητα και στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι έρημοι της Καλιφόρνιας, της Χιλής και της Σαχάρας αποτελούν παραδείγματα μόνιμης ξηρασίας. Η εποχική ξηρασία προκαλείται από την ετήσια κύμανση των υποτροπικών δυναμικών αντικυκλώνων, ενώ τα πραγματικά αίτια της τυχαίας ξηρασίας δεν είναι γνωστά, αφού η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας μπορεί να παρουσιάζει ανώμαλη συμπεριφορά όχι μόνο σε μια περιοχή όπου εμφανίζεται η ξηρασία αλλά και σε πολλές άλλες οι οποίες μπορεί να χαρακτηρίζονται από πλημμύρες ή κανονικές συνθήκες βροχοπτώσεων.

Γενικός ορισμός της υδρολογικής ξηρασίας που να καλύπτει τις ιδιαιτερότητες κάθε τόπου είναι ιδιαίτερα δύσκολο να διατυπωθεί. Στο επόμενο υποκεφάλαιο (5.3) θα περιγράψουμε μεγέθη που αποτελούν χαρακτηριστικούς δείκτες ξηρασίας για λεκάνες απορροών.

5.3 Δείκτες ξηρασίας

Οι ερευνητές στην προσπάθειά τους να βρουν τρόπους για να χαρακτηρίσουν κάθε ξηρασία χρησιμοποίησαν διάφορους δείκτες. Οι δείκτες αυτοί στηρίζονται σε μία ή δύο μετεωρολογικές μεταβλητές και επομένως είναι εύκολα κατανοητό ότι δεν μπορούν να χαρακτηρίσουν αξιόπιστα ένα τόσο σύνθετο φαινόμενο, όπως η ξηρασία.

Τα αποτελέσματα της έρευνας, αν και είναι χρήσιμα για την κατανόηση των φαινομένων ξηρασίας, είναι πολύ συχνά ακατάλληλα για λειτουργική χρήση στην παρακολούθηση της

ξηρασίας και της πρόβλεψης συστημάτων. Συγκεκριμένα, σε σχέση με τα παραπάνω χαρακτηριστικά της υδρολογικής ξηρασίας, πρέπει να πληρούνται πολλές λειτουργικές απαιτήσεις. Πρώτον, η αξιολόγηση της σοβαρότητας της ξηρασίας απαιτεί ένα δείκτη ή δείκτες οι οποίοι (α) να είναι εύκολα κατανοητοί, (β) να έχουν φυσική σημασία, (γ) να είναι ευαίσθητοι σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ξηρασίας, (δ) να είναι ανεξάρτητοι του χώρου εφαρμογής, (ε) να προσδίδουν την ξηρασία με σύντομη υστέρηση μετά την εμφάνισή της, και (στ) να βασίζονται σε δεδομένα τα οποία είναι άμεσα διαθέσιμα. Δεύτερον, η πρακτική αναγνώριση ενός γεγονότος ξηρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου είναι δύσκολη και σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τη μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Τρίτον, η συχνότητα εμφάνισης της ξηρασίας παραμένει μια σημαντική παράμετρος. Τέλος, η χωρική κατανομή ενός γεγονότος ξηρασίας, αν και αποτελεί πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό για τις μετεωρολογικές ξηρασίες, ωστόσο δεν έχει ενδιαφέρον για την υδρολογική ξηρασία, δεδομένου ότι οι υδρολόγοι ενδιαφέρονται για την παροχή του νερού μόνο σε ένα μικρό αριθμό σημείων στο χώρο (έξοδοι λεκανών, είσοδοι και έξοδοι ταμιευτήρων κλπ.). Προφανώς, η απορροή σε αυτά τα σημεία παρέχει ένα ολοκληρωμένο μέτρο της χωρικά καταμεμημένης απορροής. Επιπλέον, η λεκάνη απορροής προτείνεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο Για τα Νερά (European Water Framework Directive) ως η μόνη κλίμακα για την εφαρμογή μετρήσεων για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Εν όψει των ανωτέρω απαιτήσεων, η τετραδιάστατη σχέση της ξηρασίας σοβαρότητας-διάρκειας-συχνότητας-χωρικής κατανομής, μπορεί επίσης να μειωθεί σε μία πολύ απλούστερη διδιάστατη σχέση της σοβαρότητας συναρτήσει της συχνότητας.

Υπάρχοντες δείκτες για το χαρακτηρισμό μιας υδρολογικής ξηρασίας, όπως ο Δείκτης Υδρολογικής Ξηρασίας Palmer (PHDI) ή ο Δείκτης Παροχής Επιφανειακού Νερού (SWSI) απαιτούν, σε γενικές γραμμές, πολλά δεδομένα και εντατικούς υπολογισμούς. Αντίθετα, για τις μετεωρολογικές ξηρασίες, υπάρχουν πολύ απλοί και αποτελεσματικοί δείκτες, όπως ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βροχόπτωσης (SPI) που έχει δοκιμαστεί εκτενώς. Προς την κατεύθυνση της απλούστευσης, ο δείκτης ξηρασίας RDI έχει προταθεί πρόσφατα (Tsakiris and Vaggelis, 2005) ενσωματώνοντας εκτός από την συνολική βροχόπτωση και την αθροιστική εξατμισοδιαπνοή. Ένας άλλος κρίσιμος λειτουργικός περιορισμός αφορά τη διαθεσιμότητα της υδρολογικής πληροφορίας. Πολύ συχνά τα δεδομένα απορροής δεν σχετίζονται με τον πραγματικό χρόνο, λόγω καθυστερήσεων που πραγματοποιούνται στην καταγραφή των υδρομετρήσεων, αλλά και αλλαγών στην καμπύλη στάθμης-παροχής που δεν ελέγχεται επαρκώς. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η χρήση επιπρόσθετων δεδομένων, τα οποία είναι άμεσα διαθέσιμα, είναι απαραίτητη.

Παρακάτω περιγράφονται ενδεικτικά κάποιοι γνωστοί Δείκτες Ξηρασίας:

i. Palmer Drought Severity Index (PDSI)

Ο Palmer Index ή Palmer Drought Index (PDI) ήταν ένα ορόσημο στην ανάπτυξη των δεικτών ξηρασίας. Ο PDSI είναι αρκετά δημοφιλής δείκτης και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές εφαρμογές στις ΗΠΑ. Είναι περισσότερο αποτελεσματικός στη γεωργική ξηρασία. Ο όρος “Palmer Index” αντιπροσωπεύει τους 3 δείκτες PDSI, PHDI και Z Index. Ο Palmer (1965) δημιούργησε το δείκτη Palmer Drought Severity Index (PDSI) με σκοπό τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. Ο δείκτης PDSI υπολογίζεται με βάση τα δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και το διαθέσιμο νερό του εδάφους (Available Water Content, AWC). Όλοι οι βασικοί όροι της εξίσωσης ισορροπίας του νερού, δηλαδή η εξατμισοδιαπνοή, η απορροή, η επαναφορά του εδάφους σε κανονικές συνθήκες υγρασίας (soil recharge) και η απώλεια υγρασίας από το επιφανειακό στρώμα εδάφους είναι δυνατόν να υπολογιστούν αν είναι γνωστά τα παραπάνω δεδομένα. Αυτός ο δείκτης σχεδιάστηκε κυρίως για την αντιμετώπιση της ξηρασίας σε ημι-άνυδρες και ξηρές περιοχές όπου η βροχόπτωση είναι η μοναδική ή η

κύρια πηγή υγρασίας. Ο ίδιος ο Palmer επεσήμανε ότι η εφαρμογή του δείκτη σε διαφορετικά κλίματα μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα (Palmer, 1965).

ii. Palmer Hydrological Drought Index (PHDI)

Ο δείκτης υδρολογικής ξηρασίας του Palmer (Karl, 1986) προέρχεται από τον δείκτη PDSI και αναπτύχθηκε για την ποσοτικοποίηση των υδρολογικών παραγόντων σε μακροχρόνια βάση, λαμβάνοντας ως δεδομένα τη βροχόπτωση, την εκροή και την αποθήκευση. Ο δείκτης αυτός ανταποκρίνεται πιο αργά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες από τον δείκτη του Palmer.

iii. Standardized Precipitation Index (SPI)

Οι McKee et al (1993) ανέπτυξαν το δείκτη SPI ο οποίος εφαρμόζεται για την μελέτη μετεωρολογικής ξηρασίας και χρησιμοποιεί σαν δεδομένα μόνο την καταγραφή της βροχόπτωσης σε κάθε περιοχή (για τουλάχιστον 30 έτη). Υπολογίζεται από τη διαφορά της βροχόπτωσης από τη μέση τιμή για μία ορισμένη χρονική περίοδο διαιρώντας την με την τυπική απόκλιση. Επειδή όμως η βροχόπτωση δεν έχει κανονική κατανομή, γίνεται μία ρύθμιση η οποία επιτρέπει στον δείκτη SPI να έχει κανονική κατανομή. Τα δεδομένα προσαρμόζονται σε μια κατανομή γάμμα και στη συνέχεια μετατρέπονται σε κανονική κατανομή. Επομένως, η μέση τιμή του SPI για μία χρονική περίοδο και για συγκεκριμένη περιοχή είναι 0 και η τυπική απόκλιση είναι 1. Αυτή η κανονικοποίηση του δείκτη SPI αποτελεί πλεονέκτημα, έτσι ώστε τα υγρότερα και ξηρότερα τμήματα να μπορούν να αναπαρασταθούν με τον ίδιο τρόπο.

iv. Surface Water Supply Index (SWSI)

Ο δείκτης παροχής επιφανειακού νερού (SWSI) δημιουργήθηκε από τους Shafer and Dezman (1982) ώστε να συμπληρώνει το δείκτη Palmer για τις υγρές συνθήκες (ποσότητα του χιονιού και την αντίστοιχη απορροή) και για περιοχές με έντονη τοπογραφία. Ο δείκτης SWSI αποτελεί ένα είδος μέτρου του επιφανειακού νερού και εξαρτάται από το νερό που απορρέει από τα βουνά, όπου το χιόνι παίζει σημαντικό ρόλο. Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του δείκτη (SWSI) είναι: το πάχος του στρώματος χιονιού, η παροχή, η βροχόπτωση και το πλεόνασμα νερού (απόθεμα), τα οποία εναλλάσσονται ανάλογα με την χρονική περίοδο μελέτης.

v. Palmer Crop Moisture Index (CMI)

Μια άλλη μορφή του δείκτη Palmer αποτελεί ο δείκτης Υγρασίας Σοδειάς (CMI), που έχει ως στόχο να ανιχνεύσει την κατάσταση υγρασίας μιας σοδειάς (εδαφική υγρασία σε βάθος μέχρι 1.5 m) από εβδομάδα σε εβδομάδα, με μετεωρολογική προσέγγιση (Hayes, 1999). Ο δημιουργός του δείκτη αυτού είναι και πάλι ο Palmer (1968) και η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι σχεδόν η ίδια με αυτή του δείκτη PDSI. Ο δείκτης PDSI εντοπίζει μεγάλης διάρκειας υγρές και ξηρές ακολουθίες, ενώ αντίθετα ο δείκτης CMI σχεδιάστηκε για να εκτιμά μικρής διάρκειας καταστάσεις ξηρασίας κυρίως για αγροτικές περιοχές. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται βάσει των μέσων θερμοκρασιών και του ποσού βροχόπτωσης για κάθε εβδομάδα καθώς επίσης και βάσει της τιμής του δείκτη CMI της προηγούμενης εβδομάδας. Ο δείκτης CMI αντιδρά άμεσα στις διάφορες αλλαγές των καιρικών συνθηκών και επειδή έχει διορθωθεί στο χώρο και στο χρόνο μπορεί να συγκρίνει συνθήκες υγρασίας διαφορετικών περιοχών.

vi. Reclamation Drought Index (RDI)

Ο δείκτης RDI (Reclamation Drought Index) δημιουργήθηκε από το Γραφείο Εγγειοβελτίωσης (Bureau of Reclamation) των ΗΠΑ (1988) για την αρωγή βοήθειας σε διάφορες πολιτείες σε περιόδους ξηρασίας. Μοιάζει με τον SWSI, καθώς υπολογίζεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής και ενσωματώνει στοιχεία βροχόπτωσης, χιονιού, απορροών,

σταθμών ταμιευτήρων. Διαφέρει στο ότι απαιτεί επιπλέον δεδομένα θερμοκρασίας (Hayes, 1999). Μειονέκτημά του είναι η αδυναμία σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών λεκανών, αφού ο δείκτης είναι μοναδικός για καθεμία.

vii. Reconnaissance Drought Index (RDI)

Ο RDI (Reconnaissance Drought Index) δημιουργήθηκε από τον Τσακίρη (2004) και βασίζεται στην αναλογία μεταξύ των αθροιστικών ποσοτήτων της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Μπορεί να υπολογιστεί και αυτός για διάφορες χρονικές κλίμακες, ενώ η κανονικοποιημένη του μορφή έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον SPI. Σημαντικό πλεονέκτημα θεωρείται η ενσωμάτωση και θερμοκρασιακών δεδομένων, ιδίως για περιοχές όπου αναμένονται έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές λόγω κλιματικής αλλαγής (Tsakiris and Vaggelis, 2005).

viii. Το ποσοστό επί της κανονικής βροχόπτωσης (Percent of normal precipitation)

Το ποσοστό επί της κανονικής βροχόπτωσης είναι ένας από τους απλούστερους δείκτες ξηρασίας. Σε μία περιοχή υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική τιμή ποσού της βροχόπτωσης δια τη κανονική βροχόπτωση, που υπολογίζεται ως η μέση μηνιαία τιμή μιας χρονοσειράς 30 ετών, και πολλαπλασιάζεται επί 100%. Ο δείκτης αυτός μπορεί να υπολογιστεί είτε για ένα μήνα είτε για ένα σύνολο μηνών. Συνεπώς, η κανονική βροχόπτωση μιας περιοχής αντιπροσωπεύει το 100%, ενώ τιμές μικρότερες από 100% αντιπροσωπεύουν ξηρές συνθήκες. Το ποσοστό, όμως, της μέσης τιμής βροχόπτωσης εύκολα παρερμηνεύεται εφόσον δίνει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές περιοχές και εποχές.

ix. Deciles

Μια άλλη τεχνική εκτίμησης ξηρασίας είναι η διευθέτηση των τιμών βροχόπτωσης μιας χρονοσειράς σε δέκατα (deciles). Αυτός ο δείκτης δημιουργήθηκε από τους Gibbs and Maher (1967) για να αποφύγουν κάποιες αδυναμίες του Percent of Normal, ενώ, όπως και ο Percent of Normal, μπορεί να υπολογιστεί για διάφορες χρονικές κλίμακες. Οι τους Gibbs and Maher ομαδοποίησαν τα μηνιαία συμβάντα βροχόπτωσης σε δέκα κατηγορίες, τα δεκατημόρια και ουσιαστικά η κατανομή των περιστατικών της βροχόπτωσης για μακρόχρονη καταγραφή βροχόπτωσης διαιρείται σε δέκατα (decile). Το πρώτο δεκατημόριο αντιστοιχεί στην ποσότητα βροχής που δεν ξεπερνιέται από το 10% των συμβάντων βροχόπτωσης, ενώ το δέκατο αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ποσότητα βροχόπτωσης που έχει καταγραφεί.

Παρά το γεγονός ότι οι παραπάνω δείκτες μπορούν να προσδιορίσουν την υδρολογική ξηρασία, εντούτοις δεν εκφράζεται η σοβαρότητα του γεγονότος συναρτήσει της συχνότητας. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται από τους Ναλμπάντη και Τσακίρη (2008), η δισδιάστατη σχέση της σοβαρότητας σε σχέση με τη συχνότητα αντιμετωπίζεται με ένα δείκτη που καλείται «SDI» (Streamflow Drought Index), δηλαδή Δείκτης Ξηρασίας από την Απορροή. Ο δείκτης SDI χαρακτηρίζει τη σοβαρότητα της ξηρασίας, ενώ πληρούνται όλες οι απαιτήσεις των εν λόγω δεικτών. Όπως υποδηλώνει και το όνομά του ο δείκτης αυτός χρησιμοποιεί τις τιμές των απορροών. Παρακάτω, επεξηγείται ο δείκτης SDI και αναλύεται η μεθοδολογία του (τύποι εξίσωσης, δεδομένα εισόδου). Ο δείκτης αυτός επελέγη τελικά για την μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της παρούσας εργασίας, αφού είναι ο πλέον κατάλληλος δείκτης για τις ανάγκες της διπλωματικής αυτής και το κυριότερο πλεονέκτημά του, στηρίζεται μόνο στις απορροές.

5.3.1 Ο Δείκτης Ξηρασίας SDI (Streamflow Drought Index)

Δείκτες για το χαρακτηρισμό μιας υδρολογική ξηρασία, όπως ο Δείκτης Παροχής Επιφανειακού Νερού (SWSI) είναι, σε γενικές γραμμές, απαιτητικοί στα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν και χρειάζονται πολλές υπολογιστικές διαδικασίες. Αντίθετα, ο δείκτης SDI

διατηρεί τα πλεονεκτήματα της απλότητας και της αποτελεσματικότητας που βρέθηκαν σε δείκτες μετεωρολογικής ξηρασίας, όπως ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βροχόπτωσης (SPI) ή ο Δείκτης Ξηρασίας RDI (Reconnaissance Drought Index) (Nalbantis, 2008). Ως βασική μεταβλητή για την εκτίμηση της υδρολογικής ξηρασίας γίνεται η αποκλειστική χρήση της απορροής.

Διαχείριση του χρόνου

Η έναρξη ενός επεισοδίου ξηρασίας ορίζεται ως ο χρόνος όταν η απορροή πέφτει κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο (truncation level), ενώ το επεισόδιο της ξηρασίας λήγει όταν η απορροή φτάσει πάλι αυτό το επίπεδο. Για τις σταθερές διαδικασίες χρησιμοποιείται μια σταθερή τιμή, ενώ για τις περιοδικές διαδικασίες μια σειρά από εποχιακά μεταβαλλόμενες τιμές είναι η πιο κατάλληλη. Η μέση τιμή θα πρέπει να αφορά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Στην κλασική προσέγγιση της διαχείρισης του χρόνου, χρησιμοποιούνται διαδοχικά μη-επικαλυπτόμενα χρονικά διαστήματα. Στην εφαρμοζόμενη μεθοδολογία, ο χρόνος αντιμετωπίζεται ως εξής: (α) η 1^η Οκτωβρίου θεωρείται η αρχή του υδρολογικού έτους, η οποία είναι χαρακτηριστική για την περιοχή της Μεσογείου, (β) κάθε τρεις μήνες (31 Δεκεμβρίου, 31 Μαρτίου, 30 Ιουνίου, 30 Σεπτεμβρίου), γίνεται αξιολόγηση της ξηρασίας που αφορά το χρονικό διάστημα από την έναρξη του υδρολογικού έτους μέχρι τους μήνες που αναφέρθηκαν και έτσι χρησιμοποιούνται χρονικά διαστήματα διάρκειας τριών, έξι, εννέα και δώδεκα μηνών και (γ) σχηματίζονται προβλέψεις από τις παραπάνω ημερομηνίες, σχετικά με τις συνθήκες ξηρασίας για μελλοντικές χρονικά διαστήματα.

Τα επικαλυπτόμενα χρονικά διαστήματα που χρησιμοποιούνται σε κάθε υδρολογικό έτος αναφέρονται ως περίοδοι αναφοράς. Αυτά είναι ο Οκτώβριος-Δεκέμβριος, ο Οκτώβριος-Μάρτιος, ο Οκτώβριος-Ιούνιος, και ο Οκτώβριος μέχρι τον Σεπτέμβριο (ένα πλήρες υδρολογικό έτος).

Υπολογιστικά βήματα

Υποθέτουμε ότι η χρονοσειρά των μηνιαίων όγκων απορροής $Q_{i,j}$ είναι διαθέσιμη όπου i είναι το υδρολογικό έτος και j ο μήνας εντός του υδρολογικού έτους ($j = 1$ για τον Οκτώβριο και $j = 12$ για τον Σεπτέμβριο). Με βάση αυτή τη σειρά έχουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,k} \quad i=1,2,\dots \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \quad (5.1)$$

όπου, $V_{i,k}$ είναι ο αθροιστικός όγκος απορροής για το υδρολογικό έτος i και για την περίοδο αναφοράς k , με $k=1$ περίοδο αναφοράς Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου, $k=2$ για Οκτώβριο-Μάρτιο, $k=3$ για Οκτώβριο-Ιούνιο και $k=4$ για Οκτώβριο-Σεπτέμβριο.

Στηριζόμενοι στον αθροιστικό όγκο απορροής $V_{i,k}$, ο δείκτης SDI ορίζεται για κάθε περίοδο αναφοράς k και για κάθε υδρολογικό έτος i , ως ακολούθως:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad i=1,2,\dots \quad k=1,2,3,4 \quad (5.2)$$

όπου, \bar{V}_k και s_k είναι ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του αθροιστικού όγκου απορροής, αντίστοιχα, για την περίοδο αναφοράς k , όπως αυτά εκτιμώνται για μακρόχρονη περίοδο. Σε αυτή την εκδοχή, το επίπεδο «truncation level» τίθεται ίσο με τη μέση τιμή του όγκου, παρόλο που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλες τιμές.

Γενικά, για μικρές λεκάνες απορροής, η απορροή μπορεί να ακολουθήσει μια ασύμμετρη κατανομή πιθανοτήτων που μπορεί κάλλιστα να προσαρμοστεί στην οικογένεια των κατανομών Gamma. Η κατανομή αυτή στη συνέχεια μετατρέπεται σε κανονική. Η εξομάλυνση μπορεί να γίνει απλά χρησιμοποιώντας την κατανομή δύο παραμέτρων λογαριθμική-κανονική κατανομή και επομένως αρκεί ο φυσικός λογάριθμος της απορροής. Βάσει των παραπάνω, ο δείκτης SDI ορίζεται ως:

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}} \quad i=1,2,\dots \quad k=1,2,3,4 \quad (5.3)$$

όπου,

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i=1,2,\dots \quad k=1,2,3,4 \quad (5.4)$$

είναι οι φυσικοί λογάριθμοι της αθροιστικής απορροής με μέσο όρο \bar{y}_k και τυπική απόκλιση $s_{y,k}$ και η εκτίμηση τους γίνεται για μακρά χρονική περίοδο.

Οι κατηγορίες κατάταξης του δείκτη SDI των επεισοδίων της υδρολογικής ξηρασίας είναι πανομοιότυπες με εκείνες που χρησιμοποιούνται για τους δείκτες μετεωρολογικής ξηρασίας SPI και RDI. Πέντε είναι οι κατηγορίες ταξινόμησης των επεισοδίων, οι οποίες συμβολίζονται με ένα ακέραιο αριθμό που κυμαίνεται από 0 (μη-ξηρασία) έως 4 (ακραία ξηρασία) και ορίζονται μέσω των κριτηρίων του Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Περιγραφή των κατηγοριών κατάταξης των επεισοδίων υδρολογικής ξηρασίας με βάση τον δείκτη SDI (Πηγή: Nalbantis, 2008).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ (%)
0	Μη-ξηρασία	$SDI \geq 0.0$	50.0
1	Ήπια ξηρασία	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1
2	Μέτρια ξηρασία	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2
3	Σοβαρή ξηρασία	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4
4	Ακραία ξηρασία	$SDI < -2.0$	2.3

6 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

6.1 Γενικά

Η κλιματική αλλαγή είναι μια σημαντική και διαρκής αλλαγή στη στατιστική κατανομή των καιρικών συνθηκών για περιόδους που κυμαίνονται από δεκαετίες σε εκατομμύρια χρόνια. Μπορεί να είναι μια αλλαγή στο μέσο όρο καιρικών συνθηκών ή στην κατανομή των καιρικών συνθηκών γύρω από τις μέσες συνθήκες (περισσότερα ή λιγότερα ακραία καιρικά φαινόμενα). Η κλιματική αλλαγή προκαλείται από παράγοντες που περιλαμβάνουν ωκεάνιες διεργασίες (όπως η ωκεάνια κυκλοφορία), βιοτικές διαδικασίες, διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τη Γη, τη τεκτονική των πλακών και ηφαιστειακές εκρήξεις και ανθρωπογενείς αλλοιώσεις του φυσικού κόσμου. Οι τελευταίοι αυτοί παράγοντες είναι που προκαλούν σήμερα την υπερθέρμανση του πλανήτη, και συχνά ο όρος «κλιματική αλλαγή» χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ανθρωπογενείς διεργασίες που επιφέρουν κλιματικές αλλαγές. Μάλιστα, στη Σύμβαση Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Αλλαγές (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) η «κλιματική αλλαγή» ορίζεται ως η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, διακρίνοντας έτσι τον όρο από την κλιματική μεταβλητότητα η οποία έχει φυσικά αίτια.

Φυσικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται συχνά σε θεωρητικές προσεγγίσεις για να αντιστοιχίσουν κλιματικά δεδομένα του παρελθόντος, να κάνουν μελλοντικές προβλέψεις και να συνδέσουν τις αιτίες με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

6.2 Κύρια Αίτια του Φαινομένου

Το κλίμα αλλάζει αποκρινόμενο σε μεταβολές της παγκόσμιας ενεργειακής ισορροπίας. Σε μια πιο ευρεία κλίμακα, το ποσοστό στο οποίο η ενέργεια λαμβάνεται από τον ήλιο και το ποσοστό στο οποίο χάνεται στο διάστημα καθορίζουν θερμοκρασιακό ισοζύγιο και κλίμα της Γης. Η ενέργεια έπειτα κατανέμεται σε όλη την υφήλιο με τους ανέμους, τα θαλάσσια ρεύματα και άλλους μηχανισμούς ώστε να επιδρά στα κλίματα διαφορετικών περιοχών. Οι παράγοντες που μπορούν να σχηματίσουν το κλίμα ονομάζονται «κλιματικοί ενισχυτές» (climate forcings) ή «μηχανισμοί ενίσχυσης». Αυτοί περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως η ποικιλότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, παρεκκλίσεις στην τροχιά της Γης, ο σχηματισμός των βουνών καθώς και αλλαγές στις συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου. Υπάρχει μια ποικιλία αναδράσεων κλιματικής αλλαγής (feedback) που είτε ενισχύουν είτε μειώνουν την αρχική ενίσχυση. Μερικά τμήματα του κλιματικού συστήματος, όπως οι ωκεανοί και η παγοκάλυψη, αποκρίνονται αργά σε αντίδραση με τους κλιματικούς ενισχυτές, ενώ άλλοι αποκρίνονται πιο γρήγορα.

Οι μηχανισμοί ενίσχυσης μπορεί να είναι είτε «εσωτερικοί» είτε «εξωτερικοί». Οι εσωτερικοί μηχανισμοί ενίσχυσης αποτελούν φυσικές διαδικασίες μέσα στο ίδιο το κλιματικό σύστημα. Οι εξωτερικοί μηχανισμοί ενίσχυσης μπορούν να είναι είτε φυσικοί (π.χ. αλλαγές στην ηλιακή απόδοση-(solar output)- ή ανθρωπογενείς (π.χ. αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου). Αν και ο αρχικός μηχανισμός ενίσχυσης μπορεί να είναι εσωτερικός ή εξωτερικός, η απόκριση στο κλιματικό σύστημα ίσως είναι ταχεία (π.χ. μια ξαφνική ψύξη

εξαιτίας ηφαιστειακής τέφρας που αντανακλά το φως του ηλίου), αργή (π.χ. θερμική εξάπλωση του ζεστού ωκεάνιου νερού) ή ένας συνδυασμός (π.χ. ξαφνική απώλεια του albedo στον αρκτικό ωκεανό καθώς ο θαλάσσιος πάγος λιώνει και ακολούθως η θερμική εξάπλωση του νερού). Συνεπώς, το κλιματικό σύστημα μπορεί να αποκριθεί απότομα, αλλά η πλήρης απόκριση σε μηχανισμούς ενίσχυσης ίσως δεν αναπτυχθεί πλήρως για αιώνες ή και περισσότερο.

Ωστόσο, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) μελετάει την κλιματική αλλαγή από ανθρωπογενείς μηχανισμούς και εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με αυτές. Σπουδαιότερος παράγοντας της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη αποτελεί ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με αέρια που προκαλούν ή και ενισχύουν το φαινόμενο το θερμοκηπίου, δηλαδή δημιουργούν ένα στρώμα στα κατώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, που εγκλωβίζει την ηλιακή ακτινοβολία και προκαλεί αύξηση της παγκόσμιας θέρμανσης. Τα κυριότερα είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄) και τα οξείδια του αζώτου (N₂O), καθώς επίσης και οι χλωροφθοροάνθρακες (CFCs). Για το λόγο αυτό τα αέρια αυτά είναι επίσης γνωστά και ως αέρια του θερμοκηπίου (greenhouse gases). Η μεγάλη συγκέντρωση τους στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας δεν είναι μόνο τοξική για τον άνθρωπο, αλλά και για το κλίμα, λόγω της υπερθέρμανσης. Οι ανθρωπογενείς διεργασίες που εμπλουτίζουν την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου σχετίζεται πρωτευόντως με την βαριά βιομηχανία και την καύση γαιανθράκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και δευτερευόντως με τη γεωργία (γεωργικά μηχανήματα, αεροψεκασμοί) και τον τομέα μεταφορών. Επίσης, σε υποανάπτυκτες χώρες η καύση των απορριμμάτων ή λαστίχων αυτοκινήτου ενισχύει την ατμόσφαιρα με τέτοιους ρύπους.

Τέλος, όπως αναφέραμε η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει το κλίμα. Δεν χαρακτηρίζεται ως ανθρωπογενής παρέμβαση. Ωστόσο, το τελευταίο καιρό η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα έχει προβληματίσει τους επιστήμονες και μάλιστα στην 5^η Έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την αλλαγή του κλίματος αναφέρεται ότι η εισερχόμενη ακτινοβολία (ηλιακή και κοσμική) ίσως να επηρεάζει περισσότερο από όσο πιστεύαμε μέχρι πρότινος στην θέρμανση του πλανήτη. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με αυξημένα επίπεδα συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου, ενισχύει ραγδαία τις αναμενόμενες κλιματικές μεταβολές.

6.3 Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής

Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή έχει ήδη παρατηρήσιμες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι παγετώνες έχουν συρρικνωθεί, ο πάγος στα ποτάμια και στις λίμνες σπάει νωρίτερα, η ποικιλομορφία φυτών και ζώων έχει αλλάξει και τα δέντρα ανθίζουν νωρίτερα. Επιδράσεις που οι επιστήμονες είχαν προβλέψει στο παρελθόν ότι θα προκύψουν από την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, συμβαίνουν τώρα: η απώλεια του θαλάσσιου πάγου, η επιταχυνόμενη άνοδος της στάθμης της θάλασσας και πιο ισχυροί καύσωνες.

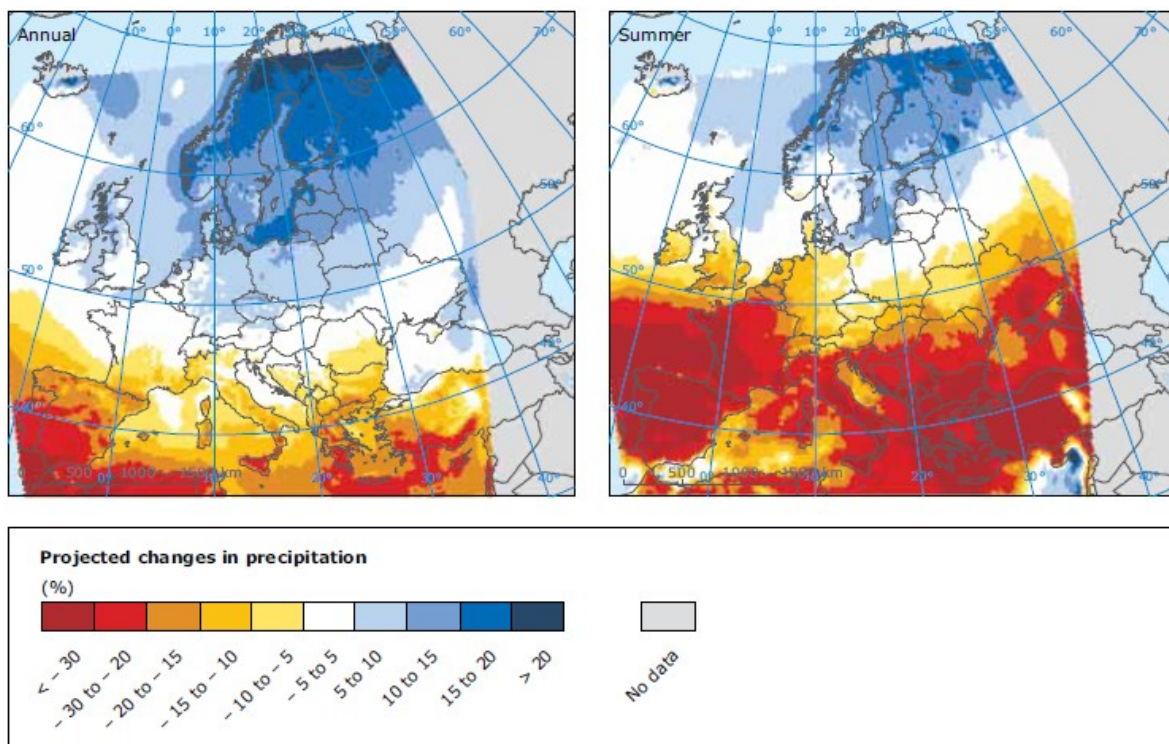
Παρακάτω αναλύονται οι επιπτώσεις σε κάθε τομέα ξεχωριστά.

6.3.1 Κλίμα

Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι οι παγκόσμιες θερμοκρασίες θα συνεχίσουν να αυξάνονται για τις επόμενες δεκαετίες, κυρίως λόγω των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Αυτό το γεγονός θα επηρεάζει άμεσα τις κλιματικές ζώνες, που ήδη έχουν προβλέψει μετακίνηση των ζωνών βροχόπτωσης από τον Ισημερινό προς τον Βορρά με άμεσο αποτέλεσμα τη σταδιακή αλλαγή των κλιμάτων των περιοχών που θα πληγούν περισσότερο από αυτές τις αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, οι επιστήμονες προβλέπουν

σταδιακή ερημοποίηση του νότιου τμήματος της εύκρατης ζώνης, όπως τα παράλια της Μεσογείου, με την Ελλάδα να ανήκει σε ζώνη υψηλού κινδύνου να υποστεί τέτοιες αλλαγές. Επιπλέον, αναμένονται συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως κύματα θερμότητας (περισσότερες μέρες δυσφορίας) και ξηρασίες ή εντονότερες βροχοπτώσεις ανάλογα με την περιοχή. Ειδικά για την Ευρώπη, προβλέπεται μείωση των βροχοπτώσεων στις νότιες χώρες (Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία, Πορτογαλία), μείωση που αυξάνεται κατά το θέρος (έως και 30%), ενώ προβλέπεται και ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη τη διάρκεια του έτους. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα κλίμα από εύκρατο σε ένα πιο ξηρό, ερημικό κλίμα με τρομερές συνέπειες στην οικονομία, τα οικοσυστήματα και τη γενικότερη διαβίωση των κατοίκων των περιοχών αυτών. Στον αντίποδα, οι χώρες της κεντρικής Ευρώπης, πιθανότατα να ευνοηθούν από αυτές τις αλλαγές, καθώς το κλίμα θα αρχίσει να μοιάζει με εύκρατο και νέες καλλιέργειες θα είναι δυνατόν να αναπτυχθούν, που πριν δεν ευδοκίμουςαν (ελαιόδεντρα, σποροφόρα κ.α.).

Στον παρακάτω χάρτη, που αντλήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή του Περιβάλλοντος (European Environmental Agency-EEA), φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά των βροχοπτώσεων για την Ευρώπη για όλη τη διάρκεια του έτους (annual) και για το θέρος (summer), μεταξύ μετρημένων βροχοπτώσεων για την ιστορική χρονοσειρά 1961-1990 και εκτιμώμενων μελλοντικών για το 2071-2100.



Σχήμα 6.1: Εκτιμώμενες μεταβολές της βροχόπτωσης (%) για ετήσια (annual) και καλοκαιρινά (summer) δεδομένα μεταξύ των περιόδων 1961-1990 και 2071-2100 (Πηγή: EEA, 2008).

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω χάρτες έχουν δημιουργηθεί με χρήση του προγράμματος ENSEMBLES, αξιοποιώντας διάφορα περιοχικά κλιματικά μοντέλα (RCMs), με χωρική ανάλυση της τάξης των 25 km και οριακές συνθήκες από πέντε παγκόσμια κλιματικά μοντέλα, που όλα χρησιμοποιούν το σενάριο εκπομπών της IPCC, A1B. Από τους χάρτες αυτούς επιβεβαιώνονται τα προηγούμενα λεγόμενα και φαίνεται ξεκάθαρα ποιες χώρες θα πληγούν από ξηρασία και ποιες θα ευνοηθούν. Ευνοημένες φαίνονται να είναι το νότιο τμήμα της Μεγάλης Βρετανίας, η βόρεια Γαλλία, οι Κάτω Χώρες, κάποιες χώρες και τμήματα

χωρών της κεντρικής Ευρώπης και οι βόρειες Βαλκανικές χώρες. Αντίθετα, περισσότερο θα πληγούν, τα παράλια της Μεσογείου με την Ισπανία, νότια Γαλλία, Ιταλία, Πορτογαλία, Τουρκία και κυρίως τα νότια Βαλκάνια, με την Ελλάδα στο επίκεντρο μιας τέτοιας αλλαγής. Εντύπωση προκαλεί μάλιστα, για την περιοχή της Κύπρου η εκτίμηση ίσως κάποιας σχετικής αύξησης των βροχοπτώσεων μόνο κατά τους θερινούς μήνες, που παραπέμπει σε κλιματικές συνθήκες τροπικές.

Αντίστοιχοι χάρτες για την χιονοκάλυψη και την μεταβολή της θερμοκρασίας δείχνουν ηπιότερα κλίματα για τις χώρες της Βόρειας Ευρώπης (Σκανδιναβικές χώρες, Ρωσία) με μείωση της ετήσιας χιονοκάλυψης μέχρι και 25%.

6.3.2 Υδατικά αποθέματα

Τα φαινόμενα της εξάτμισης και των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλάζι κ.λπ.) σηματοδοτούν την αρχή του υδρολογικού κύκλου. Τα νερά των κατακρημνισμάτων, με την άφιξή τους στην επιφάνεια της γης, διαμοιράζονται πρωτογενώς στην εξάτμιση και διαπνοή (μέσω των φυτών), στην απορροή (μέσω των υδρογραφικών δικτύων) και στην κατεισδύση. Δευτερογενώς το σχήμα αυτό γίνεται πιο σύνθετο, καθώς νερό που απορρέει είτε εξατμίζεται στη διαδρομή του είτε κατεισδύει μερικά, ενώ αντίθετα το νερό που έχει κατεισδύσει εξέρχεται στην επιφάνεια μέσω των πηγαιών εκφορτίσεων και συνεχίζει τη διαδρομή του με επιφανειακή απορροή και μερική εξάτμιση. Γίνεται επομένως φανερό ότι κάθε διατάραξη του «κύκλου» των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων συνεπάγεται σημαντικές μεταβολές του υδρολογικού κύκλου, του υδρολογικού ισοζυγίου (επιφανειακά ύδατα) και του υδρογεωλογικού ισοζυγίου (υπόγεια ύδατα).

Σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, αναμένεται αύξηση της εξάτμισης και της διαπνοής, αύξηση των αναγκών άρδευσης και, ενδεχομένως, των τουριστικών αναγκών, καθώς και αύξηση του ρυπαντικού φορτίου, επειδή αυτό θα αυξάνεται σε περιορισμένο όγκο υδατικού σώματος (Στουρνάρας, 2007).

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στα υδατικά και κυρίως στα υπόγεια υδατικά συστήματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

1. Γενική μείωση της τροφοδοσίας και ανανέωσης του νερού των υδροφόρων οριζόντων λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων και της αύξησης της εξατμισοδιαπνοής.
2. Αυξημένη υφαλμύρωση των παράκτιων και υποθαλάσσιων υδροφόρων οριζόντων, με προέλαση του μετώπου υφαλμύρωσης προς την ενδοχώρα λόγω του μειωμένου δυναμικού της χερσαίας υδατικής φάσης εξαιτίας της μειωμένης τροφοδοσίας και της υπεράντλησης.
3. Αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντικού φορτίου στα παράκτια υδατικά σώματα και στη θάλασσα λόγω μικρότερης αραιώσης.
4. Εντατικοποίηση της αποδόμησης των δελταϊκών περιοχών, που ήδη έχει ξεκινήσει λόγω της κατασκευής εγκάρσιων φραγμάτων στην ανάντη ζώνη (μείωση απορροής και στερεοπαροχής) και παράλληλων αναχωμάτων στην πεδινή ζώνη του Δέλτα (άφιξη μεταφερόμενου υλικού σε ένα και μοναδικό στόμιο).
5. Ρύπανση ή αποξήρανση των παράκτιων υγροτόπων.
6. Επιδείνωση του φαινομένου της ερημοποίησης λόγω υδατικού ελλείμματος και εδαφικών μεταβολών (συμπυκνώσεις στεγανοποιήσεις κ.λπ.).

Αυτές θα είναι οι επιπτώσεις των χωρών-περιοχών που θα πληγούν από κλιματικές αλλαγές μείωσης βροχόπτωσης και αύξησης της μέσης θερμοκρασίας, όπως στον Ελλαδικό χώρο. Στις επιπτώσεις αυτές να προστεθούν και οικονομικές επιπτώσεις λόγω των μειωμένων υδατικών αποθεμάτων για ανάγκες ύδρευσης, τουριστικής και βιομηχανικής χρήσης και άρδευσης. Η

διαφορά της ζήτησης από το προσφερόμενο-διαθέσιμο υδατικό δυναμικό θα οδηγήσει σε αύξηση της τιμής του κυβικού μέτρου του νερού, χωρίς να λύνει το πρόβλημα τις ελλειμματικής ζήτησης, και άλλα μέτρα θα πρέπει να ληφθούν από την κοινωνία (ταμιευτήρες, έργα εκτροπής, αφαλάτωση). Επίσης, προβλέπεται μειωμένη παραγωγικότητα λόγω της έλλειψης υδατικών πόρων στην περίπτωση που αυτοί αποτελούν εισροή στην παραγωγική διαδικασία (γεωργικός τομέας, τομέας παραγωγής ενέργειας από υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, βιομηχανικός τομέας, δασοκομία, ιχθυοκαλλιέργειες). Τέλος, η αύξηση του κόστους απορρύπανσης και επεξεργασίας αποβλήτων είναι δεδομένη όπως και η μείωση του οφέλους από δραστηριότητες αναψυχής.

Για τις χώρες που θα «ευνοηθούν» με αύξηση των παρατηρημένων τιμών των βροχοπτώσεων, ίσως να έρθουν αντιμέτωπες με πρωτοφανείς πλημμύρες, αφού το υπέδαφος δεν θα μπορεί να αντεπεξέλθει (κορεσμένη κατείδυση) στην αυξημένη απορροή. Το οικονομικό κόστος για την αποκατάσταση από τις πλημμύρες είναι μεγάλο και σε κάθε περίπτωση κρίνονται επιτακτικά αντιπλημμυρικά έργα (π.χ. αναχώματα, έργα διόδευσης).

6.3.3 Άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Η στάθμη της θάλασσας σε όλο τον κόσμο αυξάνεται διαρκώς. Η τρέχουσα στάθμη της θάλασσας πιθανώς να επηρεάζει τον ανθρώπινο πληθυσμό, για παράδειγμα εκείνους που ζουν στις παράκτιες περιοχές και στα νησιά, αλλά και το φυσικό περιβάλλον, όπως τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Μεταξύ των ετών 1870 και 2004, η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας αυξήθηκε κατά 195 mm. Από το 1950 έως το 2009, οι μετρήσεις δείχνουν μια μέση ετήσια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 1.7 ± 0.3 mm ετησίως, με τα δορυφορικά δεδομένα να δείχνουν αύξηση της τάξης του 3.3 ± 0.4 mm ανά έτος για την περίοδο 1993 - 2009, αύξηση σχεδόν διπλάσια από ότι είχε προηγουμένως εκτιμηθεί. Δεν είναι σαφές κατά πόσον η αύξηση του ποσοστού αυτού αντανακλά μία αύξηση στην υποκείμενη μακροπρόθεσμη τάση.

Δύο είναι οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν στην παρατηρούμενη άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Ο πρώτος παράγοντας είναι η θερμική διαστολή: καθώς το νερό των ωκεανών θερμαίνεται, διαστέλλεται. Ο δεύτερος είναι από τη συμβολή των χερσαίων πάγων λόγω της αυξημένης τήξης. Το μεγαλύτερο ποσοστό νερού στη γη βρίσκεται αποθηκευμένο σε παγετώνες και τα στρώματα πάγου.

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας αναμένεται να συνεχιστεί για αιώνες ακόμα. Το 2007, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), προέβλεψε ότι κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα, η στάθμη της θάλασσας θα αυξηθεί κατά ακόμα 18 έως 59 cm. Οι αριθμοί αυτοί όμως δεν περιλαμβάνουν αβεβαιότητες ανατροφοδότησης του κύκλου του άνθρακα στο κλίμα, ούτε περιλαμβάνουν τα πλήρη αποτελέσματα των αλλαγών στη ροή στρωμάτων πάγου. Οι πιο πρόσφατες προβλέψεις αξιολογήθηκαν από το Αμερικανικό Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (US National Research Council) υποδεικνύοντας πιθανή άνοδο της στάθμης της θάλασσας μετά τον 21^ο αιώνα μεταξύ 56 και 200 cm.

Στο χρονικό διάστημα από αιώνες σε χιλιετίες, το λιώσιμο των πάγων θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Μερική τήξη του στρώματος πάγου της Γροιλανδίας και ενδεχομένως στρώματος πάγου της Δυτικής Ανταρκτικής, θα μπορούσε να συμβάλει σε άνοδο της στάθμης της θάλασσας από 4 έως 6 m ή και περισσότερο.

Μελλοντική άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες των παράκτιων κοινοτήτων στους επόμενους αιώνες: για παράδειγμα, πολλές μεγάλες πόλεις όπως το Λονδίνο, η Νέα Ορλεάνη και η Νέα Υόρκη ήδη χρειάζονται αμυντικά έργα προστασίας από θυελλώδη κύματα (storm-surge), και θα χρειαστούν ακόμα

περισσότερα αν το επίπεδο της θάλασσας αυξηθεί, παρόλο που αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα προβλήματα καθίζησης. Άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα μπορούσε να εκτοπίσει επίσης πολλούς παράκτιους πληθυσμούς: για παράδειγμα, εκτιμάται ότι η άνοδος της στάθμης της θάλασσας μόλις 200 mm θα μπορούσε να δημιουργήσει 740000 άστεγους στη Νιγηρία, τις Μαλδίβες, το Τουβαλού και άλλες χαμηλού υψομέτρου χώρες που βρίσκονται μεταξύ των περιοχών υψηλού κινδύνου. Η περιβαλλοντική ομάδα του ΟΗΕ έχει προειδοποιήσει ότι σε τρέχουσες τιμές, το επίπεδο της θάλασσας θα είναι αρκετά υψηλό, ώστε να κάνει τις Μαλδίβες ακατοίκητες από το τέλος του 21^{ου} αιώνα.

Επιπρόσθετα, η μελλοντική άνοδος της στάθμης της θάλασσας δεν αναμένεται να είναι ομοιόμορφη σε παγκόσμιο επίπεδο. Ορισμένες περιφέρειες δείχνουν το επίπεδο της θάλασσας να αυξάνεται σημαντικά περισσότερο από τον παγκόσμιο μέσο όρο (σε πολλές περιπτώσεις περισσότερο από το διπλάσιο του μέσου όρου), ενώ άλλες παρατηρείται πτώση της στάθμης της θάλασσας. Ωστόσο, τα μοντέλα διαφωνούν ως προς τον πιθανό τρόπο της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας.

Με βάση την προβλεπόμενη αύξηση, για την τρέχουσα και μελλοντική αλλαγή του κλίματος, αναμένεται να υπάρξει μια σειρά από επιπτώσεις, ιδίως στα παράκτια συστήματα. Τέτοιες επιπτώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν αυξημένη διάβρωση των ακτών, πλημμυρών από υψηλότερα θυελλώδη κύματα, αναστολή των πρωτογενών παραγωγικών διαδικασιών, πιο εκτεταμένες παράκτιες πλημμύρες, αλλαγές στην ποιότητα των επιφανειακών υδάτων και των χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων, αυξημένη απώλεια της περιουσίας και των παράκτιων κατοικιών, αυξημένος κίνδυνος πλημμυρών με πιθανές απώλειες ζωής, απώλεια των μη αγοραίων πολιτιστικών πόρων και αξιών, επιπτώσεις στη γεωργία και την υδατοκαλλιέργεια μέσω της μείωσης της ποιότητας του εδάφους και των υδάτων και την απώλεια του τουρισμού, αναψυχής και λειτουργιών μεταφοράς.

Επικρατεί μια θεώρηση ότι πολλές από αυτές τις επιπτώσεις θα είναι αρνητικές, ειδικά για τα τρία τέταρτα των φτωχών του κόσμου που εξαρτώνται από τη γεωργία. Η έκθεση, ωστόσο, σημειώνει ότι λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας των παράκτιων οικοσυστημάτων είναι υπαρκτές περιφερειακές και τοπικές διαφορές στην προβλεπόμενη στάθμη της θάλασσας και των κλιματικών αλλαγών. Επίσης, θα υπάρξουν διαφορές στην ανθεκτικότητα και την προσαρμοστική ικανότητα των οικοσυστημάτων και των χωρών, και οι επιπτώσεις θα είναι εξαιρετικά μεταβλητές στο χρόνο και στο χώρο.

Στατιστικά στοιχεία για την επίδραση στον άνθρωπο της άνοδου της στάθμης της θάλασσας σπανίζουν. Μια μελέτη τον Απρίλιο του 2007 με θέμα «Περιβάλλον και Αστικοποίηση» (Environment and Urbanization) αναφέρει ότι 634 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε παράκτιες περιοχές σε υψόμετρο λιγότερο των 9.1 m (30 inches) από το επίπεδο της θάλασσας. Η μελέτη ανέφερε επίσης ότι περίπου τα δύο τρίτα των πόλεων του κόσμου με πάνω από πέντε εκατομμύρια ανθρώπους βρίσκονται σε αυτές τις χαμηλού υψομέτρου παράκτιες περιοχές. Η έκθεση της IPCC του 2007, εκτιμά ότι η επιταχυνόμενη τήξη των πάγων των Ιμαλαΐων και η συνακόλουθη άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα αυξήσει πιθανόν τη σοβαρότητα των πλημμυρών σε σύντομο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της περιόδου των βροχών και σε μεγάλο βαθμό μεγεθύνει την επίδραση των παλιρροιακών καταιγίδων κατά τη διάρκεια της περιόδου των κυκλώνων. Μια άνοδος της στάθμης της θάλασσας της τάξης των μόλις 400 mm στον Κόλπο της Βεγγάλης θα καταβυθίζει το 11% των παράκτιων περιοχών του Μπαγκλαντές, δημιουργώντας 7 με 10 εκατομμύρια πρόσφυγες λόγω κλιματικών αλλαγών.

Οι εκτιμήσεις της IPCC τονίζουν ότι οι δελταϊκές εκβολές ποταμών και τα μικρά νησιωτικά κράτη είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας που προκαλείται ταυτόχρονα από τη θερμική διαστολή και του όγκο των ωκεανών. Οι αλλαγές στη στάθμη της θάλασσας δεν έχουν ακόμη αποδειχθεί με βεβαιότητα ότι έχουν άμεσο αποτέλεσμα στον

τομέα του περιβάλλοντος, τις ανθρώπινες ή οικονομικές απώλειες για τα μικρά νησιωτικά κράτη, αλλά η IPCC και άλλοι οργανισμοί θεωρούν ότι αυτό αποτελεί ένα σενάριο σοβαρού κινδύνου κατά τις προσεχείς δεκαετίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα νησιωτικά έθνη του Ειρηνικού, κυρίως τα νησιά της Πολυνησίας του Τουβαλού, το οποίο πλήττεται από σοβαρές πλημμύρες τα τελευταία χρόνια, ενώ πιστεύεται ότι θα είναι ένα «ναυάγιο» λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας.

Αποθαρρυντικά είναι και τα αποτελέσματα για την Ελλάδα, αφού αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από παράκτιες περιοχές και νησιωτικά συμπλέγματα με συνολικό μήκος ακτογραμμών 16200 km. Το μεγαλύτερο μέρος των οικισμών και πόλεων είναι κτισμένες σε παράκτιες περιοχές με το 33% των κατοίκων να ζουν μόνιμα σε απόσταση λιγότερη από 2 km από την ακτή. Στον χάρτη του Παραρτήματος Σχημάτων (Σχ.Β.5) απεικονίζονται οι ζώνες υψηλής τρωτότητας από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, μέτριας και ζώνες χαλαρών ιζηματογενών αποθέσεων με υψόμετρο κάτω από 20 m, που είναι δυνατό να διαβρωθούν. Πιο συγκεκριμένα, από τα περίπου 16.200 km του συνολικού μήκους της ελληνικής ακτογραμμής, τα 960 km (6% της συνολικής ακτογραμμής) αντιστοιχούν στις παράκτιες δελταϊκές περιοχές υψηλής τρωτότητας, τα 2.400 km (15% της συνολικής ακτογραμμής) αντιστοιχούν στα Νεογενή μαλακά ιζήματα μέτριας τρωτότητας, ενώ τα υπόλοιπα 12810 km (79% της συνολικής ακτογραμμής) αντιστοιχούν στις βραχώδεις παράκτιες περιοχές χαμηλής τρωτότητας. Επομένως, το συνολικό μήκος ακτογραμμής που αντιστοιχεί σε παράκτιες περιοχές μέτριας έως υψηλής τρωτότητας στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης είναι 3360 km, δηλαδή το 21% της συνολικής ελληνικής ακτογραμμής.

6.3.4 Γεωργία

Η παγκόσμια εγρήγορση σχετικά με την κλιματική αλλαγή εντείνεται χρόνο με το χρόνο, καθώς οι ενδείξεις για τη σοβαρότητα των επιπτώσεων της γίνονται όλο και πιο ανησυχητικές, ιδιαίτερα για τη γεωργία των αναπτυσσόμενων χωρών (FAO, 2009). Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη, μόνο στην Αφρική 220 εκατομμύρια άνθρωποι κάθε χρόνο υποφέρουν από την έλλειψη πόσιμου νερού λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η αγροτική παραγωγή κινδυνεύει λόγω της απώλειας καλλιεργήσιμης γης, της σμίκρυνσης των καλλιεργητικών περιόδων και της αβεβαιότητας σχετικά με το είδος και το χρόνο εγκατάστασης συγκεκριμένων καλλιεργειών. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2100 (UNFCCC, 2007) στην Αφρική τα έσοδα από τη γεωργία μπορεί να μειωθούν έως και 90%, στην Ασία κινδυνεύουν πολλά εκατομμύρια ανθρώπων από αστία, ενώ για την Ευρώπη προκύπτει από ανεξάρτητες έρευνες ότι η μεταβολή του κλίματος θα εντείνει τις οικονομικές ανισότητες στις διάφορες περιφέρειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EEA, 2008).

Η Διακυβερνητική Επιτροπή της Κλιματικής Αλλαγής (IPCC, 2007) αναφέρει ότι μέτρια αύξηση της θερμοκρασίας κατά το πρώτο μισό του αιώνα που διανύουμε πιθανόν θα αυξήσει τις αποδόσεις των καλλιεργειών στην εύκρατη ζώνη, ενώ θα τις μειώσει στην υποτροπική και τροπική ζώνη. Για την Ευρωπαϊκή Ένωση το ερευνητικό πρόγραμμα PESETA προβλέπει, ανάλογα με το σενάριο, για μεν τη Νότια Ευρώπη από μηδενικές μεταβολές έως 27% μείωση της παραγωγής, για δε την Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη αύξηση έως και 40%. Το πρότυπο HadCM3 (EMEKA, 2011a) για τα Σενάρια A2 και B2 (αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C, περίοδος 2031-2060) για τη Βόρειο Μεσόγειο όπου βρίσκεται και η Ελλάδα, προβλέπει μείωση 9.33% για τις βολβώδεις καλλιέργειες (A2) και αύξηση έως και 12.49% για τα σιτηρά (B2). Οι Karpetanaki and Rosenzweig (1997) προέβλεψαν για τον αραβόσιτο μείωση των αποδόσεων στη Θεσσαλία έως και 20%, ενώ μελέτη του Υπουργείου Περιβάλλοντος (1997) για την περίοδο 2071-2100 προέβλεψε ότι η παραγωγή αραβοσίτου θα μειωθεί έως και 55% και η παραγωγή σκληρού σίτου θα παρουσιάσει μεγάλη διαφοροποίηση, από -67% έως +15%, ανάλογα με το σενάριο. Η ίδια μελέτη προέβλεψε για μεν το βαμβάκι ότι στις περιοχές

της Μακεδονίας και της Θεσσαλίας θα υπάρξει μείωση έως και 29% και για τη Θράκη αύξηση έως και 21%, ενώ για τα αμπελουργικά προϊόντα ότι θα υπάρξει διαφοροποίηση της παραγωγής από -59% έως +55%, ανάλογα με το σενάριο και την περιοχή. Οι επιπτώσεις στις δενδρώδεις καλλιέργειες αναμένεται να είναι αρνητικές, ιδιαίτερα στη Νότια Ελλάδα και την Κρήτη. Όλες οι μελέτες συγκλίνουν ότι τα επόμενα χρόνια η περιοχή της Νότιας Ευρώπης και ειδικότερα της Μεσογείου θα είναι ευάλωτη αναφορικά με τη φυτική παραγωγή, γεγονός με εξαιρετική σημασία για την Ελλάδα.

Ο γεωργικός τομέας αποτελεί σημαντικό τμήμα της οικονομίας πολλών χωρών ακόμα και για την ελληνική οικονομία παρά τη συνεχή συρρίκνωσή του τις τελευταίες δεκαετίες. Ειδικότερα, το γεωργικό προϊόν καλύπτει το 5-6% του ΑΕΠ της χώρας, ενώ η απασχόληση στον τομέα φθάνει το 17% της συνολικής απασχόλησης (ΕΜΕΚΑ, 2011a). Επιπλέον, η γεωργία στηρίζει τις γεωργικές βιομηχανίες, που αντιπροσωπεύουν το 1/4 των ελληνικών βιομηχανιών και συνεισφέρουν στο 1/3 του βιομηχανικού προϊόντος και στο 1/3 της απασχόλησης στο βιομηχανικό τομέα. Η αγροτική παραγωγή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το κλίμα, καθώς το είδος και η ποσότητα και ποιότητα των παραγόμενων γεωργικών προϊόντων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αυτό. Οι κλιματικές μεταβλητές που κυρίως επηρεάζουν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών είναι η θερμοκρασία, τα κατακρημνίσματα, η ηλιακή ακτινοβολία (ένταση και διάρκεια έκθεσης) και η σύσταση της ατμόσφαιρας (IPCC, 2007). Οι επιπτώσεις στην παραγωγικότητα επηρεάζουν το αγροτικό εισόδημα και την απασχόληση.

6.3.5 Αλιεία και υδατοκαλλιέργειες

Η προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας και μείωσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μπορούν να συνδυαστούν με κινδύνους απρόσμενης αυξομείωσης της παροχής των ελληνικών ποταμών, καθώς και απρόβλεπτης έντασης οικολογικής αναταραχής στις υδατοσυλλογές των εκβολών τους. Είναι προφανές ότι στα εσωτερικά ύδατα θα επηρεαστεί πρωτίστως η διαθεσιμότητα των υδάτων, καθώς θα αυξηθεί ο ανταγωνισμός για άλλες χρήσεις. Παρόμοιας φύσεως κίνδυνοι αναμένονται και στις περιπτώσεις πολλών λιμνών, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους παρατεταμένης ανομβρίας. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την υποβάθμιση του περιβάλλοντος για την ιχθυοπανίδα και πιθανή μείωση της παραγωγικής ικανότητας των εσωτερικών υδατοσυλλογών (FAO, 2008).

Η ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας των θαλάσσιων υδάτων μπορεί να επιταχύνει τους ρυθμούς ανάπτυξης των ποικιλόθερων υδρόβιων ζωικών οργανισμών. Η θεώρηση αυτή δεν μπορεί να συσχετιστεί με πιθανή αναμενόμενη αύξηση της αλιευτικής παραγωγής, δεδομένου ότι η παραπάνω σχέση θα μπορούσε να επαληθευθεί μόνο σε μια περιοχή που δεν αλιεύεται, επειδή είναι γνωστό ότι επί του παρόντος η αλιευτική κατάσταση μιας περιοχής καθορίζεται περισσότερο από την υπεραλίευση και λιγότερο από τους φυσικούς παράγοντες.

Άνοδος της θερμοκρασίας θα επιφέρει και άνοδο της στάθμης της θάλασσας, μεταβολή της βιοποικιλότητας, της δομής των αλιευτικών πεδίων, με την έννοια των βιολογικών, φυσικών, χημικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών των θαλασσών, καθώς και του επιπέδου παρουσίας των εμπορικής αξίας αλιευμάτων. Με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας θα περιοριστούν οι υδροβιότοποι, όπου αναπαράγονται και διαβιούν κατά τα πρώτα τους στάδια πολλά είδη ιχθυδίων (γόνοι ψαριών). Η άνοδος της θερμοκρασίας επηρεάζει τις μεταναστεύσεις των ψαριών από και προς τις περιοχές αναπαραγωγής και διατροφής. Με τη γενικότερη μεταβολή της θερμοκρασίας των θαλάσσιων υδάτων, δεν αποκλείεται να προκληθούν αλλαγές στην κυκλοφορία των υδάτων (επιφανειακά, εσωτερικά, ανοδικά, καθοδικά, παράκτια ρεύματα), με ότι μπορεί αυτό να συνεπάγεται για την οικολογική και παραγωγική δυνατότητα των υδατοσυλλογών.

Όσον αφορά τις υδατοκαλλιέργειες είναι προφανές ότι, εφόσον συνεχιστεί η εφαρμογή του υφιστάμενου εντατικού συστήματος εκτροφής, σύντομα θα προκληθούν οικολογικά-περιβαλλοντικά προβλήματα, ιδίως στις περιπτώσεις χρήσης των παράκτιων πλωτών κλωβών, με συνέπεια τη μείωση της παραγωγής. Πέρα από τα παραπάνω, πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας της αύξησης της συχνότητας εμφάνισης και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι ανεμοστρόβιλοι, μπορεί να προκληθούν σημαντικές οικονομικές ζημίες, τόσο σε αλιευτικά σκάφη και σε πλωτούς κλωβούς όσο και σε παράκτιες εγκαταστάσεις εκτροφής ιχθύων και μυδιών..

Τέλος, η διαφαινόμενη άνοδος της στάθμης των υδάτων των θαλάσσιων και λιμνοθαλάσσιων περιοχών δεν αποκλείεται να προκαλέσει ανακατατάξεις στα συστήματα και στις μεθόδους της υδατοκαλλιεργητικής δραστηριότητας (π.χ. αποφυγή κατασκευής εγκαταστάσεων εκτροφής στα ύδατα παράκτιων περιοχών). Επίσης, η άνοδος της στάθμης των υδάτων των θαλάσσιων παράκτιων περιοχών δεν αποκλείεται να προκαλέσει μεταβολές στην αναπαραγωγή διαφόρων ειδών ιχθύων, καθώς και στα διάφορα στάδια ανάπτυξης, αλλά και γενικότερα στο επίπεδο της αλιευτικής παραγωγικότητας (European Commission, 2008, FAO, 2008).

6.3.6 Βιοποικιλότητα και οικοσυστήματα

Ως «βιολογική ποικιλότητα» ορίζεται η ποικιλομορφία που εμφανίζεται ανάμεσα στους ζωντανούς οργανισμούς όλων των ειδών, των χερσαίων, θαλάσσιων και υδατικών οικοσυστημάτων και οικολογικών συμπλεγμάτων στα οποία οι οργανισμοί αυτοί ανήκουν. Ο ορισμός περιλαμβάνει την ποικιλότητα μέσα σε ένα είδος όπως και εκείνη, μεταξύ διαφορετικών ειδών και οικοσυστημάτων (Rio Summit, 1992). Μ' άλλα λόγια, η βιοποικιλότητα είναι η ποικιλομορφία της ζωής, σ' όλες τις εκφάνσεις της. Στην ευρύτερή της διάσταση, η βιοποικιλότητα ενσωματώνει όλους τους τύπους, τα επίπεδα και τους συνδυασμούς της διαφοροποίησης των έμβιων όντων στη φύση.

Η κλιματική αλλαγή συγκαταλέγεται στα κυριότερα άμεσα αίτια απώλειας της βιοποικιλότητας, όπως και αλλαγών στις υπηρεσίες των οικοσυστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο (Millennium Assessment, 2005). Σε πανευρωπαϊκή κλίμακα, σύμφωνα με την Τέταρτη Αξιολόγηση για το Περιβάλλον του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (2007), η κλιματική αλλαγή όλο και περισσότερο αναγνωρίζεται ως σοβαρή απειλή, ιδίως σε ό,τι αφορά τα παράκτια, αλπικά και αρκτικά είδη και ενδιαιτήματα. Το Διακυβερνητικό Σώμα για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), στην τέταρτη έκθεσή του, συμπέρανε ότι η κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικές επιπτώσεις για πολλές από τις επιμέρους συνιστώσες της βιολογικής ποικιλότητας: τα οικοσυστήματα, τα είδη, τη γενετική ποικιλότητα εντός των ειδών, όπως και τις οικολογικές αλληλεπιδράσεις.

Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στη βιοποικιλότητα είναι πολύπλευρες. Η βιοποικιλότητα μπορεί να επηρεάζεται από έναν συνδυασμό είτε άμεσων επιπτώσεων στους οργανισμούς (για παράδειγμα, η θερμοκρασία επηρεάζει τα ποσοστά επιβίωσης, την αναπαραγωγική επιτυχία, τα πρότυπα διασποράς και συμπεριφοράς), είτε επιπτώσεων μέσω βιοτικών αλληλεπιδράσεων (π.χ. παραχώρηση ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος) είτε ακόμα και επιπτώσεων μέσω μεταβολής των αβιοτικών παραγόντων (π.χ. κατάκλυση με νερό, μεταβολές ωκεάνιων ρευμάτων). Ωστόσο, η κλιματική αλλαγή δεν είναι η μόνη πίεση (forcing) που επιδρά στη βιοποικιλότητα, ενώ τα αποτελέσματά της εξαρτώνται και από τις αλληλεπιδράσεις με άλλες πιέσεις, όπως η αλλαγή των χρήσεων γης και η απώλεια ενδιαιτημάτων (Millennium Assessment, 2005), που μειώνουν την ικανότητα των οργανισμών να μεταποτίσουν την εξάπλωσή τους ως αντίδραση στην κλιματική αλλαγή.

Στο σημείο αυτό να υπογραμμιστεί ότι η Νότια Ευρώπη βιώνει ήδη εξαιρετικά ξηρές καιρικές συνθήκες, όπου οι βροχοπτώσεις έχουν μειωθεί έως και 20% κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα (EEA, 2010). Μάλιστα, τα μεσογειακά οικοσυστήματα συγκαταλέγονται μεταξύ των πλέον ευάλωτων στην Ευρώπη, αφού βρίσκονται κοντά στα περιβαλλοντικά τους όρια. Αντίστοιχα, και η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις πλέον ευάλωτες περιοχές της Ευρώπης λόγω αφενός της αύξησης των θερμοκρασιών και αφετέρου της μείωσης των βροχοπτώσεων σε περιοχές στις οποίες ήδη παρατηρείται λειψυδρία, καθώς και λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας κατά μήκος της μεγάλης παράκτιας ζώνης της.

Για τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στα είδη, αναμένονται διαφορές σε ό,τι αφορά τις αντιδράσεις τους στις κλιματικές μεταβολές και μεταβολή της εξάπλωσης πολλών από αυτά στην Ευρώπη. Στο πλαίσιο ειδικής έρευνας, προσομοιώθηκε η εξάπλωση για 1350 είδη φυτών της Ευρώπης κάτω από επτά διαφορετικά σενάρια αλλαγής του κλίματος (EMEKA, 2011a). Περισσότερα από τα μισά είδη που μελετήθηκαν αναμένεται να περιέλθουν στην κατηγορία των τρωτών ή απειλούμενων το έτος 2080. Ωστόσο, οι εκτιμήσεις φαίνεται να διαφέρουν πολύ τόσο μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων αλλαγής του κλίματος όσο και μεταξύ των διαφορετικών περιοχών. Στη Νότια Ευρώπη, σε περιοχές της Ιβηρικής Χερσονήσου, στην Ιταλία και στην Ελλάδα αναμένονται μειώσεις της αφθονίας των ειδών, ενώ η εξάπλωσή τους θα εξαρτηθεί και από τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων ενδιαιτημάτων. Τα ενδημικά φυτά και σπονδυλωτά της Μεσογείου φαίνεται ότι είναι ιδιαίτερος εύλωτα στις κλιματικές αλλαγές. Κάτω από συνθήκες μηδενικής δυνατότητας μετανάστευσης, τα περισσότερα αμφίβια και ερπετά στη Νοτιοδυτική Ευρώπη αναμένεται να αντιμετωπίσουν σημαντική απώλεια του εύρους εξάπλωσής τους.

6.3.7 Μεταφορές και δομημένο περιβάλλον

Οι μελέτες των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο δομημένο περιβάλλον, δηλαδή κάθε κατασκευής που είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης προσπάθειας (κτίρια, παροχές, μεταφορές, δημόσιοι χώροι κ.α.), επικεντρώνονται κυρίως στην περίπτωση των αστικών κέντρων. Ο λόγος είναι διττός. Πρώτον, γιατί ο κύριος όγκος των στοιχείων του δομημένου περιβάλλοντος συγκεντρώνεται στα αστικά κέντρα και η συγκέντρωση δύναται να αυξήσει εκθετικά τα προβλήματα, με αποτέλεσμα το φαινόμενο να είναι πιο έντονο στις μεγάλες πόλεις. Δεύτερον, γιατί εκτιμάται ότι η πλειοψηφία του παγκόσμιου πληθυσμού θα συγκεντρωθεί σε αστικά κέντρα.

Η κλιματική αλλαγή θα αλλάξει δραστικά ένα σύνολο περιβαλλοντικών και κλιματικών παραγόντων, η αλλαγή των οποίων αναμένεται να έχει φυσικές επιπτώσεις σε ένα σύνολο στοιχείων που αφορούν στην ανθρώπινη διαβίωση (π.χ. καταστροφές στο δομημένο περιβάλλον, πρόσθετο λειτουργικό κόστος σε παραγωγικούς τομείς, απώλειες ως προς την επιχειρηματική δραστηριότητα, διακοπές παροχής υπηρεσιών, κ.ά.). Σε αρκετές περιπτώσεις, η κλιματική αλλαγή μπορεί να επηρεάσει και την ανθρώπινη ευημερία (π.χ. θερμική άνεση νοικοκυριών, χειροτέρευση παραγόντων υγείας και διαβίωσης, μείωση ανθρώπινης ευημερίας, κ.ά.).

Στον τομέα των μεταφορών ειδικά οι άμεσες φυσικές επιπτώσεις του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής στις μεταφορές εντοπίζονται στις ακόλουθες τρεις κύριες κατηγορίες:

1. επιπτώσεις στις υποδομές μεταφορών λόγω:

- a. ανακατασκευών και επιδιορθώσεων των φθορών που προκλήθηκαν από τις φυσικές καταστροφές
- b. υλοποίησης έργων προληπτικής προστασίας των υφιστάμενων υποδομών μεταφορών

2. επιπτώσεις στη συντήρηση των υποδομών μεταφορών
3. επιπτώσεις από τις αλλαγές στη λειτουργία και αξιοπιστία του συστήματος λόγω π.χ. καθυστερήσεων και άλλων αλλαγών σε δρομολόγια και υπηρεσίες.

Με δεδομένα από τη μελέτη σεναρίων κλιματικής αλλαγής, όπου προβλέπεται άνοδος της στάθμης της θάλασσας κατά 40 έως 50 εκατοστά περίπου, είναι σαφές ότι σημαντικό τμήμα των υποδομών μεταφορών βρίσκεται στο πρώτο μέτωπο κινδύνου από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, ενώ η λειτουργία των λιμένων επηρεάζεται άμεσα από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, γεγονός που έχει άμεση επίδραση στη λειτουργία του συστήματος θαλάσσιων μεταφορών των χωρών, η ύπαρξη και η εύρυθμη λειτουργία του οποίου αποτελούν τον πιο ουσιώδη παράγοντα διασφάλισης της συνέχειας και συνοχής του μεταφορικού τους δικτύου, καθώς και σημαντικό τμήμα της οικονομίας γενικά (εισαγωγές, εξαγωγές) και ειδικά της τουριστικής ανάπτυξης.

6.3.8 Υγεία

Το κλίμα και οι καιρικές συνθήκες αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Αυτό σημαίνει ότι η εμφάνιση της κλιματικής αλλαγής, που παρατηρείται παγκοσμίως, συνοδεύεται και από μεταβολές που σχετίζονται με την υγεία και την ευημερία των πληθυσμών. Σε αντίθεση με άλλες επιδράσεις, πρόκειται για μια υπολογίσιμη επίδραση, στην οποία συχνά δεν αποδίδεται η απαραίτητη προσοχή, αφού οι περισσότεροι θεωρούν ότι η υγεία εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη συμπεριφορά, όπως διατροφικές συνήθειες και άσκηση, την κληρονομικότητα και την πρόσβαση και παροχή σε υπηρεσίες υγείας.

Ιατροί και επιστήμονες (βιολόγοι, επιδημιολόγοι, περιβαλλοντολόγοι κ.α.) πιστεύουν ότι οι κλιματικές αλλαγές, που παρατηρούνται, έχουν ήδη καθορίσει ορισμένα επιδημιολογικά δεδομένα σε παγκόσμια κλίμακα. Για παράδειγμα, η ετήσια έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Υγείας για το 2002 αναφέρει ότι η κλιματική αλλαγή ευθύνεται για περίπου το 2,4% των κρουσμάτων διάρροιας παγκοσμίως, καθώς και για το 6% των κρουσμάτων ελονοσίας σε κάποιες αναπτυσσόμενες χώρες για το έτος 2000 (WHO, 2003). Η κλιματική αλλαγή επιδρά σε πολλές συνιστώσες της ανθρώπινης υγείας και για αυτό οι επιπτώσεις της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής στην υγεία έχουν ανακύψει ως ένα μείζον ζήτημα, που αφορά όχι μόνο θεωρητικά την ιατρική και την περιβαλλοντολογική επιστήμη, αλλά φανερώνει την επιτακτική ανάγκη για χάραξη κατάλληλης κοινωνικό-οικονομικής πολιτικής.

Το αποκορύφωμα των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στην υγεία, αφορά την ακεραιότητα του ίδιου του ανθρώπου. Η έκθεση της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία των Ευρωπαίων πολιτών επισημαίνει ότι η άνοδος της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό αναμένεται να επιφέρει αύξηση της θνησιμότητας κατά 1% έως 4%. Αυτό σημαίνει ότι η θνησιμότητα που οφείλεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 30000 θανάτους ετησίως έως τη δεκαετία του 2030 και κατά 50000 έως 110000 θανάτους ετησίως έως τη δεκαετία του 2080.

Η κλιματική αλλαγή μπορεί να επηρεάζει τον ανθρώπινο οργανισμό με άμεσο και έμμεσο τρόπο. Η άμεση έκθεση του ανθρώπου στις κλιματικές αλλαγές πραγματοποιείται λόγω των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και τα συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα. Η έμμεση έκθεση του οφείλεται στη χαμηλότερη ποιότητα του πόσιμου ύδατος και των μετεωρολογικών συνθηκών, καθώς και στις μεταβολές του οικοσυστήματος, της γεωργίας, της βιομηχανίας, των οικισμών και της οικονομίας. Κατά συνέπεια, η κλιματική αλλαγή συνδέεται παγκοσμίως και με ήδη υπάρχουσες ασθένειες, αλλά μπορεί να οδηγήσει και σε πρόωρους θανάτους από συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (WHO, 2003), οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία μπορούν ενδεικτικά να ενταχθούν στις εξής τρεις κατηγορίες:

1. Άμεσες επιπτώσεις, που συνήθως προκαλούνται από ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ. θάνατοι από καύσωνες).
2. Έμμεσες επιπτώσεις, οι οποίες προκαλούνται ως συνέπεια περιβαλλοντικών αλλαγών και οικολογικών διαταραχών που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή (π.χ. αυξανόμενη απειλή από ασθένειες που μεταφέρονται από τα κουνούπια ή τα τρωκτικά).
3. Διάφορες επιπτώσεις που προκαλούνται σε πληθυσμούς που πλήττονται από την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και από οικονομικά προβλήματα λόγω της κλιματικής αλλαγής (π.χ. διατροφικά ή ακόμα και ψυχολογικά προβλήματα).

Το κεντρικό συμπέρασμα των μελετών που έχουν εκπονηθεί σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία σε παγκόσμια κλίμακα είναι ότι η κλιματική αλλαγή μπορεί να προκαλέσει, μεταξύ άλλων (WHO, 2003):

1. αυξημένη θνησιμότητα λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, αλλά και συγχρόνως μειωμένη θνησιμότητα στις λιγότερες θερμές χώρες για τον ίδιο λόγο
2. μεγαλύτερη συχνότητα επιδημιών μεταδοτικών ασθενειών λόγω πλημμυρών και ακραίων καιρικών φαινομένων
3. υπολογίσιμες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία λόγω της μετακίνησης πληθυσμών εξαιτίας της αύξησης της στάθμης των θαλασσών και της αυξημένης συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων.

Οι υγειονομικές αρχές στις Ηνωμένες Πολιτείες διακρίνουν επίσημα 11 κατηγορίες αυξημένων περιπτώσεων ασθενειών που μπορούν να συνδέσουν την ανθρωπογενή συνιστώσα της κλιματικής αλλαγής με την υγεία (CDC, 2009):

1. άσθμα, αναπνευστικές αλλεργίες και ασθένειες από τον ατμοσφαιρικό αέρα,
2. νεοπλάσματα,
3. καρδιοαναπνευστικά προβλήματα και εμφράγματα,
4. τροφιμογενείς ασθένειες και λοιμώξεις,
5. νοσηρότητα και θνησιμότητα από τη ζέστη,
6. επιπλοκές στην ανθρώπινη ανάπτυξη,
7. βλάβες της ψυχικής υγείας και διαταραχές άγχους,
8. νευρολογικές διαταραχές,
9. ασθένειες που προκαλούνται από φορείς,
10. ασθένειες που προκαλούνται από το νερό και
11. νοσηρότητα και θνησιμότητα εξαιτίας των καιρικών συνθηκών (ακραία καιρικά φαινόμενα).

Οι πλέον ευάλωτες ομάδες λόγω της κλιματικής αλλαγής θα είναι κυρίως ηλικιωμένοι, παιδιά, άτομα που αντιμετωπίζουν χρόνια προβλήματα υγείας και βρίσκονται υπό συνεχή ιατρική παρακολούθηση, φτωχοί με προβληματική διατροφή ή και υποσιτισμό που κατοικούν σε περιοχές χαμηλού εισοδήματος με δύσκολη πρόσβαση στις υπηρεσίες υγείας, κάτοικοι νησιωτικών και ορεινών περιοχών όπου παρατηρείται λειψυδρία και δυσχέρεια εξεύρεσης υγιεινής τροφής και μετανάστες που βρίσκονται σε κοινωνικό αποκλεισμό από την αγορά εργασίας και τις κοινωνικές και υγειονομικές υπηρεσίες.

6.4 Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC)

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) είναι ένας επιστημονικός διακυβερνητικός οργανισμός, που έχει συσταθεί κατόπιν αιτήσεως των κυβερνήσεων των κρατών μελών. Ιδρύθηκε το 1988 από δύο οργανώσεις των Ηνωμένων Εθνών, τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών (UNEP), η οποία αργότερα επικυρώθηκε από την Γενική Συνέλευση του ΟΗΕ με ψήφισμα 43/53. Ο σκοπός της επιτροπής είναι να παρέχει ολοκληρωμένη αξιολόγηση της τρέχουσας επιστημονικής γνωστικής βάσης, των ερευνών και των τεχνικών και κοινωνικό-οικονομικών πληροφοριών σε όλο τον κόσμο για τη μελέτη της επικινδυνότητας των κλιματικών αλλαγών, καθώς και τις συνέπειες των κλιματικών μεταβολών που προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα, μελετώντας πιθανές περιβαλλοντικές και κοινωνικό-οικονομικές συνέπειες, αλλά και πιθανές επιλογές για την προσαρμογή σε αυτές τις συνέπειες και δράσεις για την αντιμετώπιση και τον μετριασμό των ενδεχόμενων κινδύνων.

Χιλιάδες επιστήμονες και άλλοι εμπειρογνώμονες συμβάλλουν εθελοντικά για τη σύνταξη και την αναθεώρηση των εκθέσεων, οι οποίες εξετάζονται από τους εκπροσώπους όλων των κυβερνήσεων. Η σύνοψη της αξιολογητικής έκθεσης (Summary for policymakers - SPM) υπόκειται σε έγκριση και επικύρωση όλων των σημείων από όλες τις συμμετέχουσες κυβερνήσεις, που συνήθως περιλαμβάνει τις κυβερνήσεις περισσότερων από 120 χωρών.

Η επιτροπή IPCC δεν διενεργεί δικές του πρωτότυπες μελέτες, ούτε ασχολείται με την παρακολούθηση του κλίματος ή των σχετικών φαινομένων. Η κύρια δραστηριότητα της IPCC είναι να δημοσιεύει ειδικές εκθέσεις για θέματα που σχετίζονται με την εφαρμογή του πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC), μια διεθνής συνθήκη που αναγνωρίζει τη δυνατότητα των επιβλαβών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής. Η εφαρμογή της UNFCCC οδήγησε τελικά στο πρωτόκολλο του Κιότο. Η IPCC στηρίζει την εκτίμησή της, κυρίως σε έγκυρη αξιολόγηση και δημοσιευμένη επιστημονική βιβλιογραφία.

Η IPCC παρέχει μια διεθνώς αποδεκτή αρχή για την κλιματική αλλαγή, που παράγει εκθέσεις που έχουν τη σύμφωνη γνώμη όλων των κορυφαίων κλιματολόγων επιστημόνων και τη συναίνεση της κάθε μίας από τις συμμετέχουσες κυβερνήσεις. Έχει προσφέρει με επιτυχία έγκυρες συμβουλές πολιτικής με εκτεταμένες συνέπειες για την οικονομία και τον τρόπο ζωής. Στα πλαίσια των διαρκώς αντικρουόμενων συμφερόντων των ορυκτών καυσίμων, οι κυβερνήσεις καθυστέρησαν την εφαρμογή των συμβουλών αυτών.

Η επιτροπή έχει δημοσιεύσει μέχρι σήμερα τέσσερις εκθέσεις, το 1990, 1995, 2001 και 2007 αντίστοιχα. Η έκθεση του 2001, κατέληγε στα εξής βασικά συμπεράσματα, όπως αυτά προέκυψαν από την εξέταση των πιο πρόσφατων ερευνών σχετικά με τις κλιματικές μεταβολές:

Ένας αυξανόμενος αριθμός παρατηρήσεων επιβεβαιώνουν μία παγκόσμια θέρμανση καθώς και άλλες μεταβολές στο κλίμα. Η μέση επιφανειακή θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί περίπου κατά 0.6°C στον 20^ο αιώνα, η κάλυψη των πάγων έχει μειωθεί, ενώ η μέση στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί. Ορισμένοι σημαντικοί κλιματικοί παράγοντες, όπως η συχνότητα ανεμοστρόβιλων ή χαλαζόπτωσης και η θερμοκρασία περιοχών του βόρειου ημισφαιρίου και της Ανταρκτικής, δεν έχουν σημειώσει αξιοσημείωτες μεταβολές.

1. Η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες μεταβάλλει την ατμόσφαιρα της Γης, με τέτοιο τρόπο ώστε να αναμένονται αλλαγές στο κλίμα.
2. Η αξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων και των προβλέψεών τους έχει αυξηθεί.

3. Υπάρχουν ολοένα ισχυρότερες ενδείξεις πως η παγκόσμια θέρμανση των τελευταίων πενήντα ετών οφείλεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες.
4. Η ανθρώπινη παρέμβαση θα συνεχίσει να μεταβάλλει τη σύνθεση της ατμόσφαιρας στη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα.
5. Η παγκόσμια μέση θερμοκρασία και στάθμη της θάλασσας αναμένεται να αυξηθούν στο μέλλον. Η πρόβλεψη αυτή είναι κοινή για διαφορετικές εκδοχές που εξετάστηκαν αναφορικά με την μελλοντική οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των χωρών.

Η τέταρτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC εκδόθηκε το 2007 και επιβεβαίωσε τις κυριότερες διαπιστώσεις της τρίτης έκθεσης του 2001, στις οποίες προστέθηκαν νέες γνώσεις που προήλθαν από νέες παρατηρήσεις και βελτιωμένα κλιματικά μοντέλα. Μία μειοψηφία των εμπλεκόμενων επιστημόνων έχει διαφωνήσει με ορισμένες πτυχές των πορισμάτων της επιτροπής, κυρίως σε ότι αφορά τις μελλοντικές προβλέψεις για την εξέλιξη των κλιματικών μεταβολών. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η Τέταρτη έκθεση, τα σενάρια και δεδομένα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν τελικά στην διπλωματική αυτή, αλλά και η Πέμπτη έκθεση που πραγματοποιήθηκε το 2012 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2014.

6.4.1 Τέταρτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (2007)

Η Τέταρτη έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (Fourth Assessment Report, AR4, ή Climate Change 2007) είναι η τέταρτη στη σειρά εκθέσεων που αξιολογεί τις επιστημονικές, τεχνικές και κοινωνικό-οικονομικές πληροφορίες σχετικά με την αλλαγή του κλίματος, τις πιθανές επιπτώσεις της, καθώς και επιλογές για την προσαρμογή και τον μετριασμό. Η έκθεση ολοκληρώθηκε το 2007 και είναι η μεγαλύτερη και πιο λεπτομερή σύνοψη της κατάστασης της αλλαγής του κλίματος που έχει αναληφθεί ποτέ, που παράγεται από χιλιάδες συγγραφείς, εκδότες και σχολιαστές από δεκάδες χώρες, παραθέτοντας πάνω από 6000 ομότιμες επιστημονικές μελέτες. Αποτελείται από τρεις τόμους που περιλαμβάνουν τα πορίσματα ισάριθμων ομάδων εργασίας, καθώς και από μία αναφορά που συνθέτει τα συμπεράσματα των αξιολογητικών εκθέσεων.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της έκθεσης ήταν: «η υπερθέρμανση του κλιματικού συστήματος είναι αδιαμφισβήτητη», και «το μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης αύξησης της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, είναι πολύ πιθανό να οφείλεται στην παρατηρηθείσα αύξηση των ανθρωπογενών συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου». Η έκθεση κυκλοφόρησε σε τέσσερις κύριες ενότητες:

1. Έκθεση 1^{ης} Ομάδας εργασίας (WGI): «Climate Change 2007: The Physical Science Basis». Περιέχει τα επιστημονικά δεδομένα της κλιματικής αλλαγής και σύνδεση της με ανθρώπινες δραστηριότητες.
2. Έκθεση 2^{ης} Ομάδας Εργασίας (WGII): «Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability». Περιγράφει τις επιπτώσεις που αναμένεται ότι θα σημειωθούν στο φυσικό περιβάλλον και τις ανθρώπινες κοινωνίες, εκτιμώντας επίσης σε ποιο βαθμό τα μέτρα πρόληψης και προσαρμογής θα καταφέρουν να τις μειώσουν.
3. Έκθεση 3^{ης} Ομάδας Εργασίας (WGIII): «Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change». Εξετάζεται η δυνατότητα πρόληψης καταστροφών και μετριασμού του φαινομένου της υπερθέρμανσης, με εκτίμηση του σχετικού οικονομικού κόστους τους.
4. Έκθεση 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} Ομάδας Εργασίας: «The Synthesis Report (SYR)». Αναφορά που συνθέτει τα συμπεράσματα των παραπάνω αξιολογητικών εκθέσεων.

Κάθε τμήμα της έκθεσης περιλαμβάνει επίσης μία συνοπτική έκδοση (Summary for Policymakers). Η τέταρτη αξιολόγηση της IPCC επιβεβαίωσε τις κυριότερες διαπιστώσεις

της τρίτης έκθεσης (TAR) του 2001, στις οποίες προστέθηκαν νέες γνώσεις που προήλθαν από νέες παρατηρήσεις και βελτιωμένα κλιματικά μοντέλα.

1^η Ομάδα Εργασίας (WGI)

Η πλήρης έκθεση της πρώτης ομάδας εργασίας δημοσιεύτηκε το Μάρτιο του 2007, ενώ η πιο πρόσφατη αναθεωρημένη έκδοση της δημοσιεύτηκε τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους. Η σύνοψη της αξιολογητικής έκθεσης (SPM), στην τελική μορφή της, εκδόθηκε στις 5 Φεβρουαρίου 2007. Η πλήρης έκθεση περιέχει μία εκτεταμένη αξιολόγηση των επιστημονικών δεδομένων σχετικά με τις παρατηρούμενες αλλαγές στο κλίμα, την απόδοσή τους σε συγκεκριμένα αίτια - φυσικά ή ανθρωπογενή - καθώς και εκτιμήσεις για μελλοντικές αλλαγές. Η έκθεση, για την ολοκλήρωση της οποίας συμμετείχαν 676 συγγραφείς από 40 χώρες, υποβλήθηκε σε έλεγχο από περισσότερους από 620 ειδικούς και κυβερνήσεις. Πριν την οριστική έγκρισή της, αξιολογήθηκε από κυβερνητικούς εκπροσώπους 113 κρατών, κατά τη διάρκεια της 10ης σύσκεψης της πρώτης ομάδας εργασίας της IPCC που διεξήχθη στο Παρίσι (29 Ιανουαρίου-1 Φεβρουαρίου 2007).

Η Τέταρτη έκθεση της 1^{ης} Ομάδας επισήμανε αρκετές παρατηρούμενες αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες της Γης, μεταξύ των οποίων αλλαγές στη σύνθεση της ατμόσφαιρας, στη μέση παγκόσμια θερμοκρασία και στις συνθήκες των ωκεανών. Οι κυριότερες διαπιστώσεις που έκαναν ήταν ότι τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου και του οξειδίου του αζώτου έχουν αυξηθεί σημαντικά από το 1750, ως συνέπεια της ανθρώπινης δραστηριότητας. Πιο συγκεκριμένα, τα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου στην ατμόσφαιρα το 2005 υπερβαίνουν κατά πολύ το φυσικό όριο των τελευταίων εξακοσίων χιλιάδων ετών (379 ppm για το CO₂, με όρια τα 180-300 ppm, και 1774 ppb για το CH₄, με όρια τα 320-790 ppb). Η κυριότερη πηγή αύξησης των εκπομπών αυτών οφείλεται στη χρήση ορυκτών καυσίμων και ειδικά για το μεθάνιο ο συνδυασμός χρήσης των ορυκτών καυσίμων με τις ανθρώπινες γεωργικές δραστηριότητες έχει πιθανότατα οδηγήσει σε αυτά τα υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης. Τέλος, αύξηση έχουν παρατηρηθεί και στις τιμές συγκέντρωσης του οξειδίου του αζώτου το 2005 (319 ppb από 270 ppb), ενώ περισσότερο από 30% της αύξησης αυτής οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και κυρίως στη γεωργία.

Επιπρόσθετα, τα τελευταία πενήντα χρόνια έχουν παρατηρηθεί εκτεταμένες αλλαγές στις ακραίες θερμοκρασίες, με πιο συχνές θερμές νύχτες και ημέρες ή φαινόμενα καύσωνα και σπανιότερα κύματα ψύχους. Ειδικότερα, κατά την περίοδο 1995-2006 σημειώθηκαν τα έντεκα θερμότερα έτη από τα συνολικά δώδεκα των τελευταίων 150 ετών περίπου (1850-2006). Μάλιστα, η παγκόσμια θερμοκρασία υπολογίζεται ότι αυξήθηκε κατά 0.74°C, από το 1906 έως το 2005, ενώ για την Αρκτική ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας φαίνεται διπλασιασμένος. Γενικότερα, μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζεται στο βόρειο ημισφαίριο, που για το δεύτερο μισό το 20^{ου} αιώνα είναι μεγαλύτερες από οποιαδήποτε άλλη πενηνταετία των τελευταίων 500 ή πιθανότατα και των τελευταίων 1300 ετών. Επίσης, από παρατηρήσεις από το 1961, οι ωκεανοί απορροφούν ποσοστό μεγαλύτερο από το 80% της θερμότητας που προστίθεται και οι θερμοκρασίες τους έχουν αυξηθεί σε βάθος τουλάχιστον τριών χιλιομέτρων, με καταστροφικές συνέπειες στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Την περίοδο 1961-2003 η στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί κατά μέσο όρο με ρυθμό 1.8 mm ανά έτος, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για τη δεκαετία 1993-2003 είναι της τάξης του 3.1 mm/έτος.

Προβλέψεις για μελλοντικές κλιματικές συνθήκες βασίζονται σε υπολογιστικά κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης και την υιοθέτηση διαφορετικών εκτιμήσεων για το μέλλον, σε ότι αφορά τα επίπεδα εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με την έκθεση, προβλέπεται θέρμανση του πλανήτη κατά 0.2°C ανά δεκαετία, για ένα ευρύ φάσμα των διαφορετικών σεναρίων, ενώ υποθέτοντας πως τα επίπεδα συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου

παραμένουν ίδια με εκείνα του 2000, αναμένεται επίσης αύξηση, κατά 0.1°C ανά δεκαετία. Προβλέπεται, επίσης, ότι η αύξηση της στάθμης της θάλασσας θα είναι σύμφωνα με την πιο συντηρητική εκτίμηση 18-38 cm ή 26-59 cm σύμφωνα με το πλέον απαισιόδοξο σενάριο για τα μελλοντικά επίπεδα εκπομπής αερίων, σε βάθος χρόνου 100 ετών.

2^η Ομάδα Εργασίας (WGII)

Η σύνοψη της έκθεσης αξιολόγησης (SPM) της δεύτερης ομάδας εργασίας της IPCC δημοσιεύτηκε στις 6 Απριλίου 2007, ενώ η πλήρης έκθεση εκδόθηκε τον ίδιο χρόνο, στις 18 Σεπτεμβρίου. Στην έκθεση αυτή περιγράφονται μεταξύ των άλλων οι επιπτώσεις που αναμένεται ότι θα σημειωθούν στο φυσικό περιβάλλον και τις ανθρώπινες κοινωνίες εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, εκτιμώντας ότι σύμφωνα με ενδείξεις από όλες τις ηπείρους και τους περισσότερους ωκεανούς της Γης, πολλά οικοσυστήματα επηρεάζονται από τοπικές κλιματικές μεταβολές και ειδικότερα από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα πορίσματα της δεύτερης ομάδας εργασίας, υποδεικνύουν ότι η πρόσφατη αλλαγή του κλίματος έχει ήδη ισχυρές επιδράσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, τόσο στα οικοσυστήματα, όσο στους υδάτινους πόρους και στις παράκτιες περιοχές. Με βάση καταγεγραμμένες ενδείξεις από το 1970, η πιθανότητα η ανθρωπογενής θέρμανση να έχει μέχρι σήμερα αισθητή επίδραση σε πολλά φυσικά και βιολογικά συστήματα, είναι μεγαλύτερη του 66%.

Μέχρι τα μέσα του 21ου αιώνα η μέση ετήσια απορροή των ποταμών και η διαθεσιμότητα νερού εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 10-40% στα υψηλότερα υψόμετρα και σε ορισμένες τροπικές περιοχές, ενώ θα μειωθεί κατά 10-30% σε ξηρές περιοχές σε μέσο υψόμετρο. Η εκτίμηση αυτή ορίζεται για επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 80%. Ο αριθμός των άνυδρων περιοχών αναμένεται να αυξηθεί, όπως και ο κίνδυνος πλημμυρικών γεγονότων. Η ικανότητα προσαρμογής πολλών οικοσυστημάτων στις αλλαγές αυτές ενδέχεται να ξεπεραστεί στη διάρκεια του 21ου αιώνα, εξαιτίας του συνδυασμού της κλιματικής αλλαγής και άλλων σχετικών φαινομένων (πλημμύρες, ξηρασίες, κ.λ.π.). Περίπου το 20-30% της γνωστής χλωρίδας και πανίδας είναι πιθανό να γνωρίσει αυξημένο κίνδυνο εξαφάνισης, εφόσον η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας ξεπεράσει τους 15-25°C. Οι παράκτιες περιοχές αναμένεται να αντιμετωπίσουν αυξημένο κίνδυνο εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, ενώ αρκετά εκατομμύρια ανθρώπων, που ζουν κοντά σε αυτές, εκτιμάται πως θα έρθουν αντιμέτωποι με πλημμύρες μέχρι το 2080.

3^η Ομάδα Εργασίας (WGIII)

Σύμφωνα με την έκθεση της τρίτης ομάδας εργασίας, αναλύονται οι δυνατότητες λήψης μέτρων περιορισμού της κλιματικής αλλαγής, προτείνοντας παράλληλα μελλοντικές βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες στρατηγικές για το μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Η σύνοψη της έκθεσης εκδόθηκε στις 4 Μαΐου 2007 κατά την 26^η διάσκεψη της επιτροπής, ενώ η πλήρης έκθεση δημοσιεύτηκε το Σεπτέμβριο του 2007. Το προσχέδιό της μελετήθηκε με τη συμμετοχή περισσότερων από 400 επιστημόνων και ειδικών από περίπου 120 χώρες. Για την έγκριση της τελικής πλήρους έκθεσης συμμετείχαν περισσότεροι από 2.000 εκπρόσωποι. Κεντρικό σημείο διαφωνιών υπήρξε μία πρόταση περιορισμού των συγκεντρώσεων των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου που επιτρέπεται να εκλύει στην ατμόσφαιρα κάθε κράτος σε 445-650 ppm για την αποφυγή «επικίνδυνης κλιματικής αλλαγής», όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στην έκθεση. Οι αναπτυσσόμενες χώρες επιθυμούσαν την αύξηση του κατώτερου προτεινόμενου ορίου. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της ομάδας εργασίας, η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου είναι δυνατή για ένα λογικό οικονομικό κόστος, με τη σταθεροποίηση των επιπέδων στα όρια 445-535 ppm, που κοστίζει λιγότερο από το 3% του παγκόσμιου ΑΕΠ.

Η σύνοψη της έκθεσης υπογραμμίζει την ευρεία συμφωνία των επιστημόνων και την παρουσία αρκετών ενδείξεων, πως υπάρχουν οικονομικές προοπτικές για το μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τις επόμενες δεκαετίες, έτσι ώστε να μετριαστεί η αυξητική τους πορεία ή ακόμα και να μειωθούν κάτω από τα επίπεδα στα οποία κυμαίνονταν το 2007, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα.

Στον τομέα της ενέργειας, η Διακυβερνητική Επιτροπή εκτιμά ότι οι ανανεώσιμες πηγές έχουν γενικά θετική συνεισφορά στην ενεργειακή ασφάλεια, στην απασχόληση και στην ποιότητα του αέρα. Μπορούν να παρέχουν το 30-35% της συνολικής παραγωγής ενέργειας μέχρι το 2030, συγκριτικά με το ποσοστό του 18% το 2005, ενώ η πυρηνική ενέργεια μπορεί να ανέλθει από το 16% στο 18%. Υπήρξε μεγάλος βαθμός ομοφωνίας και ισχυρά αποδεικτικά στοιχεία για τη δυνατότητα σταθεροποίησης της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου, η οποία σύμφωνα με την επιτροπή μπορεί να επιτευχθεί μέχρι το 2050, με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών και με την προϋπόθεση ότι θα δοθούν αποτελεσματικά κίνητρα για τη χρήση και ανάπτυξή τους. Τονίζεται ότι η κυβερνητική χρηματοδότηση για την έρευνα στον τομέα της ενέργειας υπήρξε στάσιμη ή πτωτική από το 1987 μέχρι το 2007. Εκτιμάται ότι καθυστερήσεις στη μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου είναι ικανές να οδηγήσουν σε υψηλότερα επίπεδα σταθεροποίησης και να αυξήσουν τον κίνδυνο σοβαρών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, καθώς θα αναπτύσσεται η χρήση των τεχνολογιών υψηλής εκπομπής των αερίων.

Μεταξύ των μέτρων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, είναι και αυτή της κοστολόγησης των εκπομπών. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι οι πολιτικές που βάζουν μια τιμή για το κόστος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα θα μπορούσε να δώσει κίνητρα για τους καταναλωτές και τους παραγωγούς. Μια αύξηση στις τιμές του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να συνέβαλε στην σταθεροποίηση των ορίων γύρω στα 550 ppm μέχρι το 2100.

Έκθεση Σύνθεσης (Synthesis Report)

Η συγκεφαλαιωτική έκθεση πηγαίνει ένα βήμα παραπέρα από τις τρεις πρώτες Εκθέσεις των ομάδων εργασίας. Είναι η αποφασιστική προσπάθεια για να ενσωματώσει και να συμπυκνώσει αυτόν τον πλούτο των πληροφοριών σε ένα ευανάγνωστο και συνοπτικό έγγραφο που επικεντρώνεται στις μεθόδους αξιολόγησης για την ανάλυση και την διαχείριση των πολιτικών της δημόσιας πολιτικής (Policymakers). Η «Έκθεση Σύνθεσης» αναφέρει επίσης σχετικά τμήματα που περιέχονται στην πλήρη Έκθεση Ομάδων Εργασίας, καθώς και αυτά που περιλαμβάνονται στις συνόψεις των τριών εκθέσεων. Έχει σχεδιαστεί για να είναι ένα ισχυρό, επιστημονικά έγκυρο έγγραφο μεγάλης πολιτικής σημασίας, η οποία αποτέλεσε σημαντική συμβολή στις συζητήσεις κατά την 13^η Συνδιάσκεψη των Μερών, που πραγματοποιήθηκε στο Μπαλί τον Δεκέμβριο του 2007. Στην πραγματικότητα, η Διάσκεψη αυτή αναβλήθηκε έως τον Δεκέμβριο για να έχει εκδοθεί πρώτα η «Έκθεση Σύνθεσης».

Τα έξι θέματα που τίγονται στην «Έκθεση Σύνθεσης» είναι τα εξής:

1. Παρατηρηθείσα αλλαγή στο κλίμα και οι επιπτώσεις της (WGI and WGII)
2. Αίτια της αλλαγής (WGI and WGIII)
3. Κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της σε άμεσο και μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα σύμφωνα με διάφορα σενάρια (WGI and WGIII)
4. Επιλογές και απαντήσεις προσαρμογής και μετριασμού, καθώς και η μεταξύ τους σχέση για αειφόρο ανάπτυξη σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο (WGI and WGIII)
5. Η μακροπρόθεσμη προοπτική: επιστημονικές και κοινωνικό-οικονομικές πτυχές που σχετίζονται με την προσαρμογή και τον μετριασμό, σύμφωνα με τους στόχους και τις

διατάξεις της Σύμβασης (UNFCCC) και στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης (WGI and WGIII)

6. Ακράδαντα ευρήματα, σημαντικές αβεβαιότητες (WGI, WGII and WGIII)

Ειδική Έκθεση για τα Σενάρια Εκπομπών (SRES)

Η Ειδική Έκθεση για τα Σενάρια Εκπομπών (SRES) είναι μια έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), που δημοσιεύθηκε το 2000. Τα σενάρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που περιγράφονται στην έκθεση έχουν χρησιμοποιηθεί για να κάνουν προβλέψεις για πιθανές μελλοντικές κλιματικές αλλαγές. Τα SRES σενάρια, όπως συχνά αποκαλούνται, χρησιμοποιήθηκαν στην Τρίτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (TAR), που δημοσιεύθηκε το 2001, και στην Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης (AR4), που δημοσιεύθηκε το 2007.

Τα σενάρια αυτά έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώσουν ορισμένες πτυχές των IS92 σεναρίων, τα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί στην προηγούμενη Δεύτερη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC το 1995. Τα σενάρια αυτά είναι " σενάρια αναφοράς", πράγμα που σημαίνει ότι δεν λαμβάνουν υπόψη όλα τα τρέχοντα ή μελλοντικά μέτρα για τον περιορισμό αερίων του θερμοκηπίου (GHG), όπως προβλέπει το Πρωτόκολλο του Κιότο.

Επειδή οι προβλέψεις για την αλλαγή του κλίματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την μελλοντική ανθρώπινη δραστηριότητα, τα κλιματικά μοντέλα εκτελούνται βάσει των σεναρίων. Στα πλαίσια της μελέτης των προβλεπόμενων ανθρωπογενών κλιματικών αλλαγών, βασικός παράγον των προσομοιώσεων του μελλοντικού κλίματος είναι η εξέλιξη των συγκεντρώσεων στην ατμόσφαιρα των αερίων του θερμοκηπίου GHG (CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, SF₆, HFCs, NO_x, CO, VOC, SO₂, BC, OC). Βεβαίως ο ρυθμός με τον οποίο θα εξελιχθούν στο μέλλον οι εκπομπές και κατά συνέπεια και οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα δεν μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς. Για το σκοπό αυτό, στα πλαίσια της τρίτης έκθεσης της διακυβερνητικής επιτροπής του Ο.Η.Ε για την κλιματική αλλαγή (2001) διαμορφώθηκαν από ειδική ομάδα επιστημόνων ένας μεγάλος αριθμός σεναρίων, συνολικά 40 σενάρια, σχετικών με τη μελλοντική εξέλιξη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (emission scenarios) (Nakićenović et al., 2000). Η διαμόρφωση των συγκεκριμένων σεναρίων στηρίχτηκε σε ορισμένους βασικούς άξονες που σχετίζονται με την εξέλιξη του παγκόσμιου πληθυσμού, τις πολιτικές που θα ακολουθηθούν γύρω από θέματα ενέργειας, το ρυθμό της οικονομικής ανάπτυξης, τη μελλοντική τεχνολογική ανάπτυξη καθώς και το κατά πόσο οι αποφάσεις γύρω από οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα λαμβάνονται σε τοπικό ή διεθνές επίπεδο. Το καθένα κάνει διαφορετικές υποθέσεις για το μέλλον της ρύπανσης των αερίων του θερμοκηπίου, τη χρήση της γης και των άλλων κινητήριων δυνάμεων. Ωστόσο, τα περισσότερα σενάρια περιλαμβάνουν την αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

Βάσει της βαρύτητας του κάθε ενός από τους παράγοντες που αναφέραμε, τα διάφορα σενάρια εκπομπών ταξινομήθηκαν σε έξι ομάδες σεναρίων, η καθεμία των οποίων περιλαμβάνει παρόμοια σενάρια εκπομπών. Σύμφωνα με την IPCC, όλα τα σενάρια αυτά θεωρούνται «ουδέτερα». Κανένα από τα σενάρια SRES δεν προβάλλει μελλοντικές καταστροφές, όπως πολέμους και συγκρούσεις ή και κατάρρευση του περιβάλλοντος. Τα σενάρια δεν περιγράφουν αντιπροσωπευτικές καλές ή κακές πορείες της μελλοντικής κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής: η οικογένεια σεναρίων A1 που χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες: τις A1F, A1B και A1T, η οικογένεια σεναρίων A2, η οικογένεια σεναρίων B1 και η οικογένεια σεναρίων B2. Η IPCC δεν ανέφερε ότι κανένα από τα σενάρια αυτά είχε περισσότερες πιθανότητες να συμβεί από τα υπόλοιπα και ως εκ τούτου κανένα από τα σενάρια αυτά δεν αντιπροσωπεύει την «καλύτερη εκτίμηση»

των μελλοντικών εκπομπών. Παρακάτω, αναφέρονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων σεναρίων, με τις περιγραφές του να βασίζονται σε εκείνες του AR4 (2007), οι οποίες είναι ταυτόσημες με εκείνες του TAR (2001):

Σενάριο A1: Ραγδαία οικονομική ανάπτυξη. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας, αλλά παράλληλα διάδοση νέων και αποδοτικών τεχνολογιών. Χρήση τόσο ορυκτών καυσίμων όσο και εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Μικρές αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 που θα φτάσει τα εννέα δισεκατομμύρια και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 720 ppm το 2100. Οι διαφοροποιήσεις των τριών υποκατηγοριών επικεντρώνονται στη χρήση των διαφορετικών ενεργειακών πόρων. Έτσι, έχουμε έμφαση στη καύση ορυκτών καυσίμων για το σενάριο A1F (εντατική χρήση ορυκτών), ομοιόμορφη χρήση όλων των ενεργειακών πόρων για το σενάριο A1B και έμφαση σε μη ορυκτούς ενεργειακούς πόρους για το σενάριο A1T.

Σενάριο A2: Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλή εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, που συνεχίζει να αυξάνεται. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 850 ppm το 2100. Γενικά, παρουσιάζεται μια εικόνα ενός διαιρεμένου κόσμου, που αποτελείται από αυτάρκη κράτη που λειτουργούν αυτόνομα, για αυτό το λόγο και η οικονομική ανάπτυξη είναι προσανατολισμένη σε περιφερειακό επίπεδο.

Σενάριο B1: Μεγάλη αύξηση του παγκόσμιου κατά κεφαλή εισοδήματος και προσανατολισμός στην οικονομία πληροφοριών και υπηρεσιών. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μείωση της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας και στροφή στη χρήση τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 (9 δισεκατομμύρια) και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια, όπως στο σενάριο A1. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα με ήπιους σχετικά ρυθμούς ιδιαίτερα από το 2050 και μετά η οποία θα φτάσει το 2100 τα 550 ppm. Έμφαση στις παγκόσμιες λύσεις για την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική σταθερότητα.

Σενάριο B2: Ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας με μέτριους ρυθμούς. Ηπιότερες τεχνολογικές αλλαγές σε σύγκριση με τα σενάρια εκπομπών A1 και B1. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, αλλά με ρυθμό μικρότερο από το σενάριο A2. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα με μέτριους αλλά σταθερούς ρυθμούς η οποία θα φτάσει το 2100 τα 620 ppm. Έμφαση στις τοπικές από παγκόσμιες λύσεις για την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική σταθερότητα. Γενικά, εικόνα ενός διαιρεμένου κόσμου με περιβαλλοντική συνείδηση.

Στον Πίνακα 6.1 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), του μεθανίου (CH₄) και του μονοξειδίου του αζώτου (N₂O) κατά τον 21ο αιώνα βάσει των προαναφερθέντων 4 σεναρίων εκπομπών. Για την οικογένεια σεναρίων A1 επιλέχτηκε συγκεκριμένα η υποκατηγορία A1B και με αυτή θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική.

Πίνακας 6.1: Χρονική εξέλιξη των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), του μεθανίου (CH₄) και του μονοξειδίου του αζώτου (N₂O) κατά τον 21ο αιώνα βάσει των σεναρίων εκπομπών A1B, A2, B1 και B2. (Πηγή ΕΜΕΚΑ, 2011b)

SRES ΕΤΟΣ	Εκπομπές CO ₂ (PgC/έτος)				Εκπομπές CH ₄ (Tg(CH ₄)/έτος)				Εκπομπές NO ₂ (TgN/έτος)			
	A1B	A2	B1	B2	A1B	A2	B1	B2	A1B	A2	B1	B2
2000	7.97	7.97	7.97	7.97	323	323	323	323	7	7	7	7
2010	10.88	9.58	9.28	8.78	373	370	349	349	7	8.1	7.5	6.2
2020	12.64	12.25	10.63	9.05	421	424	377	384	7.2	9.6	8.1	6.1
2030	14.48	14.72	11.11	9.9	466	486	385	426	7.3	10.7	8.2	6.1
2040	15.35	16.07	11.72	10.69	458	542	381	466	7.4	11.3	8.3	6.2
2050	16.38	17.43	11.29	11.01	452	598	359	504	7.4	12	8.3	6.3
2060	16	19.16	9.74	11.49	410	654	342	522	7.3	12.9	7.7	6.4
2070	15.73	20.89	8.18	11.62	373	711	324	544	7.2	13.9	7.4	6.6
2080	15.18	23.22	6.7	12.15	341	770	293	566	7.1	14.8	7	6.7
2090	14.3	26.15	5.32	12.79	314	829	266	579	7.1	15.7	6.4	6.8
2100	13.49	29.09	4.23	13.32	289	889	236	597	7	16.5	5.7	6.9

Επιπρόσθετα στο Παράρτημα Β των Σχημάτων, φαίνεται για 6 διαφορετικά σεσάρια εκπομπών η χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων των ίδιων αερίων ρύπων κατά τον 21ο αιώνα (Σχ.Β.6.α και β).

Ως αποτέλεσμα, οι προβλέψεις για τον 21^ο αιώνα, βάσει των παραπάνω σεναρίων, θα είναι οι εξής:

1. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια της γης εκτιμάται στους 1.8°C με πιθανό εύρος από 1.1 έως 2.9 °C για την καλύτερη εκτίμηση του πλέον «αισιόδοξου σεναρίου» (B1), ενώ εκτιμάται αύξηση της τάξης των 4.0 °C με πιθανό εύρος από 2.4 έως 6.4 °C για την καλύτερη εκτίμηση του πλέον «απαισιόδοξου σεναρίου» (A1F). Μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.1°C ανά δεκαετία, αναμένεται για τις επόμενες δύο δεκαετίες, ακόμη και αν οι συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου διατηρηθούν στα επίπεδα του 2000. Μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.2°C ανά δεκαετία προβάλλεται για τις επόμενες δύο δεκαετίες για όλα τα σεσάρια αυτά.
2. Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας εκτιμάται σύμφωνα με το «αισιόδοξο σεσάριο» της τάξης των 18-38 cm, ενώ για το πλέον «απαισιόδοξο σεσάριο» η αύξηση αυτή φτάνει από 26 έως 59 cm.
3. Είναι πολύ πιθανό ότι θα υπάρξει μια αύξηση στη συχνότητα των θερμών περιόδων, τα κύματα καύσωνα και τις εκδηλώσεις των ισχυρών βροχοπτώσεων.
4. Είναι πιθανό ότι θα υπάρξει μια αύξηση σε περιοχές που πλήττονται από την ξηρασία, την ένταση των τροπικών κυκλώνων (τα οποία περιλαμβάνουν θύελλες και τυφώνες) και την εμφάνιση ακραίων φαινομένων υψηλής παλίρροιας.

5. Ο θαλάσσιος πάγος αναμένεται να συρρικνωθεί τόσο στην Αρκτική όσο και την Ανταρκτική. Σε ορισμένες προβλέψεις μάλιστα, ο θαλάσσιος πάγος της Αρκτικής κατά το τέλος του καλοκαιριού εξαφανίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου προς το τέλος του 21ου αιώνα.

6.4.2 Πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (2012)

Η πέμπτη έκθεση αξιολόγησης (AR5) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), θα είναι η πέμπτη σε μια σειρά τέτοιων εκθέσεων. Η πέμπτη έκθεση αξιολόγησης είναι σε εξέλιξη και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2014. Όπως έχει συμβεί και στο παρελθόν, το περίγραμμα της AR5 θα αναπτυχθεί μέσα από μια διαδικασία οριοθέτησης του πεδίου εφαρμογής στην οποία συμμετείχαν εμπειρογνώμονες που ειδικεύονται στην αλλαγή του κλίματος από όλους τους σχετικούς κλάδους και ειδικούς αντιπροσώπους των κυβερνήσεων που διαχειρίζονται τις εκθέσεις της IPCC. Ως πρώτο βήμα, οι ειδικοί, οι κυβερνήσεις και οι οργανώσεις που συμμετέχουν στην Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης έχουν κληθεί να υποβάλουν τα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους γραπτώς. Αυτές οι παρατηρήσεις αναλύονται πρώτα από τα μέλη της επιτροπής, για να ληφθούν στην συνέχεια υπ' όψη.

Από τον Αύγουστο του 2011, η πέμπτη έκθεση αξιολόγησης (AR5) ήταν ήδη σε εξέλιξη. Θα αποτελείται από τρεις Εκθέσεις Ομάδων Εργασίας (Working Groups -WG) και μια συνθετική έκθεση, που θα ολοκληρωθούν το 2013 και το 2014. Αυτές θα είναι οι παρακάτω:

1. WG I: The Physical Science Basis – μέσα Σεπτεμβρίου 2013
2. WG II: Impacts, Adaptation and Vulnerability – μέσα Μαρτίου 2014
3. WG III: Mitigation of Climate Change – αρχές Απριλίου 2014
4. AR5 Synthesis Report (SYR) – Οκτώβριος 2014

Η AR5 θα παρέχει βελτιωμένα και ενημερωμένα γνωστικά πεδία σχετικά με τις επιστημονικές, τεχνικές και κοινωνικό-οικονομικές πτυχές της κλιματικής αλλαγής. Περισσότεροι από 800 συγγραφείς, που επιλέχθηκαν από περίπου 3000 υποψηφιότητες, εμπλέκονται στην σύνταξη της έκθεσης. Συναντήσεις των κύριων συγγραφέων και εργαστήρια και συσκέψεις εμπειρογνομώνων έχουν πραγματοποιηθεί για την υποστήριξη της διαδικασίας αξιολόγησης.

Σε σύγκριση με τις προηγούμενες εκθέσεις, η AR5 θα δώσει μεγαλύτερη έμφαση στην αξιολόγηση των κοινωνικό-οικονομικών πτυχών της αλλαγής του κλίματος και των επιπτώσεων για την αειφόρο ανάπτυξη, τη διαχείριση κινδύνων και τη διαμόρφωση μιας αντιμετώπισης μέσω της ταυτόχρονης προσαρμογής και μετριασμού. Νέα και βελτιωμένα σενάρια θα περιλαμβάνονται στην AR5 λαμβάνοντας υπόψη περισσότερο τις κοινωνικό-οικονομικές πτυχές και στηριζόμενα στα μοντέλα πρόβλεψης νέας γενιάς (Next Generation Earth System Models) «HadGEM2», που θα παράγουν εκατοντάδες terabytes και ίσως και δεκάδες petabytes (1petabyte=1000terabytes=10⁶gigabytes) που θα περιέχουν δεδομένα ανάλυσης των κλιματικών μοντέλων. Οι προσομοιώσεις του κλίματος για την υποστήριξη της AR5 θα χρησιμοποιήσουν μια διαφορετική προσέγγιση για την αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου από ότι στην προηγούμενη έκθεση. Αντί για τα σενάρια SRES τα μοντέλα αποδίδουν προσομοιώσεις για διάφορες πορείες αντιπροσωπευτικών συγκεντρώσεων (Representative Concentration Pathways – RCPs). Τα RCPs είναι τέσσερις τροχιές συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου (όχι εκπομπές). Αυτές είναι οι RCP2.6, RCP4.5, RCP6 και RCP8.5 και το όνομά τους προέρχεται από ένα δυνατό φάσμα τιμών ακτινοβολίας, που καλείται «radiative forcing» (η διαφορά μεταξύ ενέργειας ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη και την ενέργεια που ακτινοβολείται πίσω στο διάστημα) για το έτος 2100 (2.6, 4.5, 6.0, και 8.5 Watt/m², αντίστοιχα). Στο Σχήμα Β.7 του Παραρτήματος Σχημάτων απεικονίζεται το διάγραμμα του φάσματος των RCPs.

Μετά από ορισμένες ατέλειες και σφάλματα στην AR4 της IPCC το 2009, ο ΟΗΕ αποφάσισε να δημιουργήσει μια ομάδα επιστήμης που θα επανεξετάσει «το πως λειτουργεί η IPCC».

Αφού η έκθεση της 1^{ης} Ομάδας Εργασίας διέρρευσε το Δεκέμβριο του 2012, σκεπτικιστές που ασχολούνται με την αλλαγή του κλίματος εντόπισαν ένα τμήμα του προσχεδίου, που υποδηλώνει ότι οι κοσμικές ακτίνες έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση της θερμοκρασίας από ότι είχε προηγουμένως ισχυριστεί. Ωστόσο, ο καθηγητής Steve Sherwood, ο επικεφαλής συγγραφέας του εν λόγω κεφαλαίου, διέψευσε τις φήμες για τον μεγαλύτερο ρόλο της ηλιακής και άλλων κοσμικών ακτίνων στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Πάντως, τον Σεπτέμβριο του 2013 αναμένεται η έκθεση.

6.5 Κλιματικά Μοντέλα Πρόβλεψης

Τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν ποσοτικές μεθόδους για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ατμόσφαιρας, των ωκεανών, της επιφάνειας της γης, και του πάγου. Χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς από τη μελέτη της δυναμικής του κλιματικού συστήματος μέχρι τις προβλέψεις του μελλοντικού κλίματος. Η πιο πολυσυζητημένη χρήση των κλιματικών μοντέλων τα τελευταία χρόνια ήταν για την πρόβλεψη των μεταβολών της θερμοκρασίας που προκύπτουν από την αύξηση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου.

Τα κλιματικά μοντέλα είναι τα συστήματα των διαφορικών εξισώσεων που βασίζονται στους βασικούς νόμους της φυσικής, της κίνησης των ρευστών και τη χημεία. Για να "τρέξει" ένα μοντέλο, οι επιστήμονες χωρίζουν τον πλανήτη σε ένα 3-διαστάσεων κάρναβο, εφαρμόζουν τις βασικές εξισώσεις, και αξιολογούν τα αποτελέσματα. Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα υπολογίζουν τους ανέμους, τη μεταφορά θερμότητας, την ακτινοβολία, τη σχετική υγρασία και επιφανειακή υδρολογία μέσα σε κάθε «κουτί» του πλέγματος και αξιολογούν τις αλληλεπιδράσεις με τα γειτονικά σημεία.

Όλα τα κλιματικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την εισερχόμενη ενέργεια από τον ήλιο ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, κυρίως ορατής και βραχέων κυμάτων στο εγγύς υπέρυθρο, καθώς και την εξερχόμενη ενέργεια από τη γη ως μεγάλου μήκους κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο μακρό υπέρυθρο. Οποιαδήποτε ανισορροπία αποφέρει αλλαγή στη θερμοκρασία.

Τα μοντέλα μπορεί να είναι από απλά έως σύνθετα. Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Τα «μοντέλα κουτιού» (Box models), που είναι απλοποιημένες μορφές των πολύπλοκων συστημάτων, μειώνοντας τα συστήματα σε κουτιά (ή δεξαμενές) που συνδέονται με ροές.
2. Τα «μοντέλα μηδενικών διαστάσεων» (Zero-dimensional models), που είναι πολύ απλά μοντέλα που στηρίζονται στην εξίσωση που προσδίδει το ενεργειακό ισοζύγιο της γης, χρησιμοποιώντας την ηλιακή σταθερά και τη δοσμένη μέση θερμοκρασία της γης.
3. Τα «μοντέλα ακτινοβολίας-συναγωγής» (Radiative-convective models), που τελειοποιούν την λειτουργία των «μηδενικών διαστάσεων μοντέλων» χρησιμοποιώντας την κατακόρυφη διεύθυνση μεταφοράς ενέργειας με ένα μονοδιάστατο μοντέλο.
4. Τα «μοντέλα μεγαλύτερων διαστάσεων» (Higher-dimension models), που επεκτείνουν το «Zero-dimensional model» για να εξετάσουν την ενέργεια που μεταφέρεται οριζόντια στην ατμόσφαιρα.
5. Τα μοντέλα EMICs (Earth-system models of intermediate complexity), δηλαδή μοντέλα του γήινου συστήματος της ενδιάμεσης πολυπλοκότητας, που γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας και σε πιο επαγωγικά μοντέλα, όπως το

μοντέλο Climber-3 (το μοντέλο ατμόσφαιρας είναι 2.5 διαστάσεων στατιστικό-δυναμικό μοντέλο με $7.5^\circ \times 22.5^\circ$ ανάλυση και το μοντέλο του ωκεανού είναι κάρναβος χωρισμένος σε $3.75^\circ \times 3.75^\circ$ με 24 κάθετα επίπεδα).

6. Τα μοντέλα GCMs (global climate models or general circulation models), δηλαδή παγκόσμια κλιματικά μοντέλα ή μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, που είναι τετραδιάστατα μοντέλα (υπεισέρχεται και ο χρόνος) που χρησιμοποιούν τις εξισώσεις για την ρευστή κίνηση και τη μεταφορά ενέργειας με την πάροδο του χρόνου. Τα Ατμοσφαιρικά Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (AGCMs) προσομοιώνουν την ατμόσφαιρα και επιβάλλουν τις θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας ως οριακές συνθήκες. Τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (AOGCMs), όπως για παράδειγμα τα HadCM3, EdGCM, GFDL CM2.X, ARPEGE-Climat, συνδυάζουν τα δύο μοντέλα, ωκεάνια και ατμοσφαιρικά. Αντιπροσωπεύουν το αποκορύφωμα της πολυπλοκότητας των κλιματικών μοντέλων και μπορούν να συζητηθούν με μοντέλα άλλων διαδικασιών, όπως τον κύκλο του άνθρακα, ώστε το μοντέλο να παρέχει καλύτερα αποτελέσματα.

Στις παρακάτω υποενότητες θα αναλύσουμε τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας και συγκεκριμένα τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής στα σενάρια SRES, και ειδικές πιο εξειδικευμένες κατηγορίες αυτών χρησιμοποιήσαμε και εμείς σε αυτή τη διπλωματική. Επίσης, περιγράφεται συνοπτικά το Παγκόσμιο Κλιματικό Μοντέλο 3^{ης} Γενιάς που δημιουργήθηκε από το Καναδικό Κέντρο Κλιματικής Αλλαγής, για να δείξουμε περισσότερο τους λόγους που δεν χρησιμοποιήσαμε το συγκεκριμένο μοντέλο.

6.5.1 Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (AOGCMs)

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σήμερα για την προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής είναι τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Coupled Atmospheric-Ocean General Circulation Models - AOGCMs). Πρόκειται για μοντέλα που βασίζονται στις βασικές φυσικές αρχές του γήινου συστήματος, όπως οι βασικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών και της διάδοσης της ακτινοβολίας. Τα AOGCMs χωρίζονται σε Ατμοσφαιρικά (AGCMs) και Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (OGCMs), ενώ μπορεί να είναι και συζευγμένα μεταξύ τους (AOGCMs), καθώς και με άλλα μοντέλα, όπως τα μοντέλα προσομοίωσης της παγοκάλυψης στην ξηρά και την θάλασσα, της βιόσφαιρας και άλλα (EMEKA, 2011b).

Τα AOGCMs που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του κλίματος και της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζουν ομοιότητες με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την καιρική πρόγνωση λίγων ημερών. Η διαφορά είναι ότι τα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού δίνουν έμφαση σε διαφορετικά στοιχεία, αφού χρησιμοποιούνται με διαφορετικό σκοπό και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Συγκεκριμένα, τα κλιματικά AOGCMs δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις διεργασίες του εδάφους, του ωκεανού και των παγετώνων καθώς και στην ισορροπία των διεργασιών μεγάλης χρονικής κλίμακας, όπως ο υδρολογικός κύκλος.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η γνώση ορισμένων φυσικών διεργασιών είναι ακόμα περιορισμένη. Για το λόγο αυτό, στις κλιματικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται παραμετροποιήσεις και απλουστεύσεις ορισμένων φαινομένων. Η χωρική ανάλυση των AOGCMs στις μέρες μας, εξαιτίας των περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων, είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων. Σε αυτή τη χωρική ανάλυση είναι δυνατόν να αναπαραχθεί ικανοποιητικά η γενική κυκλοφορία σε ολόκληρο τον πλανήτη, καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων σε συνοπτική κλίμακα.

Ωστόσο δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια φαινόμενα που σχετίζονται με την επίδραση της τοπογραφίας σε τοπική και περιοχική κλίμακα .

Οι τεχνικές με τις οποίες εισάγεται η περιοχική πληροφορία στις κλιματικές προσομοιώσεις ονομάζονται τεχνικές υποβιβασμού κλίμακας (υποκλιμάκωσης) και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Τα υψηλής ή μεταβλητής ανάλυσης Παγκόσμια Ατμοσφαιρικά Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας
2. Τις στατιστικές ή εμπειρικές μεθόδους υποκλιμάκωσης (Statistical/Empirical Downscaling)
3. Τη δυναμική υποκλιμάκωση.

Η δυναμική υποκλιμάκωση βασίζεται στη χρήση των Περιοχικών Κλιματικών Μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs) τα οποία και θα αναλύσουμε στην επόμενη υποενότητα.

6.5.2 Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (RCMs)

Τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (RCMs) πρόκειται για μοντέλα περιορισμένου πεδίου και υψηλής ανάλυσης τα οποία βασίζονται στη δυναμική υποκλιμάκωση και αναπτύχθηκαν προκειμένου να εισαχθεί η περιοχική πληροφορία στα μεγάλης κλίμακας πεδία που παρέχονται από τα GCMs ή που προκύπτουν από δεδομένα πλήρους επεξεργασίας (reanalysis data) (NCEP, ERA-40) (EMEKA, 2011b). Για να λειτουργήσουν είναι απαραίτητο να τους παρέχονται αρχικές συνθήκες σε ολόκληρο το πεδίο τους, χρονομεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες στα πλευρικά τους όρια και επιφανειακές οριακές συνθήκες. Οι πλευρικές οριακές συνθήκες προέρχονται από προσομοιώσεις με GCMs ή από ανάλυση παρατηρήσεων. Δέχονται επίσης, όπως και τα AOGCMs, δεδομένα εισόδου συγκέντρωσης αερίων θερμοκηπίου και συγκέντρωσης αερολυμάτων. Συνήθως αποτελούνται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο συζευγμένο με ένα μοντέλο του εδάφους. Οι συνθήκες στην επιφάνεια του ωκεανού παρέχονται μαζί με τις χρονομεταβαλλόμενες πλευρικές οριακές συνθήκες, ωστόσο γίνονται απόπειρες να συζευχθούν και με ένα ωκεάνιο μοντέλο αντίστοιχης (υψηλής) χωρικής ανάλυσης. Επιπρόσθετα, είναι δυνατό να συζευχθούν με μοντέλα της υδρολογίας, των πάγων της θάλασσας (sea-ice), της χιμείας της ατμόσφαιρας, των αερολυμάτων και της βιόσφαιρας. Γενικά δεν αλληλεπιδρούν με το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, που τους παρέχει τις πλευρικές οριακές συνθήκες. Λόγω των μικρών τους απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις διάρκειας μερικών δεκαετιών σε αρκετά υψηλή ανάλυση, μέχρι και κάτω από τα 10 km. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουν να υποκλιμακώσουν την πληροφορία από τα αποτελέσματα των GCMs που περιέχει την γενική κυκλοφορία, η οποία οφείλεται στους μεγάλης κλίμακας παράγοντες (large-scale forcings), και να την εμπλουτίσουν χάρη στην καλύτερη αναπαράσταση της τοπογραφίας (λόγω της υψηλότερης ανάλυσης) και στην δυνατότητα αναπαράστασης διεργασιών μικρότερης κλίμακας, οι οποίες δεν μπορούν να προσομοιωθούν στην κλίμακα των GCMs. Τα περιοχικά μοντέλα χρησιμοποιούνταν ήδη από παλιά στην αριθμητική πρόγνωση καιρού, βελτιώθηκαν από τους Dickinson et al. (1989) και Giorgi (1990) και έκτοτε χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, από παλαιοκλιματολογικές μέχρι την μελέτη της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής.

Τα RCMs διαθέτουν πολλές υπορουτίνες για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών που είτε συμβαίνουν σε κλίμακα μικρότερη από την κλίμακα που μπορούν να αναλύσουν, όπως οι διεργασίες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, είτε ξεφεύγουν από την φυσική των εξισώσεων Navier-Stokes που αποτελούν τον βασικό πυρήνα τους, όπως οι υπορουτίνες της ακτινοβολίας, είτε και τα δυο. Όλες αυτές οι υπορουτίνες διαθέτουν μια σειρά από παραμέτρους τις οποίες ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να μεταβάλλει ανάλογα με τη

γεωγραφική περιοχή, το μέγεθος και την ανάλυση του καννάβου. Πριν από τις κυρίως προσομοιώσεις του, ο χρήστης πρέπει να πραγματοποιήσει μερικές δοκιμαστικές προσομοιώσεις προκειμένου να εξετάσει αν η επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου οδηγεί σε αληθοφανή αποτελέσματα. Αυτές οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με δεδομένα πλήρους επεξεργασίας (reanalysis data), ώστε στη συνέχεια τα αποτελέσματά να μπορούν να επαληθευτούν με δεδομένα παρατηρήσεων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ρύθμιση του μοντέλου (tuning).

Βασικό πλεονέκτημα των RCMs είναι ότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως την γεωμορφολογία, την κατανομή ξηράς και θάλασσας και τις χρήσεις γης, τα οποία δεν είναι ακόμα δυνατό να παρασταθούν στις προσομοιώσεις των GCMs, επειδή οι διαστάσεις τους είναι μικρότερες από τις διαστάσεις του καννάβου του GCM. Επιπρόσθετα, η αυξημένη χωρική ανάλυση των RCMs επιτρέπει να αναλύονται φαινόμενα μικρότερης χωρικής κλίμακας που δεν αναλύονται από τα GCMs. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να προσομοιώσουν τη λειτουργία μηχανισμών ανάδρασης που δρουν σε περιοχική κλίμακα. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι αν τα αποτελέσματα του GCM, που παρέχει τις οριακές συνθήκες, είναι εσφαλμένα το ίδιο θα ισχύσει και για τα αποτελέσματα του RCM. Αυτό το μειονέκτημα ισχύει για όλες τις τεχνικές υποκλιμάκωσης. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί η έλλειψη της δυνατότητας αλληλεπίδρασης με το GCM. Η ανάγκη ρύθμισης τους, είναι ένα ακόμα μειονέκτημα διότι μπορεί να αποδειχτεί διαδικασία χρονοβόρα και επίπονη.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των κλιματικών συνθηκών που θα επικρατήσουν στο μέλλον σε ένα τόπο εμπεριέχει πολλούς παράγοντες αβεβαιότητας οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

1. Η επιλογή του σεναρίου εκπομπής αερίων του θερμοκηπικών βάσει του οποίου γίνεται η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος
2. Η επιλογή του GCM με το οποίο θα διεξαχθούν οι κλιματικές προσομοιώσεις
3. Η επιλογή του RCM στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεθοδολογία δυναμικής υποκλιμάκωσης
4. Η επιλογή των αρχικών συνθηκών της κλιματικής προσομοίωσης του GCM, δεδομένα του οποίου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του RCM.

Μια συνήθης πρακτική, που χρησιμοποιείται προκειμένου να μειωθούν οι αβεβαιότητες που οφείλονται στις διαφορετικές παραμετροποιήσεις και τους διαφορετικούς δυναμικούς κώδικες που χρησιμοποιούνται από τα διαφορετικά κλιματικά μοντέλα αλλά και στην αβεβαιότητα των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στο μέλλον, είναι το να αναλύονται τα αποτελέσματα ενός συνόλου από προσομοιώσεις διαφορετικών κλιματικών μοντέλων και για διάφορα σενάρια εκπομπών (ensemble).

6.5.3 Παγκόσμιο Κλιματικό Μοντέλο 3^{ης} Γενιάς (CGCM3)

Το Παγκόσμιο Κλιματικό Μοντέλο 3ης Γενιάς (CGCM3) δημιουργήθηκε από το Καναδικό Κέντρο για την Μοντελοποίηση της Κλιματικής Αλλαγής (CCCma) και είναι το τρίτο στη σειρά συζευγμένο μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (ατμοσφαιρικό-ωκεάνιο παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο), που ουσιαστικά κάνει χρήση του ωκεάνιου μοντέλου στο ήδη υπάρχον λογισμικό ατμοσφαιρικής γενικής κυκλοφορίας τρίτης γενιάς. Βιβλιογραφικές αναφορές των Flato and Boer (2001) και Kim et al. (2002, 2003) περιγράφουν περισσότερα για την ωκεάνια αυτή λειτουργία. Ο θαλάσσιος πάγος είναι ένα μοντέλο δύο συστατικών, του μέσου πάχους και της συγκέντρωσης, με στοιχεία δυναμικής των ρευστών και θερμοδυναμικής, όπως στα άλλα δύο προγενέστερα μοντέλα, ενώ περιλαμβάνεται και μια προγνωστική εξίσωση για την

συγκέντρωση των πάγων ακολουθώντας το «δυναμικό θερμοδυναμικό μοντέλο του θαλάσσιου πάγου» του Hibler (1979).

Η αρχική έκδοση του CGCM3 αναπτύχθηκε και έτρεξε σε έναν υπερυπολογιστή NEC SX / 6. Η μεταγενέστερη έκδοση, CGCM3.1, ενσωματώνει τις αλλαγές που απαιτούνται για να «τρέξει» αποτελεσματικά σε ένα νέο σύστημα υπολογιστών της IBM. Αυτή η τελευταία έκδοση είναι αυτή που χρησιμοποιείται για να παράγει μια εκτεταμένη σειρά από προσομοιώσεις για χρήση στην Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC.

Η έκδοση CGCM3.1 λειτουργεί σε δύο διαφορετικές αναλύσεις. Η T47 έκδοση έχει ένα κάρναβο επιφάνεια της οποίας η χωρική ανάλυση είναι περίπου $3.75^{\circ} \times 3.75^{\circ}$ και είναι χωρισμένο σε 31 κατακόρυφα επίπεδα. Η ανάλυση του ωκεανού σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου $1.85^{\circ} \times 1.85^{\circ}$, με 29 κατακόρυφα επίπεδα. Η έκδοση T63 διαθέτει ένα κάρναβο του οποίου η χωρική ανάλυση είναι περίπου $2.80^{\circ} \times 2.80^{\circ}$ και χωρισμένο σε 31 κατακόρυφα επίπεδα. Η ανάλυση των ωκεανών είναι περίπου 1.4° γεωγραφικού μήκους και 0.94° σε γεωγραφικό πλάτος. Αυτό παρέχει ελαφρώς καλύτερη ανάλυση των ζωνών ρευμάτων στους τροπικούς, σχεδόν ισότροπης ανάλυση στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, και κάπως μειωμένες προβολές με τις συγκλίνουσες μεσημβρινούς στην Αρκτική.

Το Καναδικό Κέντρο για την Μοντελοποίηση της Κλιματικής Αλλαγής παρέχει ένα φιλικό στο χρήστη περιβάλλον, που του επιτρέπει να επιλέξει το ανάλογο κλιματικό μοντέλο από τα διαθέσιμα, 3^{ns} γενιάς ατμοσφαιρικά ή 3^{ns} γενιάς συζευγμένα ατμοσφαιρικά-ωκεάνια, και επιλέγοντας σε ένα παγκόσμιο χάρτη, που είναι χωρισμένος σε τετραγωνικό κάρναβο, την περιοχή που επιθυμεί να παραλάβει παραμέτρους για τα αντίστοιχα σενάρια κλιματικών αλλαγών SRES της IPCC. Το Καναδικό Κέντρο μας παρέχει με έξι παραμέτρους για κάθε σενάριο και εφαρμόζοντας συνεχής γραμμικές παλινδρομήσεις μέσω πολύπλοκων υπολογιστικών πράξεων εντοπίζουμε τις ζητούμενες μεταβλητές.

Τα αρνητικά του μοντέλου αυτού, αν και χρήσιμου για προσομοιώσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, επικεντρώνονται αφενός στην χωρική ανάλυση του μοντέλου και αφετέρου στις παραμέτρους που μας δίνονται, που δεν μας βοηθούν για να εντοπίσουμε τις μεταβολές σε όλες τις απαιτούμενες μεταβλητές που απαιτεί το υπολογιστικό μοντέλο SWAT. Αρχικά, για την χωρική ανάλυση (Σχ. Β.8), όλη η Ελλάδα απεικονίζεται σε ένα pixel του καννάβου. Αν η Ελλάδα ήταν μια χώρα με ομοιόμορφο κλίμα σε όλη της την έκταση, τότε θα μας εξυπηρετούσε και αυτή η κακή ανάλυση. Ωστόσο, η Ελλάδα παρά το μέγεθος της συγκεντρώνει κλιματικές περιοχές ηπειρωτικού, ορεινού, πεδινού και ειδικά νησιωτικού και παραθαλάσσιου, που διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και επομένως και ως προς τα αποτελέσματα. Επίσης, το μοντέλο SWAT για την σωστή εκτέλεση του, πέρα από δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, που είναι τα κύρια απαιτούμενα δεδομένα, απαιτεί τιμές για την σχετική υγρασία (εκφρασμένη σε σημείο δρόσου) και την ηλιακή ακτινοβολία.

Όλα αυτά μας οδηγούν στο να αναθεωρήσουμε τυχόν επιλογή κλιματικού μοντέλου του Καναδικού Κέντρου CCCma, και να αναζητήσουμε εναλλακτικές, όπως την χρήση περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) που αναφέραμε προηγουμένως.

6.5.4 Το πρόγραμμα PRUDENCE

Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk/>) πραγματοποιήθηκε κατά την χρονική περίοδο 1η Νοεμβρίου 2001 – 31 Οκτωβρίου 2004, και είχε ως βασικό σκοπό τον προσδιορισμό των κινδύνων και των συνεπειών που θα προκαλέσουν οι κλιματικές αλλαγές εξαιτίας των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρώπη. Η εκτίμηση αυτή βασίστηκε σε προσομοιώσεις του παρόντος και του μελλοντικού κλίματος που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση κλιματικών προτύπων προσομοίωσης υπό διάφορα σενάρια εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Προκειμένου η χωρική ανάλυση των εκτιμώμενων κλιματικών μεταβολών να είναι υψηλή χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι δυναμικής υποκλιμάκωσης. Πιο συγκεκριμένα τα ανά εξάωρο δεδομένα εξόδου των AOGCMs, HadAM3H, ECHAM4, ECHAM5 και Arpège, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν από ένα σύνολο RCMs χωρικής ανάλυσης $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες του προγράμματος. Η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό τα σενάρια εκπομπών A2 και B2.

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν πληροφορίες για τα RCMs του προγράμματος PRUDENCE δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να υπολογιστούν οι μεταβολές της μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασία αέρος στα 2 m από την επιφάνεια, της βροχόπτωσης, της σχετικής υγρασίας στα 2 m από την επιφάνεια, της εισερχόμενης στην επιφάνεια ολικής μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια της γης.

Πίνακας 6.2: Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα του προγράμματος PRUDENCE (Πηγή EMEKA, 2011b)

Ακρωνύμιο του RCM	Ινστιτούτο Ανάπτυξης του RCM	Χωρική Ανάλυση	Κατακόρυφα Επίπεδα	Βασική Αναφορά	Βιβλιογραφική Αναφορά
CHRM	ETHZ, Switzerland	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	20		Vidale et al. 2002
CLM	GKSS Germany	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	20		Steppeler et al. 2003
HadRM3H	HC, UK	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$	19		Buonomo et al. 2007
HIRHAM	DMI, Denmark	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$	19		Christensen et al. 1998
RACMO	KNMI, Netherlands	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$	31		Lenderink et al. 2003
RCAO	SMHI, Sweden	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$	24		Döscher et al. 2007
RegCM	ICTP, Italy	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$	14		Giorgi et al. 1999
REMO	MPI, Germany	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	19		Jacob 2001
PROMES	UCM, Spain	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$	28		Castro et al. 1993

6.5.5 Το πρόγραμμα ENSEMBLES

Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>) πραγματοποιήθηκε κατά την χρονική περίοδο 1η Σεπτεμβρίου 2004 – 31 Δεκεμβρίου 2009 και μπορεί να θεωρηθεί συνέχεια του προγράμματος PRUDENCE. Στόχος του προγράμματος αυτού ήταν η δημιουργία ενός συστήματος προσομοίωσης που θα παρείχε εκτιμήσεις των μεταβολών που θα υποστεί το κλίμα της Ευρώπης καθώς και άλλων περιοχών του πλανήτη εξαιτίας των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στα πλαίσια του προγράμματος διερευνήθηκαν επίσης, οι επιπτώσεις των μεταβολών αυτών σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, στην γεωργία, στην υγεία του πληθυσμού, στις λίμνες και τα ποτάμια, στη φυσική βλάστηση κ.α.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν από ένα σύνολο κλιματικών μοντέλων που περιλάμβανε τα πιο εξελιγμένα μέχρι σήμερα RCMs και AOGCMs. Στα πλαίσια μάλιστα του προγράμματος ελέγχθηκε η αξιοπιστία των μοντέλων και η ικανότητα τους να αναπαράγουν επιτυχώς το κλίμα των υπό μελέτη περιοχών κατά το παρόν. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καλύπτουν μεγάλο εύρος χωρικών (τοπική, περιοχική, πλανητική) και

χρονικών (εποχική, δεκαετίας, μεγαλύτερη από δεκαετία) κλιμάκων. Η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό το σενάριο A1B.

Στον πίνακα που ακολουθεί υπάρχουν πληροφορίες για τα RCMs του προγράμματος ENSEMBLES που επελέγησαν στην παρούσα μελέτη προκειμένου να εκτιμηθούν οι μεταβολές των βασικότερων κλιματικών παραμέτρων για την περιοχή της Ελλάδας.

Πίνακας 6.3: Τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα του προγράμματος ENSEMBLES (Πηγή ΕΜΕΚΑ, 2011b)

Ακρωνύμιο του RCM	Ινστιτούτο Ανάπτυξης του RCM	Χωρική Ανάλυση	Κατακόρυφα Επίπεδα	Βασική Βιβλιογραφική Αναφορά
C4IRCA3	SMHI, Sweden	0.22°x0.22°	31	Kjellström et al. 2005
DMI-HIRHAM5	DMI, Denmark	0.22°x0.22°	19	Christensen et al. 1998
ETHZ-CLM	ETHZ, Switzerland	0.22°x0.22°	32	Böhm et al. 2006
METO- HC HadRM3Q0	HC, UK	0.22°x0.22°	19	Collins et al. 2006
ICTP-REGCM3	ICTP, Italy	0.22°x0.22°	18	Giorgi et al. 1999
KNMI-RACMO2	KNMI, Netherlands	0.22°x0.22°	40	Meijgaard et al. 2008
MPI-M-REMO	MPI, Germany	0.22°x0.22°	27	Jacob et al. 2001
SMHIRCA	SMHI, Sweden	0.22°x0.22°	24	Kjellström et al. 2005
CNRM-RM4.5	CNRM, France	0.22°x0.22°	31	Reference none yet
CNRM-RM5.1	CNRM, France	0.22°x0.22°	31	Reference none yet
OURANOSMRC C4.2.3	CCCma, Canada	0.22°x0.22°	29	Plummer et.al (2006)

6.6 Επιτροπή Μελέτης των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής

6.6.1 Γενικά

Με πρωτοβουλία του Διοικητή της Τράπεζας της Ελλάδος κ. Γεωργίου Α. Προβόπουλου, το Μάρτιο του 2009, συστήθηκε Επιτροπή από διακεκριμένους επιστήμονες, στην οποία ανατέθηκε το έργο της εκπόνησης μελέτης σχετικά με τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα. Μετά από μελέτες και έρευνες 26 μηνών, η Επιτροπή ολοκλήρωσε την πρώτη φάση εργασιών και σε Έκθεση που δημοσιεύτηκε τον Ιούνιο του 2011, αποτίμησε το κόστος της κλιματικής αλλαγής για την ελληνική οικονομία, το κόστος της τυχόν αδράνειας καθώς και το κόστος των μέτρων άμβλυνσης των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής τα οποία θα ληφθούν στο πλαίσιο των σχετικών πολιτικών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην τρέχουσα δεύτερη φάση των εργασιών της, η Επιτροπή Μελέτης των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ) έχει θέσει ως στόχο να συμβάλει με μία νέα μελέτη στην επεξεργασία μιας εθνικής στρατηγικής προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή.

6.6.2 Η Έκθεση

Η Έκθεση της ΕΜΕΚΑ αποτελεί την πρώτη προσπάθεια πλήρους μελέτης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα. μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στα «οικονομικά στοιχεία» των επιπτώσεων και συγκεκριμένα του κόστους της κλιματικής μεταβολής για την ελληνική οικονομία, του κόστους μέτρων προσαρμογής στο μεταβαλλόμενο κλίμα, καθώς και του κόστους της μετάβασης προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στο πλαίσιο φυσικά της παγκόσμιας προσπάθειας για μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Για τη μελέτη αυτή, συνεργάστηκαν ομάδες από διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων φυσικών της ατμόσφαιρας, κλιματολόγων, γεωφυσικών, ειδικών στους τομείς της γεωργίας, των δασών και της αλιείας, υδρολόγων, ειδικών σε θέματα τουρισμού, δομημένου περιβάλλοντος και ενέργειας, καθώς και οικονομολόγων και κοινωνιολόγων.

Η έκθεση αυτή δεν προβλέπει νέα σενάρια αερίων εκπομπών ή άλλων οικονομικών και δημογραφικών παραμέτρων. Κάνει χρήση καθαρά των SRES σεναρίων και στηρίζεται εξ ολοκλήρου στην 4^η Έκθεση της IPCC (AR4). Για τους σκοπούς της μελέτης παρήχθησαν προβλέψεις μελλοντικών κλιματικών στοιχείων σε λεπτομερή γεωγραφική ανάλυση για την Ελλάδα μέχρι το τέλος του αιώνα που διανύουμε (2100). Επίσης, με μια σειρά τομεακών μελετών αναλύθηκαν οι βιοφυσικές επιπτώσεις της ανθρωπογενούς συνιστώσας της κλιματικής αλλαγής και εκτιμήθηκε το κόστος κατά τομέα των ζημιών εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, για δύο χρονικό ορίζοντα μέχρι το 2050 και το 2100. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των τομεακών μελετών εισήχθησαν σε μαθηματικό υπόδειγμα γενικής ισορροπίας για την ελληνική οικονομία, προκειμένου να αποτιμηθεί το συνολικό κόστος της κλιματικής αλλαγής σε όρους μεταβολής του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ), της κοινωνικής ευημερίας και της παραγωγής κατά κλάδο δραστηριότητας. Οι τομεακές μελέτες προσδιόρισαν επίσης τις δυνατότητες προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή μέσω διαφόρων μέτρων προληπτικού χαρακτήρα. Αποτιμήθηκε το συνολικό κόστος για την ελληνική οικονομία που αντιστοιχεί στις δαπάνες για μέτρα προσαρμογής, σε συνδυασμό με την εκτίμηση του κόστους για την οικονομία που θα αποφευχθεί χάρη στα μέτρα αυτά, λόγω του περιορισμού των ζημιών εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Η εκτίμηση των κλιματικών μεταβολών πραγματοποιήθηκε για 13 περιοχές, στις οποίες διαιρέθηκε η Ελλάδα βάσει κλιματικών και γεωγραφικών κριτηρίων, ενώ αναπτύχθηκε βάση δεδομένων και προσομοιώσεων για κλιματικές παραμέτρους που αφορούσαν σε εκτιμήσεις για τα τρία κυριότερα σενάρια εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των κλιματικών προσομοιώσεων, προβλέπεται ότι μέχρι τα τέλη του 21ου αιώνα η θερμοκρασία θα σημειώσει σημαντική άνοδο, ενώ το ύψος του νετού αναμένεται να μειωθεί στο σύνολο της επικράτειας. Παράλληλα, προβλέπεται δραστική αύξηση της έντασης των θερμών εισβολών και της διάρκειας των περιόδων ξηρασίας, με συνέπεια, μεταξύ άλλων, τη σημαντική αύξηση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών. Οι μεταβολές αυτές προβλέπεται ότι θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα της περιοχής, αλλά και σε μια σειρά από τομείς και αποτελέσματα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Στα πλαίσια της μελέτης και στηριζόμενοι στα αποτελέσματα των κλιματικών προσομοιώσεων, εκτιμήθηκαν οι κίνδυνοι και οι επιπτώσεις της κλιματικής μεταβολής στα υδάτινα αποθέματα, τη μέση στάθμη της θάλασσας, την αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες, τη γεωργία και τα γεωργικά εδάφη, τα δάση και τα δασικά οικοσυστήματα, τη βιοποικιλότητα και τα οικοσυστήματα, τον τουρισμό, το δομημένο περιβάλλον, τις μεταφορές, την υγεία και την εξορυκτική βιομηχανία. Οι επιμέρους μελέτες παρουσιάζουν ποσοτικές εκτιμήσεις του μεγέθους των αναμενόμενων περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων. Οι εκτιμήσεις αυτές μπορούν να συμβάλουν στο σχεδιασμό πολιτικών προσαρμογής και μετριασμού.

Σύμφωνα με την Έκθεση, οι επιπτώσεις αυτές θα οδηγήσουν σε μείωση της παραγωγικότητας, σε απώλεια κεφαλαίου και σε επιπλέον δαπάνες για την αποκατάσταση των ζημιών. Αρνητικές συνέπειες θα υπάρξουν επίσης όσον αφορά τη βιοποικιλότητα, τα οικοσυστήματα της Ελλάδος και την υγεία των κατοίκων.

Για το σενάριο «Μη-Δράσης», το κόστος της κλιματικής αλλαγής, όπως αυτό εκτιμήθηκε για την ελληνική οικονομία, θα είναι πολύ υψηλό. Αν η κλιματική αλλαγή εξελιχθεί με την ένταση που αναμένεται έως το 2050 και το 2100 χωρίς παγκόσμια προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και χωρίς η ελληνική κοινωνία να λάβει τα απαραίτητα μέτρα δράσης για την αντιμετώπιση των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών, η σωρευτική ζημία για την ελληνική οικονομία μέχρι και το 2100 φθάνει τα 701 δισεκατομμύρια ευρώ, δηλαδή ισοδυναμεί με το τριπλάσιο του σημερινού ετήσιου ΑΕΠ της χώρας.

Ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής (αύξησης της θερμοκρασίας που περιορίζεται στους 2°C) απαιτεί συνεχή προσπάθεια δραστηκής μείωσης των εκπομπών στην Ελλάδα, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο από σήμερα και μέχρι το 2050 και στη συνέχεια μέχρι το 2100. Μελετήθηκαν σε βάθος οι τρόποι με τους οποίους η Ελλάδα μπορεί να μειώσει δραστηκά τις εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων, καθώς και από βιομηχανικές και γεωργικές διεργασίες. Απαιτείται πολύ μεγάλη προσπάθεια στους τομείς της εξοικονόμησης ενέργειας, στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και στη διάδοση νέων τεχνολογιών σε όλους τους τομείς, περιλαμβανομένου του τομέα των μεταφορών. Η μελέτη αποτίμησε το κόστος αυτό για την ελληνική οικονομία, δηλαδή των μέτρων δραστηκής μείωσης των εκπομπών, το οποίο εκτιμήθηκε ότι σωρευτικά φθάνει τα 113 δισεκ. ευρώ μέχρι το 2050 και συνολικά τα 142 δισεκ. ευρώ μέχρι το 2100, επομένως ισοδυναμεί με περισσότερο από το μισό του σημερινού ετήσιου ΑΕΠ. Το όφελος για την οικονομία θα είναι όμως πολλαπλάσιο, γιατί ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής, αν η μείωση των εκπομπών γίνει σε παγκόσμιο επίπεδο, θα περιορίσει το κόστος των αρνητικών συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και για την ελληνική οικονομία σχεδόν κατά 60%, ποσοστό που ανέρχεται σε 294 δισεκ. ευρώ σωρευτικά έως το 2100, συγκριτικά με τα 701 δισεκ. ευρώ σε περίπτωση μη δράσης.

Τέλος, για το κόστος προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, που αντιστοιχεί σε μακροχρόνιες επενδύσεις σε πολλούς τομείς για την επίτευξη της προστασία από τις ζημίες εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, αποτιμήθηκε το σύνολο των επενδύσεων και άλλων δαπανών που θα απαιτηθούν συνολικά μέχρι το 2100. Οι δαπάνες αυτές ανέρχονται στα 67 δισεκ. ευρώ, που ισοδυναμεί περίπου με το ένα τρίτο του σημερινού ετήσιου ΑΕΠ. Οι επενδύσεις αυτές, σε έργα υποδομής στους τομείς της γεωργίας, των μεταφορών, των δασών, του τουρισμού, καθώς και στις παράκτιες περιοχές και στο δομημένο περιβάλλον σε αστικές περιοχές, δεν εξαλείφουν το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, ούτε εκμηδενίζουν τις επιπτώσεις του, τις περιορίζουν όμως σημαντικά. Με αλλά λόγια προσαρμοζόμαστε στις «αναπόφευκτες» κλιματικές αλλαγές. Οι επενδύσεις σε μέτρα προσαρμογής θα διασφαλίσουν μείωση του κόστους από την κλιματική αλλαγή σχεδόν κατά 30%, που ισοδυναμεί σε 510 δισεκ. ευρώ σωρευτικά έως το 2100, έναντι των 701 δισεκ. ευρώ σε περίπτωση μη δράσης. Η μείωση αυτή ισοδυναμεί σχεδόν με το σημερινό ετήσιο ΑΕΠ. Η πολιτική προσαρμογής έχει προληπτικό χαρακτήρα και είναι σε κάθε περίπτωση σκόπιμη εν όψει της μεγάλης αβεβαιότητας σχετικά με την αποτελεσματικότητα της παγκόσμιας προσπάθειας για το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής μέσω της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Εξετάζοντας τα παραπάνω, και τις σχέσεις κόστους-οφέλους των πολιτικών μετριασμού, προσαρμογής και μη δράσης, αναλύεται η υπεροχή της πολιτικής μετριασμού έναντι των άλλων δύο σεναρίων, και η υπεροχή της πολιτικής προσαρμογής έναντι της μη δράσης, καθώς και αναλύεται η σκοπιμότητα ανάληψης δράσης για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο πλαίσιο των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παράλληλα, απαιτείται

έναρξη των διαδικασιών που θα καθορίσουν τη μακροχρόνια στρατηγική για μέτρα προσαρμογής. Δεδομένου ότι δεν μπορεί να αποκλειστεί η εκδήλωση ακραίων κλιματικών επιπτώσεων στο μέλλον, τόσο η πολιτική μετριασμού όσο και η πολιτική προσαρμογής έχουν το χαρακτήρα της ασφάλισης έναντι τέτοιων ενδεχόμενων και επομένως μακροχρόνιας οικονομικής εξασφάλισης.

Η σημερινή δυσχερής οικονομική κατάσταση της χώρας δημιουργεί εμπόδια σχετικά με την εξασφάλιση των κεφαλαίων που θα απαιτηθούν για την εφαρμογή πολιτικής μετριασμού και προσαρμογής. Όμως, στο μέτρο κατά το οποίο η πολιτική αυτή αξιοποιείται ως ευκαιρία νέων δραστηριοτήτων και ανάπτυξης, μπορεί να αποτελέσει μέρος της στρατηγικής που θα συμβάλει στην ταχύτερη έξοδο από την οικονομική κρίση και στη διαμόρφωση ενός νέου αναπτυξιακού προτύπου. Με άλλα λόγια, η υιοθέτησή της, αντί να παρεμποδίζεται από το σημερινό οξύ πρόβλημα της οικονομίας, μπορεί να συμβάλει στη λύση του.

6.6.3 Η συνεισφορά του Κέντρου Έρευνας Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας

Το Κέντρο Έρευνας Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας (ΚΕΦΑΚ) της Ακαδημίας Αθηνών με κύριο συντονιστή τον καθηγητή Φυσικής και Ατμόσφαιρας κ. Χρήστο Ζερεφό και μαζί με πλήθος αξιόλογων επιστημόνων (Κατωμενάκης Ι. κ.ά.) διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο για τη συγγραφή της πλήρους έκθεσης της ΕΜΕΚΑ. Το ΚΕΦΑΚ πραγματοποίησε όλες τις απαιτούμενες προσομοιώσεις των μοντέλων κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιώντας τα προγράμματα PRUDENCE και ENSEMBLES που αναλύθηκαν πρωτότερα, για τα 3 σενάρια αέριων εκπομπών A1B, A2 και B2. Επίσης, δημιούργησε πλούσιο περιγραφικό υλικό με συγκρητικούς πίνακες και χάρτες ποσοστιαίων μεταβολών που απεικονίζουν τις μεταβολές κλιματικών παραμέτρων για μελλοντικές χρονικές περιόδους εκτιμημένα υπό τα 3 σενάρια εκπομπών.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικό στάδιο για την μελέτη των κλιματικών αλλαγών στην Ελλάδα είναι χωρισμός της σε περιοχές με ίδια γεωγραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Τα κριτήρια αυτά αφορούσαν: (α) την από βορρά προς νότο διατρέχουσα οροσειρά την Ελλάδα, που χωρίζει την ηπειρωτική Ελλάδα στη δυτική ομβροπλευρά της χώρας και στην ξηρότερη ανατολική, (β) την ύπαρξη των νήσων του Ανατολικού Αιγαίου και των Δωδεκανήσων, όπου το ύψος του νετού αυξάνεται εκ νέου μετά το ελάχιστο στις Κυκλάδες, (γ) τις βαθμίδες της θερμοκρασίας από βορρά προς νότο, καθώς και τις διαφορές μεταξύ νησιωτικών και ηπειρωτικών περιοχών και (δ) τη τοπογραφία και την ομοιογένεια ως προς την κλιματική ταξινόμηση. Βάσει των κριτηρίων αυτών η Ελλάδα χωρίστηκε σε 13 κλιματικές περιοχές, Δυτική Ελλάδα (WG), Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα (CEG), Δυτική και Κεντρική Μακεδονία (WCM), Ανατολική Μακεδονία-Θράκη (EMT), Δυτική Πελοπόννησος (WP), Ανατολική Πελοπόννησος (EP), Αττική (AT), Κρήτη (C), Δωδεκάνησα (D), Κυκλάδες (CY), Ανατολικό Αιγαίο (EA), Βόρειο Αιγαίο (NA) και Ιόνιο (I). Για κάθε κλιματική περιοχή ξεχωριστά εκτιμήθηκαν οι αναμενόμενες μεταβολές των μέσων εποχικών και των μέσων ετήσιων τιμών έξι κλιματικών παραμέτρων για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100, συγκρινόμενες με την ιστορική χρονοσειρά 30 ετών (1961-1990). Οι κλιματικές παράμετροι εκτιμήθηκαν υπό τα Σενάρια Αερίων Εκπομπών του θερμοκηπίου της 4ης Έκθεσης της IPCC (2007) και αυτές ήταν η μέση θερμοκρασία του αέρα ($^{\circ}\text{C}$), η μέση βροχόπτωση (mm), η σχετική υγρασία (%), το κλάσμα νεφοκάλυψης (%), η ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2) και η ταχύτητα του ανέμου (m/s). Το σύνολο των κλιματικών προσομοιώσεων έγινε με χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) και στο πλαίσιο του προγράμματος PRUDENCE χρησιμοποιήθηκαν 9 κλιματικά πρότυπα, όπου έγινε η εκτίμηση των παραμέτρων για τα σενάρια A2 και B2 για την χρονική περίοδο 2071-2100. Για το σενάριο A2 τα κλιματικά δεδομένα προέκυψαν από 13 προσομοιώσεις, ενώ για το σενάριο B2 από 8 προσομοιώσεις. Σε κάθε περίπτωση η χωρική ανάλυση ήταν της τάξης των $50 \times 50 \text{ km}^2$. Οι παράμετροι του

σεναρίου A1B εκτιμήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ENSEMBLES και τα δεδομένα προέκυψαν από 12 προσομοιώσεις, ενώ η χωρική ανάλυση ήταν της τάξης των $25 \times 25 \text{ km}^2$. Οι εκτιμήσεις έγιναν για δύο μελλοντικές χρονικές περιόδους, 2021-2050 και 2071-2100.

Παρακάτω θα αναφέρουμε κάποιες χαρακτηριστικές μεταβολές των σεναρίων, όπως αυτές εκτιμήθηκαν, αναφέροντας τις τιμές των μεταβολών για όλη την επικράτεια, καθώς και για την κλιματική περιοχή Κεντρικής-Ανατολικής Ελλάδας, όπου συμπεριλαμβάνεται η Θεσσαλία.

Πιο συγκεκριμένα, για τη μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρος έγιναν οι εξής εκτιμήσεις:

1. Αύξηση της θερμοκρασίας για όλη την επικράτεια για το σενάριο A1B της τάξης των $1.42 \pm 0.38^\circ\text{C}$ (κατά απόλυτη τιμή) ή αύξηση $8.9 \pm 2.4\%$ για την περίοδο 2021-2050, και $3.17 \pm 0.72^\circ\text{C}$ ή $19.9 \pm 4.7\%$ για την περίοδο 2071-2100. Για τις αντίστοιχες μεταβολές για την Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα, οι αυξήσεις εκτιμώνται της τάξης των $1.54 \pm 0.42^\circ\text{C}$ ή $10.8 \pm 3.2\%$ για την πρώτη περίοδο (2021-2050), ενώ για την δεύτερη οι αντίστοιχες αυξήσεις είναι της τάξης των $3.41 \pm 0.80^\circ\text{C}$ ή $23.7 \pm 5.9\%$. Επίσης, να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες αυξήσεις παρατηρούνται στην Δυτική Ελλάδα και Δυτική και Κεντρική Μακεδονία με αυξήσεις της τάξης περίπου 13% για την περίοδο 2021-2050 και λίγο λιγότερο από 30% για το 2071-2100.
2. Αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη την επικράτεια για το σενάριο A2 της τάξης των $3.88 \pm 0.43^\circ\text{C}$ ή $24 \pm 2.9\%$ για την περίοδο 2071-2100, με τη μεγαλύτερη αύξηση να σημειώνεται στην τελευταία δεκαετία του 21ου αιώνα, της τάξης των $4.46 \pm 0.38^\circ\text{C}$ ή αύξηση $27.6 \pm 2.6\%$. Για την Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα η αύξηση αυτή φτάνει τους $4.30 \pm 1.03^\circ\text{C}$ ή $28.9 \pm 8.1\%$. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις της θερμοκρασίας συναντώνται στην Δυτική Ελλάδα, Δυτική και Κεντρική Μακεδονία και Ανατολική Μακεδονία και Θράκη, με κορυφαία την αύξηση 44% για την δεκαετία 2091-2100 για την Δυτική και Κεντρική Μακεδονία.
3. Αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη την επικράτεια για το σενάριο B2 της τάξης των $2.86 \pm 0.31^\circ\text{C}$ ή $17.7 \pm 1.9\%$ για την περίοδο 2071-2100, με ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση να σημειώνεται στην τελευταία δεκαετία του 21ου αιώνα, της τάξης των $3.11 \pm 0.39^\circ\text{C}$ ή αύξηση $19.3 \pm 2.5\%$. Για την Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα η αύξηση αυτή φτάνει τους $3.02 \pm 0.41^\circ\text{C}$ ή $20.2 \pm 2.7\%$. Και σε αυτό το σενάριο οι μεγαλύτερες αυξήσεις της θερμοκρασίας συναντώνται στις ίδιες κλιματικές περιοχές της τάξης των 25-27%.

Η μέση τιμή των βροχοπτώσεων σε mm/έτος θα υποστεί σημαντικές μειώσεις ειδικά κατά την τελευταία τριακονταετία. Πιο συγκεκριμένα:

1. Για το σενάριο A1B προβλέπεται μείωση της ετήσια βροχόπτωσης κατά $6.4 \pm 4.2\%$ για όλη την επικράτεια για την περίοδο 2021-2050, ενώ η αντίστοιχη μείωση ξεπερνάει τα 19% ($19.3 \pm 5.5\%$) για την περίοδο 2071-2100. Για την κλιματική περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Ελλάδας παρατηρείται μείωση των βροχοπτώσεων της τάξης του $5.0 \pm 4.9\%$ για την πρώτη περίοδο και $17.2 \pm 6.5\%$ για την δεύτερη. Μεγαλύτερες μειώσεις παρατηρούνται στην Κρήτη και τη Δυτική Πελοπόννησο, με αντίστοιχες μεταβολές -9.8% και -10.9% για την περίοδο 2021-2050 και -28.1 και -26.2% για την περίοδο 2071-2100.
2. Για το σενάριο A2 προβλέπεται μείωση της ετήσιας βροχόπτωσης κατά $17.2 \pm 8.0\%$ για την περίοδο 2071-2100 για όλη την επικράτεια με τη μέγιστη μείωση να σημειώνεται την δεκαετία 2081-2090 ($22.6 \pm 5.5\%$), ενώ για την Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα η μείωση δεν ξεπερνάει το 16% ($15.8 \pm 11.0\%$) για όλη την τριακονταετία και $20.6 \pm 8.3\%$ για την δεκαετία 2081-2090. Οι μεγαλύτερες μειώσεις των υψών των βροχοπτώσεων παρατηρούνται στην Πελοπόννησο για τη δεκαετία 2081-2090, με την Ανατολική Πελοπόννησο η μείωση αυτή να ξεπερνάει το 27% και στη Δυτική Πελοπόννησο το 28%,

ενώ αντίθετα παρατηρείται αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης για την τελευταία δεκαετία του 21ου αιώνα (2091-2100) συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες, και συγκεκριμένα για τα νησιά του Αιγαίου (Βόρειο Αιγαίο, Ανατολικό Αιγαίο, Κυκλάδες και Δωδεκάνησα) εκτιμάται αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης για τη δεκαετία 2091-2100 σε σύγκριση με την προηγούμενη δεκαετία, που ξεπερνά το 10% (10-12%).

3. Για το σενάριο B2 προβλέπεται μείωση της ετήσια βροχόπτωσης μόλις κατά $4.7 \pm 9.7\%$ για όλη την επικράτεια για την περίοδο 2071-2100, με τη μέγιστη μείωση να σημειώνεται και σε αυτή την περίπτωση τη δεκαετία 2081-2090 ($9.2 \pm 8.2\%$). Η μέγιστη μείωση για την περίοδο αυτή συναντάται στην Κρήτη και την Πελοπόννησο, που ξεπερνά το 14%, ενώ η αντίστοιχη της Κεντρικής και Ανατολικής Ελλάδας είναι μόλις $8.8 \pm 10.7\%$. Επίσης, η μείωση για όλη την τριακονταετία για την περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Ελλάδας εκτιμάται στα $5.7 \pm 9.7\%$. Τέλος, παρατηρούμε και εδώ αύξηση των βροχοπτώσεων κατά το τέλος του 21ου αιώνα, σε σύγκριση με την προηγούμενη δεκαετία για τα νησιά του Αιγαίου της τάξης του 10-15% περίπου, που μάλιστα σύμφωνα με το σενάριο αυτό παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένες και συγκριτικά με τα ιστορικά δείγματα (1961-1990) της τάξης των 4-6% περίπου.

Να σημειωθεί ότι οι μικρές διαφορές ως προς τις εκτιμήσεις των κλιματικών παραμέτρων στην περίοδο αναφοράς 1961-1990 για τα διαφορετικά σενάρια εκπομπών οφείλονται στο ότι οι κλιματικές παράμετροι υπολογίζονται από διαφορετικά σύνολα κλιματικών προσομοιώσεων για τα διαφορετικά σενάρια.

Επίσης, για τις υπόλοιπες μεταβλητές, εκτιμώνται τα εξής:

1. Για την υγρασία προβλέπεται μικρή μείωση για την περίοδο 2021-2050 της τάξης του $1.1 \pm 0.4\%$ με τη μεγαλύτερη να σημειώνεται στη Μακεδονία και τη Θράκη ($2.4-2.6\%$), ενώ για την περίοδο 2071-2100 προβλέπεται μείωση $2.3 \pm 1.0\%$, $3.9 \pm 2.7\%$ και $1.6 \pm 1.1\%$ για τα σενάρια A1B, A2 και B2 αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται και εδώ στη Μακεδονία, τη Θράκη και τη Δυτική Ελλάδα της τάξης του 10%, ενώ μικρότερες μεταβολές της σχετικής υγρασίας παρατηρούνται στις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα.
2. Για την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία εκτιμάται ελάχιστη μείωση για την περίοδο 2021-2050, ενώ για την περίοδο 2071-2100 προβλέπεται ότι για το σενάριο A1B θα παραμείνει σχεδόν αμετάβλητη, ενώ για τα άλλα δύο σενάρια προβλέπεται αύξηση της τάξης του 1.8-2.2%. Η μεγαλύτερη αύξηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται στην Δυτική Ελλάδα της τάξης του 3-4% για τα σενάρια A2 και B2.
3. Για την ταχύτητα του ανέμου, πτωτική τάση φαίνεται να επικρατεί. Πιο συγκεκριμένα για το σενάριο A1B προβλέπεται μείωση της έντασης των ανέμων της τάξης του 6% για όλη την επικράτεια για τη περίοδο 2021-2050 και 12.7% για την περίοδο 2071-2100. Οι μεγαλύτερες μειώσεις για το σενάριο αυτό παρατηρούνται στα Δωδεκάνησα και την Κρήτη. Για τα σενάρια A2 και B2 δεν προβλέπονται σημαντικές μεταβολές για όλη την επικράτεια. Ειδικότερα, μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας των ανέμων εκτιμάται για το Ιόνιο από 3.7% για το σενάριο B2 έως 4.7% για το σενάριο A2. Ενίσχυση των ανέμων προβλέπεται για τις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα για το σενάριο A2 της τάξης του 2.6%, ενώ για το σενάριο B2 εκτιμάται ενίσχυση των ανέμων στην περιοχή της Αττικής της τάξης του 6%.
4. Τέλος, για το κλάσμα της νεφοκάλυψης που επηρεάζει την εισερχόμενη ακτινοβολία προβλέπεται για το σενάριο A1B μικρή αύξηση και για τις δύο περιόδους, για τη μεν πρώτη της τάξης του 0.7% και για τη δεύτερη της τάξης του 1.5%, με τις μεγαλύτερες αυξήσεις της νεφοκάλυψης να συναντώνται στη Δυτική Ελλάδα και Δυτική Πελοπόννησο. Για το σενάριο A2 προβλέπεται μείωση της νεφοκάλυψης της τάξης του

14.3%, με τη μεγαλύτερη μείωση να συναντάται στα Δωδεκάνησα (16.5%). Για το σενάριο B2 εκτιμάται μείωση της νεφοκάλυψης της τάξης του 9.1% για όλη την επικράτεια, με τη μεγαλύτερη μείωση να την παρατηρούμε στην Πελοπόννησο (10%).

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι οι εκτιμώμενες μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων για την περίοδο 2021-2050 αναμένονται να είναι ίδιες και για τα τρία σενάρια εκπομπών και για τον λόγο αυτό το ΚΕΦΑΚ εκτίμησε τις τιμές των παραμέτρων μόνο για το σενάριο A1B για την περίοδο αυτή.

Το Κέντρο Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας μας χορήγησε τα δεδομένα 5 κλιματικών παραμέτρων (το κλάσμα νεφοκάλυψης δεν χρειάζεται για τις μετρήσεις μας), εκτιμώντας αυτές από τα δύο προγράμματα περιοχικών μοντέλων PRUDENCE και ENSEMBLES, όπως ακριβώς πραγματοποίησε και κατά την εκπόνηση της Έκθεσης της ΕΜΕΚΑ. Η χωρική ανάλυση για το σενάριο A1B, μέσω του προγράμματος ENSEMBLES, ήταν της τάξης των $25 \times 25 \text{ km}^2$, αποκλειστικά για την περιοχή των λεκανών Πύλης και Μουζακίου. Επειδή οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν στο μέσο υψόμετρο των λεκανών και στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, οι εκτιμώμενες μεταβολές δεν απαιτούν επιπλέον αναγωγές. Τα δεδομένα στην περίπτωση αυτή εκτιμήθηκαν με 12 προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων. Επίσης, η εκτίμηση των σεναρίων A2 και B2 έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος PRUDENCE, και η χωρική ανάλυση σε αυτή την περίπτωση ήταν της τάξης των $50 \times 50 \text{ km}^2$, ενώ οι εκτιμήσεις αφορούσαν μεταβολές για όλη την κλιματική περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Ελλάδας, και τα δεδομένα υπολογίστηκαν με 13 προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων για το σενάριο A2 και 8 για το σενάριο B2. Η εκτίμηση για τα σενάρια A2 και B2 δεν ήταν αδύνατη αποκλειστικά για την περιοχή μελέτης μας, αλλά πραγματοποιήθηκε για την ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Ελλάδας, λόγω απουσίας έτοιμων δεδομένων στη βάση του ΚΕΦΑΚ και οπότε απαιτείτο εκ νέου εκτέλεση υπολογιστικών διαδικασιών εκτίμησης των παραμέτρων, κάτι που προτιμήσαμε να μην γίνει. Ωστόσο, οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι πολύ καλές, μπορεί όχι τόσο καλές όσο για την εκτίμηση του σεναρίου A1B, αλλά σίγουρα πολύ καλύτερες από την εκτίμηση του παγκόσμιου μοντέλου του Καναδικού Κέντρου. Εξάλλου, παρατηρήσαμε ότι για το σενάριο A1B δεν υπάρχουν αξιολογικές διαφορές στις εκτιμήσεις των μεταβολών για την περιοχή μελέτης σε σχέση με την κλιματική περιοχή Κεντρικής-Ανατολικής Ελλάδας. Πράγμα που θα ισχύει και για τα άλλα δύο σενάρια. Αυτό συμβαίνει γιατί αφορούν κλιματική περιοχή όμοιων χαρακτηριστικών, όπως αναφέραμε προωτέρω.

Τέλος, να υπογραμμίσουμε ότι οι τελικές εκτιμήσεις (που αναφέρονται στο κεφάλαιο 8) πραγματοποιήθηκαν με την παραδοχή ότι οι χρήσεις γης παρέμειναν αμετάβλητες στο διάστημα μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα.

7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT ΣΤΙΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΠΥΛΗΣ ΚΑΙ ΜΟΥΖΑΚΙΟΥ

7.1 Διαθεσιμότητα Δεδομένων

Οι δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται στην διαθεσιμότητα των δεδομένων, που αφορούν τις κλιματικές κυρίως παραμέτρους. Αν και η περιοχή μελέτης καλύπτεται από αρκετούς μετεωρολογικούς σταθμούς (Σχ. Β.3), ωστόσο πολύ λίγοι προσφέρουν άμεση διαθεσιμότητα δεδομένων, μέσω παλαιότερων μελετών είτε για έργα εγγειοβελτίωσης στην λεκάνη του Πηνειού είτε υδρολογικής επικαιροποίησης. Κάποιοι σταθμοί ανήκουν στη διαχείριση του τομέα υδατικών πόρων της ΔΕΗ και η διάθεση των δεδομένων τους προαπαιτεί συνεννόηση και συνήθη γραφειοκρατική διαδικασία, ενώ η διάθεση τους χρειάζεται διάστημα τουλάχιστον ενός μήνα. Ειδικότερα, τα δεδομένα που χρειαστήκαμε ήταν δεδομένα κατακρημνίσεων, σε ισοδύναμο ύψος βροχής, και θερμοκρασιών σε ημερήσιο χρονικό βήμα, καθώς επίσης και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου και σχετικής υγρασίας για σε μηνιαίους μέσους όρους.

Πιο συγκεκριμένα, οι ημερήσιες βροχοπτώσεις αντλήθηκαν αρχικά από μελέτες, άμεσα διαθέσιμες και προσβάσιμες μέσω των βιβλιοθηκών της επιστημονικής ομάδας Ιτιάς. Ωστόσο, πολύ μεγάλα κενά σε αυτές (έως και 4 συναπτά έτη) καθιστούσε αδύνατη την επεξεργασία μερικών σταθμών, αφού και η συμπλήρωση για τέτοια κενά δεν είναι εφικτή. Η προσφυγή στη ΔΕΗ για παροχή δεδομένων και από άλλους σταθμούς ήταν επιβεβλημένη, παρά την καθυστέρηση των εργασιών που αυτή απαιτούσε. Αβεβαιότητες που εκτιμήθηκαν ως προς την ακρίβεια των δεδομένων της ΔΕΗ μας οδήγησαν ένα βήμα πιο πέρα, σε μελέτες γειτονικών λεκανών, και την χρησιμοποίηση δεδομένων από αυτές. Τα δεδομένα θερμοκρασίας που χρειαζόμασταν για την εκτέλεση του προγράμματος έπρεπε να είναι σε ημερήσιο βήμα και μάλιστα εκφρασμένες σε μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Η έλλειψη δεδομένων μας οδήγησε και πάλι να ανατρέξουμε σε μελέτες γειτονικών λεκανών, και μάλιστα σε μελέτη υδρολογικής λεκάνης που τμήμα της αποτελούσαν και οι δύο λεκάνες που μελετούμε. Τα άλλα κλιματικά δεδομένα ήταν πιο εύκολα διαθέσιμα, αφού χρειαζόμασταν μόνο μια μέση μηνιαία τιμή (12 συνολικά) για την κάθε μεταβλητή, για την κατασκευή του μέσου σταθμού της κάθε λεκάνης. Τέλος, δεδομένα μετρημένων απορροών για τις δύο λεκάνες ανάντη των υδρομετρικών σταθμών τους ήταν διαθέσιμα για μικρό χρονικό διάστημα, που αυτό επηρεάζει την βαθμονόμηση και τον έλεγχο στασιμότητας. Όμως, επειδή δεν είχαμε άλλα διαθέσιμα εργαστήκαμε με αυτά.

Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα χωρικών δεδομένων, αυτά ήταν πιο εύκολα προσβάσιμα και διαχειρίσιμα. Αρχικά, για τις χρήσεις γης σε υπόβαθρο CORINE, αυτές μας δόθηκαν από το Κέντρο Γεωπληροφορικής της Σχολής μας, και συγκεκριμένα από τον κ. Πανόπουλο, και ήταν άμεσα διαχειρίσιμες σε συμβατό αρχείο με το λογισμικό ArcGIS. Το υπόβαθρο χρήσεων γης μπορεί να μην είναι προσφάτως επικαιροποιημένο, παρόλα αυτά δεν έχουν επέλθει δραματικές αλλαγές, όπως πυρκαγιές, αποψίλωση δέντρων, επέκταση βοσκότοπων, επέκταση αστικών ιστών (οικισμών), καθώς η περιοχή ελέγχεται και προστατεύεται ο φυσικός της πλούτος με αυστηρές νομοθεσίες. Τέλος, οι χάρτες εδαφών ήταν άμεσα διαθέσιμοι από το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών (ΙΔΕ) σε αναλογική μορφή φύλλων χαρτών κλίμακας 1:50000, που ουσιαστικά η μόνη τους δυσκολία ήταν η ψηφιακή τους σάρωση, η εκ

νέου γεωαναφορά των φύλλων ξεχωριστά και φυσικά η ψηφιοποίηση των διαφόρων εδαφικών τύπων, στηριζόμενοι μόνο στον μητρικό τύπο εδάφους.

Με αξιολόγηση των παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι παρά τη γενικότερη δυσκολία στη διαθεσιμότητα κάποιων δεδομένων και στις ελλείψεις που χρειάστηκαν να συμπληρωθούν, επιτύχαμε μια καλή ακρίβεια, ειδικά αφού πρόκειται για μία μικρή περιοχή μελέτης. Ωστόσο, αν εξετάσουμε τι θα μας εξασφάλιζε ακόμη καλύτερη ακρίβεια, πέρα από τις τυχόν ελλείψεις (κενά), αυτό είναι αρχικά η ύπαρξη ακόμη μίας δεκαετίας σχεδόν στα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, αλλά και στα μηνιαία δεδομένα απορροής. Με άλλα λόγια, η ιστορική χρονοσειρά μας να επεκτείνεται σχεδόν μέχρι σήμερα (1972-2012 ή 1972-2013), να είναι δηλαδή επικαιροποιημένη, αφού οι πρόσφατες τιμές θα είναι μετρημένες με μεγαλύτερη ακρίβεια.

7.2 Δεδομένα Εισόδου

Σε προηγούμενο κεφάλαιο (4^ο) περιεγράψαμε τα δεδομένα που χρειάζεται να προετοιμαστούν πριν χρησιμοποιήσουμε το υδρολογικό μοντέλο SWAT. Αυτά αφορούσαν το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους καλής χωρικής ανάλυσης, τις χρήσεις γης κατά CORINE σε ψηφιακή μορφή, το ψηφιακό αρχείο εδάφους και φυσικά τα τελικά μετεωρολογικά δεδομένα. Για τα τρία πρώτα δεδομένα, η προετοιμασία τους έχει ολοκληρωθεί και κατά την έναρξη ενός νέου «πρότζεκτ SWAT», δεν απαιτείται επιπλέον επεξεργασία τους, αφού εργαζόμαστε στο ίδιο περιβάλλον λογισμικού ArcGIS.

Κατά την έναρξη ενός νέου υδρολογικού σεναρίου (project) SWAT, αυτό που πρέπει αρχικά να προσέξει ο χρήστης είναι να εργαστεί σε συμβατό σύστημα αναφοράς με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα του, στην περίπτωση μας στο ΕΓΣΑ '87 ή όπως περιγράφεται από το σύστημα «Greek Grid». Πρώτα ο χρήστης επιλέγει με τη δημιουργία νέου πρότζεκτ την δημιουργία γεωβάσης (Geodatabase) που θα περιλαμβάνονται όλα τα δεδομένα, που είτε θα εισάγουμε είτε θα δημιουργήσουμε, και τη δημιουργία χώρου αποθήκευσης των αρχείων σε μορφή raster (Rasterstore). Στη συνέχεια, το μοντέλο διαχωρίζεται σε πέντε κύρια βήματα και επειδή το μοντέλο είναι σειριακό, δηλαδή δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε επόμενο βήμα αν δεν έχουμε ολοκληρώσει το προηγούμενο, η εκτέλεση και τον πέντε και σε συνδυασμό με το εγχειρίδιο οδηγιών χρήσης του μοντέλου, είναι πραγματικά εύκολη. Τα πέντε αυτά βήματα αφορούν στην χάραξη του υδροκρίτη (Watershed Delineator), στην ανάλυση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU Analysis), στην εγγραφή των δεδομένων εισόδου (Write Input Tables), στην επεξεργασία των αρχείων εισόδου SWAT (Edit SWAT Input) και τέλος στη προσομοίωση του μοντέλου SWAT (SWAT Simulation).

Παρακάτω περιγράφονται κάθε ένα από τα πέντε κύρια βήματα, τις απαραίτητες ενέργειες που πρέπει να κάνει ο χρήστης και τα νέα δεδομένα που παράγονται, που όλα συνδράμουν στην κατασκευή ενός ολοκληρωμένου μοντέλου της κάθε λεκάνης. Τα βήματα αυτά εφαρμόστηκαν δύο φορές, καθώς διαθέτουμε δύο λεκάνες και να τονιστεί ότι η δημιουργία κάθε πρότζεκτ θα πρέπει να εκτελείται σε διαφορετικό φάκελο, με διαφορετικές γεωβάσεις και αρχεία Rasterstore. Το αντίθετο δημιουργεί προβλήματα στον χρήστη, αφού το πρόγραμμα συγκρατεί μόνο τις τελευταίες κάθε φορά καταχωρήσεις.

7.2.1 Χάραξη Υδροκρίτη

Στο στάδιο αυτό ανήκει ένα παράθυρο διαλόγου με πέντε κύρια βήματα τα οποία δεν είναι εκτελέσιμα αν δεν έχει ολοκληρωθεί το προηγούμενο. Κατά την εκτέλεση του πρώτου βήματος ζητείται από τον χρήστη να εισάγει (φορτώσει) το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους που έχει ήδη δημιουργήσει, ενώ μια αυτόματη πληροφορία προειδοποιεί τον χρήστη ότι το

σύστημα αναφοράς του Ψ.Μ.Ε. θα πρέπει να είναι ίδιο με αυτό που αρχικά επιλέξαμε κατά τη δημιουργία του πρότζεκτ. Στη συνέχεια μπορούμε να ελέγξουμε τις ρυθμίσεις προβολής του Ψ.Μ.Ε. και να δούμε τις μονάδες μετρήσεις του συστήματος και να τις αλλάξουμε αν το επιθυμούμε. Ταυτόχρονα, μπορούμε να δούμε την χωρική ανάλυση του, που στην περίπτωση μας ήταν πολύ καλή και μάλιστα της τάξης των $5 \times 5 \text{ m}^2$. Το πρώτο βήμα ολοκληρώνεται με την επιλογή της περιοχής που θέλουμε να ασχοληθούμε (μάσκα) σχεδιάζοντας είτε χειροκίνητα το πλαίσιο που περιλαμβάνει τη λεκάνη μας, πάνω στο Ψ.Μ.Ε., αλλιώς αν έχουμε ήδη έτοιμο αρχείο ορίων μπορούμε να το «φορτώσουμε». Το εργαλείο αυτό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που το Ψ.Μ.Ε. είναι πολύ μεγάλο και αναφέρεται σε ευρύτερη περιοχή, νομό, ή και ολόκληρη τη χώρα, και εμείς θέλουμε να εργαστούμε σε μια μικρή περιοχή. Αν δεν υπήρχε αυτό το εργαλείο, το πρόγραμμα θα απαιτούσε πολύ χρόνο για να φορτώσει το Ψ.Μ.Ε. και μάλιστα θα δημιουργόντουσαν περισσότερες λεκάνες από τις επιθυμητές. Τέλος, ένα άλλο στοιχείο του βήματος αυτού που καλείται και «DEM Setup», δηλαδή ρύθμιση του Ψ.Μ.Ε., είναι η εισαγωγή αρχείου υδατορεμμάτων, εφόσον αυτό είναι ήδη διαθέσιμο, στην περίπτωση που επιθυμούμε να είναι διακριτά στο τελικό μας αρχείο, αλλά και να επιτύχουμε τη συνάφεια με τα δημιουργούμενα από το πρόγραμμα υδατορέματα.

Το επόμενο βήμα αφορά τη δημιουργία των υδατορρεμάτων και όλων των πιθανών εξόδων απορροής (outlets). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει για τη δημιουργία τους, είτε να πραγματοποιηθεί μέσω αυτόματης διαδικασίας που τα υδατορέματα θα σχεδιαστούν βάσει του Ψ.Μ.Ε., είτε να τα προκαθορίσει με την εισαγωγή αντίστοιχων αρχείων. Εμείς, επιλέξαμε την πρώτη επιλογή, που μέσω στατιστικών στοιχείων υπολογισμού αυτόματης κατεύθυνσης και συσσώρευσης απορροής, δημιουργούνται τα υδατορέματα και τα σημεία που διακλαδώνονται (outlets). Ταυτόχρονα, δημιουργούνται και σχεδιάζονται οι υπολεκάνες μέσα στον υδροκρίτη με τα αντίστοιχα σημεία εξόδου τους.

Στη συνέχεια, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει το σημείο ή τα σημεία εξόδου στην λεκάνη του, ώστε να σχεδιαστεί ο υδροκρίτης στο σημείο αυτό, καθώς και καταμετρούνται οι υπολεκάνες. Στην περίπτωση μας, επειδή και οι δύο λεκάνες μας είναι μικρές, δεν είναι απαραίτητο να έχουμε πολλές υπολεκάνες, και εξάλλου μονάδα αναφοράς είναι τα HRU και αυτά παίζουν το καθοριστικό ρόλο. Για το λόγο αυτό, επιλέξαμε να αφαιρέσουμε όλους τους προηγούμενους κλάδους και να κρατήσουμε μόνο το κύριο υδατόρεμμα, πετυχαίνοντας έτσι τη δημιουργία μιας υπολεκάνης, που είναι όσο η λεκάνη μας. Το σημείο εξόδου επιλέχτηκε σε κάθε περίπτωση η θέση του υδρομετρικού σταθμού. Για να το επιτύχουμε αυτό, φορτώσαμε το αρχείο που είχαμε δημιουργήσει στο ArcMap με τα σημειακά αρχεία τύπου shapefile των σταθμών. Ο λόγος που χρησιμοποιήσαμε μία λεκάνη θα μας εξυπηρετήσει σε μεταγενέστερο στάδιο κατά τον υπολογισμό της συνολικής απορροής στην έξοδο της λεκάνης.

Έπειτα, επιλέγουμε μέσω του επόμενου βήματος, το σημείο που πρωτίτερα σχεδιάσαμε και τελικά επιλέγουμε να σχεδιαστεί ο τελικός υδροκρίτης βάσει αυτού του σημείου εξόδου για την λεκάνη μας.

Στο πέμπτο και τελευταίο βήμα επιλέγουμε να υπολογίσει το σύστημα τις παραμέτρους των υπολεκανών, στην περίπτωση μας υπολεκάνης, και με την ολοκλήρωση των υπολογισμών ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο.

Στα σχήματα Β.9 και Β.10 απεικονίζονται το πλαίσιο ενεργειών του πρώτου αυτού σταδίου και ο χάρτης με τα σχεδιασμένα υδατορέματα, υδροκρίτη και έξοδο της λεκάνης.

7.2.2 Ανάλυση Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης

Επόμενο στάδιο, αποτελεί η ανάλυση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης HRU. Η δημιουργία των HRUs εκτελείται σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα αφορά την κατασκευή χαρακτηριστικών που θα υποβοηθήσουν την σύνθεση των υδρολογικών αυτών μονάδων. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να συμπληρωθούν είναι οι χρήσεις γης, τα εδάφη και οι κλίσεις, τηρουμένης πάντα αυτής της σειράς εκτέλεσης. Το δεύτερο βήμα αφορά την τελική δημιουργία των HRUs βάσει ποσοστών επικάλυψης των προηγούμενων δεδομένων.

Πιο αναλυτικά, αρχικά εισάγουμε το αρχείο χρήσεων γης που έχουμε ήδη ετοιμάσει (και αυτό, όπως όλα τα αρχεία στο ίδιο σύστημα αναφοράς), και αφού το πρόγραμμα αποκόψει αυτόματα το υπόβαθρο CORINE, καλούμαστε να επιλέξουμε την τιμή αναφοράς των χρήσεων γης που θα εμφανιστεί, ουσιαστικό των κωδικό (CODE_00_NUM) που περιγράφει τη κάθε χρήση. Το πρόγραμμα, αφού συναθροίσει τις περιοχές με ίδιο κωδικό χρήσης γης, μας ζητάει να ταξινομήσουμε τους κωδικούς αυτούς με αντίστοιχους χρήσεων γης του SWAT. Το δύσκολο σε αυτή την περίπτωση είναι ότι δεν υπάρχει κάποιος έτοιμος πίνακας να δείχνει άμεση αντιστοίχιση των χρήσεων γης κατά CORINE με αυτές κατά SWAT. Η μόνη λύση είναι η μελέτη μία προς μία όλων των χρήσεων γης που διαθέτει το SWAT και κατόπιν βάσει της περιγραφής από το CORINE να κάνουμε μια προσεγγιστική αντιστοίχιση. Αναφέρουμε τον όρο προσεγγιστική για το CORINE περιέχει κατηγορίες χρήσεων γης πιο γενικές, ειδικά για τις αγροτικές-γεωργικές χρήσεις, ενώ αντίθετα το SWAT περιλαμβάνει μια μεγάλη λίστα με πολλές καλλιέργειες, αλλά και ήδη βλάστησης που συναντώνται κυρίως στις Η.Π.Α. Η αντιστοίχιση δεν ήταν εύκολη και χρειάστηκε να επιλέξουμε μέσα από περισσότερες από 100 χρήσεις γης για να επιτύχουμε ορθή αντιστοίχιση. Επίσης, να αναφέρουμε ότι οι χρήσεις γης χωρίζονται σε καλλιέργειες και αστική χρήση, απλώς οι χρήσεις στην δεύτερη περίπτωση είναι πιο διακριτές να αντιστοιχηθούν.

Στον Πίνακα A.1 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης κατά CORINE που συναντώνται και στις δύο λεκάνες (κάποιες χρήσεις δεν υπάρχουν στην μία και αντίστροφα). Οι 14 αυτές χρήσεις γης ύστερα από μελέτη και τη συμβουλή άλλων μελετών καταλήξαμε να τις ταξινομήσουμε, όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 7.1 που παρατίθεται παρακάτω.

Από τον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε ότι χρειάστηκε να αντιστοιχίσουμε έξι χρήσης γης CORINE με τρεις του SWAT. Αυτό έγινε γιατί κάποιες χρήσεις δεν μπορούσαν να περιγραφούν αλλιώς. Τέλος, να αναφέρουμε ότι η χρήση γης μη αρδευόμενης αρόσιμης γης, δηλαδή μη ποτιζόμενης γης που ωστόσο καλλιεργείται, ταίριαζε στα χαρακτηριστικά με τα σιτηρά (Winter-wheat), αφού αυτό το είδος φυτοκάλυψης με ίδια χαρακτηριστικά αναπτύσσεται και ευδοκιμεί στην περιοχή μελέτης και γενικώς στη Θεσσαλία. Στο Σχήμα B.11 απεικονίζεται ο χάρτης χρήσεων γης κατά SWAT και για τις δύο λεκάνες.

Πίνακας 7.1: Ταξινόμηση των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης από CORINE σε SWAT

A/A	CORINE		SWAT	
	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	112	Ασυνεχής αστικός ιστός	URML	Residential Land Medium/Low Density
2	211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	WWHT	Winter-wheat
3	231	Λιβάδια	AGRC	Agricultural Land Crop, Close-Grown
4	242	Σύνθετες καλλιέργειες	AGRL	Agricultural Land Generic
5	243	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	AGRL	Agricultural Land Generic
6	311	Δάσος πλατύφυλλων	FRSD	Forest Deciduous
7	312	Δάσος κωνοφόρων	FRSE	Forest Evergreen
8	313	Μικτό δάσος	FRST	Forest Mixed
9	321	Φυσικοί βοσκότοποι	PAST	Pasture
10	322	Θάμνοι και χερσότοποι	RNGE	Range Grass
11	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	FRST	Forest Mixed
12	324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	RNGB	Range Brush
13	332	Απογυμνωμένοι βράχοι	BERM	Bermuda
14	333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	BERM	Bermuda

Στη συνέχεια, απαιτείται η εισαγωγή του χάρτη εδαφών. Τα εδάφη, που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο αναλυτικά οι τύποι που συγκεντρώνονται στην περιοχή μελέτης και ο αντίστοιχος χάρτης, έχει διαπιστωθεί από προγενέστερες μελέτες (Πικούνης, 2002) ότι ελάχιστα επηρεάζουν το μοντέλο. Ο χάρτης κρίνεται εξαιρετικά αναλυτικός και αυτό απαιτεί ομαδοποίηση των ειδών για να καταφέρουμε τελικά να τα αντιστοιχίσουμε με τους εδαφικούς τύπους του SWAT. Για το λόγο αυτό προτείνεται, ένας πιο γενικευμένος διαχωρισμός των εδαφολογικών στοιχείων που προτείνεται από τον Παγκόσμιο Εδαφολογικό Χάρτη του FAO. Ο χάρτης αυτός περιλαμβάνει 26 διαφορετικά είδη εδάφους και περιέχει πληροφορίες για την ονομασία τους, την κοκκομετρία του εδάφους, το εδαφικό προφίλ και την κλίση, στοιχεία χρήσιμα για τη δημιουργία νέου τύπου εδάφους στο πρόγραμμα και την συμπλήρωση αντίστοιχων παραμέτρων. Τα εδαφολογικά δεδομένα των λεκανών ομαδοποιήθηκαν τελικά σε μία κατηγορία με την ονομασία «Luvisol». Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ανοιχτόχρωμα εδάφη με έντονη αργιλική στρώση και περιλαμβάνει διάφορες κατηγορίες εδαφών, όπως σκληρούς ασβεστόλιθους, τριτογενείς αποθέσεις γνεύσιους, σχιστόλιθους, περιδοτίτες και ψαμμιτικούς φλύσχεις. Επομένως, ο χάρτης εδαφών που εισήχθηκε περιείχε ουσιαστικά ένα τύπο εδάφους, με την γενικότερη ονομασία Luvisol. Οι πληροφορίες που αντλήθηκαν από υπάρχουσα μελέτη που αναφέρεται σε ευρύτερη περιοχή που περιλαμβάνει και τις λεκάνες απορροής Πύλης και Μουζακίου φαίνονται στο Σχήμα Β.12.

Προφανώς, ο τύπος εδάφους αυτός δεν υπάρχει στους διαθέσιμους του SWAT, που αναφέρονται σε αμερικάνικα τύποι εδαφών (US Soils) και για το λόγο αυτό και εφόσον μας δίνεται η δυνατότητα, θα δημιουργήσουμε ένα νέο τύπο με το όνομα Luvisol και σε αυτόν θα συμπληρώσουμε κάποια απαραίτητα στοιχεία, ενώ στη συνέχεια θα τον ταξινομήσουμε. Τα στοιχεία αυτά αφορούν το βάθος ριζοστρώματος (SOL_ZMX), σε πόσα επίπεδα (NLAYERS) αυτό χωρίζεται και πόσο είναι το πάχος του καθενός (SOL_Z), την υδρολογική ομάδα που ανήκει (HYDGRP), καθώς καθορίζει την υδατοπερατότητα του, ενώ για κάθε επίπεδο συμπληρώσαμε το ποσοστό οργανικού άνθρακα (SOL_CBN), το ειδικό βάρος (Bulk Density) για υγρό έδαφος (SOL_BD), το ποσοστό του πετρώματος που περνά από κόσκινο 2 mm (ROCK), τη λευκαύγεια της εδαφικής επιφάνειας (SOL_ALB), το συντελεστή διάβρωσης (USLE_K), τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία για τα φυτά (SOL_AWC), η περιεκτικότητα % σε άμμο (SAND), ίλυ (SILT) και άργιλο (CLAY) και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται συμπληρωμένες οι τιμές αυτές.

Soil Component Parameters		
SNAM	NLAYERS	HYDGRP
LUVISOLS	3	B
SOL_ZMX (mm)	ANION_EXCL (fraction)	SOL_CRK (m3/m3)
1500	0.5	0.5
TEXTURE		
SICL-C-C		

Soil Layer Parameters		
Soil Layer: 1		
SOL_Z (mm)	SOL_BD (g/cm ³)	SOL_AWC (mm/mm)
500	1.55	0.26
SOL_CBN (% wt.)	SOL_K (mm/hr)	CLAY (% wt.)
1	12.17	13
SILT (% wt.)	SAND (% wt.)	ROCK (% wt.)
53	33	5
SOL_ALB (fraction)	USLE_K	SOL_EC (dS/m)
0.06	0.43	0

Σχήμα 7.2: Τα στοιχεία της εδαφικής κατηγορίας Luvisol. Τα ίδια στοιχεία συμπληρώνονται για κάθε 500 mm πάχους ριζοστρώματος (500-1000-1500).

Έπειτα, μας δίνεται η δυνατότητα να εκφράσουμε το ανάγλυφο μέσω αντίστοιχων κλίσεων του εδάφους. Οι διαφορετικές κλίσεις του αναγλύφου επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες βροχόπτωσης-απορροής. Ειδικότερα, σε λεκάνες με ήπιο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις ο χρόνος συγκέντρωσης του περισεύματος βροχής είναι μικρός και κατά συνέπεια η πιθανότητα διήθησης μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η ποσότητα φερτών υλικών. Αντίθετα αποτελέσματα αναμένονται σε ομαλό ανάγλυφο με μικρές κλίσεις. Για την αναπαράσταση του αναγλύφου και των κλίσεων της κάθε λεκάνης απορροής μας δόθηκε η δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακού χάρτη με τις διάφορες κλίσεις της υπό μελέτη λεκάνης, επιλέγοντας έναν αριθμό κλάσεων και στοιχειοθετώντας τα αντίστοιχα όρια της κάθε κλάσης που αντιστοιχεί σε κλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, αποφασίσαμε να χωρίσουμε τη κάθε λεκάνη σε πέντε ζώνες κλίσεων και αυτές είναι εκφρασμένες σε % : 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-99. Επιλέξαμε αυτό τον διαχωρισμό, γιατί με διάφορες δοκιμές διαπιστώσαμε ότι ήταν η

βέλτιστη επιλογή για το ανάγλυφο της περιοχής μας, ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί πιο διακριτά η κλίση μιας περιοχής. Στο Σχήμα Β.13 απεικονίζεται ο χάρτης κλίσεων που μόλις αναφέραμε.

Με την δημιουργία του χάρτη κλίσεων ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος της δημιουργίας των HRUs. Ο χρήστης επιλέγει να πραγματοποιηθεί επικάλυψη (overlapping) των τριών αυτών δημιουργημένων χαρτών που ουσιαστικά θα αποτελέσει την βάση για την δημιουργία των HRUs.

Η δημιουργία HRUs ολοκληρώνεται με τον διαχωρισμό της λεκάνης σε μικρότερα τμήματα κοινών χαρακτηριστικών χρήσεων γης, εδαφικών προτύπων και κλίσεων, τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται αυτόματα από το μοντέλο χρησιμοποιώντας την επικάλυψη των ψηφιακών χαρτών. Συγκεκριμένα, γίνεται μια αρχική επικάλυψη του ψηφιακού χάρτη χρήσεων γης σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης ή της κάθε υπολεκάνης και συνέχεια πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία επίθεσης του ενός χάρτη πάνω στον άλλο για τον χάρτη των εδαφών σε αυτόν των χρήσεων γης και των κλίσεων σε αυτόν των εδαφών. Αυτό που πρέπει να ορίσει ο χρήστης είναι τα ελάχιστα ποσοστά επικάλυψης για την κατασκευή της κάθε μονάδας υδρολογικής απόκρισης.

Αναλυτικότερα η διαδικασία αυτή είναι ως εξής: αρχικά ορίζει ο χρήστης το ελάχιστο ποσοστό χρήσης γης που να ορίζει ένα HRU, για παράδειγμα για 5% δημιουργούνται αρχικά «μονάδες» που θα περιλαμβάνουν ακέραιο αριθμό επί του 5% για το συνολικό ποσοστό της κάθε χρήσης. Για να γίνει πιο κατανοητό, για 22% ποσοστό χρήσεων γης «AGRL», σημαίνει ότι θα έχουμε 4 μονάδες με αυτή τη χρήση, ενώ για 3% «BERM» δεν θα έχουμε καμία μονάδα. Στη συνέχεια, ορίζεται ένα αντίστοιχο ποσοστό εδάφους πάνω σε κάθε μονάδα χρήσης που πρωτίτερα ορίστηκε και ισχύει το ίδιο και τέλος, ένα ποσοστό κλίσεων πάνω στο σε κάθε μονάδα εδάφους-χρήσης γης. Τελικά, έχουμε τη δημιουργία των HRUs και ο αριθμός τους καθορίζεται από τον ακέραιο αριθμό αυτό.

Ύστερα από πολλαπλές επιλογές και στο σημείο που εξασφαλίζεται ο καλύτερος αριθμός HRUs, επιλέξαμε τα ποσοστά επικάλυψης 7-7-7 (%) για τη λεκάνη της Πύλης και 5-7-7(%) για τη λεκάνη του Μουζακίου. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία 16 HRUs για τη λεκάνη Πύλης και 20 για τη λεκάνη του Μουζακίου.

7.2.3 Εγγραφή Δεδομένων Εισόδου

Προχωρώντας στο επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης του νέου μας πρότζεκτ SWAT, θα πρέπει να καταγράψουμε με κάποιο τρόπο τα κλιματικά δεδομένα που έχουμε συγκεντρώσει και έχουμε επεξεργαστεί, όπως περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η επιλογή «Μετεωρολογικοί Σταθμοί» μας επιτρέπει να εισάγουμε τους πινάκες των δεδομένων που έχουμε ήδη προετοιμάσει. Η φόρμα εισαγωγής που ανοίγει χωρίζεται σε πέντε μέρη, που όμως δεν είναι απαραίτητο να συμπληρωθούν όλα και ούτε απαιτείται συγκεκριμένη σειρά. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τα στοιχεία του μέσου σταθμού της λεκάνης (Weather Generator Data), δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου.

Αναλυτικότερα, η συμπλήρωση των στοιχείων του μέσου σταθμού ή αλλιώς της γεννήτριας των μετεωρολογικών δεδομένων, βάσει του οποίου θα προσομοιωθούν όλα τα κλιματικά δεδομένα της λεκάνης, απαιτεί αρχείο τύπου dbf (database file) συγκεκριμένης μορφοποίησης που θα περιέχει το όνομα του σταθμού και τις συντεταγμένες του. Με άλλα λόγια, τα δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και τα υπόλοιπα κλιματικά δεδομένα, θα προσομοιώσουν την απορροή της λεκάνης από ένα σημείο, στο οποίο έχουν γίνει ήδη οι απαραίτητες αναγωγές. Έτσι λοιπόν, συμπληρώνεται το όνομα του αρχείου αυτού μαζί με τη θέση του στο δίσκο και το πρόγραμμα εντοπίζει το αρχείο, διαβάζει το όνομα του μέσου

σταθμού και εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς. Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι ο μέσος σταθμός θα πρέπει να έχει κατασκευαστεί μέσω του SWAT, και να καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων του. Αυτό εκτελείται μέσω του επόμενου σταδίου (Edit SWAT Input), ωστόσο σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται να τηρήσουμε τη σειριακή εκτέλεση των εντολών του μοντέλου, και να δημιουργήσουμε ένα σταθμό με το όνομα που δώσαμε και στο αρχείο και που θα περιλαμβάνει διάφορα στατιστικά σχετικά με τον σταθμό αυτό. Αν δεν έχουμε δημιουργήσει σταθμό με το όνομα που έχει το αρχείο γεννήτριας μετεωρολογικών δεδομένων, το πρόγραμμα, αφού δεν βρίσκει κάποια αντιστοιχία, δεν μπορεί να ολοκληρώσει την καταγραφή. Στο επόμενο εδάφιο θα παρουσιαστούν περισσότερα σχετικά με τη δημιουργία του μέσου σταθμού της λεκάνης και τα δεδομένα που απαιτούνται για την συμπλήρωση του.

Έπειτα, προχωρούμε στην καταγραφή των δεδομένων βροχόπτωσης (Rainfall Data). Στο κομμάτι αυτό της φόρμας δεν καταχωρήσουμε απευθείας τις ημερήσιες βροχοπτώσεις, αλλά θα συμπληρώσουμε το όνομα και τη θέση ενός αρχείου και πάλι τύπου dbf, που θα περιλαμβάνει αυτή τη φορά το όνομα του αρχείου που έχουμε δημιουργήσει για τα τελικά δεδομένα βροχόπτωσης, ενώ επίσης διαθέτει στοιχεία για τον μέσο σταθμό (συντεταγμένες και σταθμικό μέσο υψόμετρο). Παράλληλα, επιλέγουμε το χρονικό βήμα (ημερήσιο), καθώς και την εντολή «Raingages», ότι δηλαδή τα δεδομένα θα προκύψουν από βροχομετρικό σταθμό. Παρακάτω, φαίνεται ένα παράδειγμα μορφοποίησης του αρχείου αυτού για την λεκάνη Πύλης.

Πίνακας 7.2: Το περιεχόμενο του αρχείου που δημιουργήσαμε για τα βροχομετρικά δεδομένα της λεκάνης Πύλης.

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	PYLI_PCP	290405.158	4371760.887	800.985

Το όνομα του αρχείου «PYLI_PCP» είναι το αρχείο dbf που δημιουργήσαμε και που περιλαμβάνει δύο στήλες με την ημερομηνία (DATE) και τα ημερήσια ανηγμένα κατακρημνίσματα (PCP). Τα ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα είναι συνεχή και συμπληρωμένα. Αν είχαμε κενά το πρόγραμμα θα μπορούσε να δώσει τιμές σε αυτά από τα υπόλοιπα ατμοσφαιρικά δεδομένα και απλά θα έπρεπε να σημειώσουμε τον αριθμό των κενών ημερών πριν την εκτέλεση (run) της προσομοίωσης του μοντέλου.

Ανάλογα, συμπληρώνουμε και τα θερμοκρασιακά δεδομένα με αντίστοιχο αρχείο ίδιου τύπου και μορφής, μόνο που αλλάζει το όνομα του αρχείου θερμοκρασιών. Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τρεις στήλες με τα ημερήσια δεδομένα μέγιστης (MAX) και ελάχιστης (MIN) θερμοκρασίας, ανά ημερομηνία. Επιλέξαμε δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, γιατί όπως έχουμε αναφέρει θα χρησιμοποιήσουμε τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με την μέθοδο Hargreaves. Για το λόγο αυτό δεν απαιτείται και συμπλήρωση των υπολοίπων μετεωρολογικών δεδομένων (σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου) και οπότε δεν τα συμπληρώσαμε.

Τέλος, να τονιστεί ότι τα αρχεία καλό είναι να βρίσκονται στο ίδιο φάκελο, ειδικά τα αρχεία που δεν γνωρίζει το σύστημα τη θέση τους (π.χ. PYLI_PC), γιατί κάτι αντίθετο θα καθυστερούσε αρκετά το πρόγραμμα κάθε φορά που θα εκτελούνταν το μοντέλο. Το στάδιο ολοκληρώνεται με την εγγραφή των δεδομένων αυτών στο σύστημα του μοντέλου.

Να συμπληρώσουμε, επίσης, ότι ο χρήστης μπορεί από το ίδιο μενού εκτός από τα μετεωρολογικά δεδομένα να καταχωρήσει δεδομένα ποιότητας των υδάτων, εδαφών, χημικής

σύστασης εδαφών, διαχείρισης, υπογείων υδάτων, φερτών υλικών και άλλα, ή απλά να τα επανεγγράψει αν έχει πραγματοποιήσει αλλαγές σε κάποια από αυτά.

7.2.4 Επεξεργασία Δεδομένων Εισόδου SWAT

Το μενού για την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου SWAT είναι πολύ σημαντικό, γιατί ο χρήστης μπορεί να κάνει τις επιλογές του σχετικά με τη διαχείριση των αρχείων του προγράμματος και είτε να δημιουργήσει νέα δεδομένων στην βάση δεδομένων του μοντέλου, στην περίπτωση που τα ήδη υπάρχοντα από το μοντέλο δεν τον καλύπτουν, είτε να διαχειριστεί δεδομένα του υδροκρίτη, ταμιευτήρων κλπ. και να πραγματοποιήσει αλλαγές.

Ο χρήστης μπορεί να ανοίξει την βάση δεδομένων του SWAT και να διαχειριστεί ορισμένα δεδομένα. Αυτά αφορούν τα εδάφη (User Soils), στις χρήσεις γης που αφορούν καλλιέργειες (Land Cover/Plant Growth), στις αστικές χρήσεις γης (Urban), στους μετεωρολογικούς σταθμούς (User Weather Stations), αλλά και άλλα δεδομένα όπως φυτοφάρμακα, λιπάσματα κ.ά. Ο όρος «User» χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για να κάνει διαχωρισμό των δεδομένων που παρέχονται από το πρόγραμμα και αυτών που μπορεί να εισάγει από διαφορετική βάση έτοιμα και παρέχονται, κυρίως για τις Η.Π.Α., από την ομάδα που εξελίσσει το μοντέλο. Εδώ δημιουργήσαμε και διαχειριστήκαμε τα εδάφη και τους σταθμούς.

Το νέο έδαφος «Luvisol», που εισάγουμε στο πρόγραμμα, αναλύθηκε ήδη η διαδικασία και τα απαιτούμενα δεδομένα. Όσον αφορά το μέσο σταθμό της κάθε λεκάνης, αυτός δημιουργήθηκε συμπληρώνοντας μια αρκετή μεγάλη λίστα παραμέτρων, που κάποιες μάλιστα είναι δύσκολες και δυσέρευτες. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από το όνομα του σταθμού, έπρεπε να συμπληρωθούν οι συντεταγμένες σε προβολικό σύστημα αναφοράς, δηλαδή σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος (σε μοίρες), το σταθμικό μέσο υψόμετρο του σταθμού (σε μέτρα), το χρονικό διάστημα της ιστορικής χρονοσειράς (σε έτη), καθώς και ένα πλήθος ακόμη παραμέτρων που αφορούσε τον μέσο όρο κάθε μήνα του έτους βάσει της ιστορικής χρονοσειράς. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

1. η μέση μέγιστη θερμοκρασία
2. η μέση ελάχιστη θερμοκρασία
3. ο μέσος όρος της τυπικής απόκλισης της μέγιστης θερμοκρασίας
4. ο μέσος όρος της τυπικής απόκλισης της ελάχιστης θερμοκρασίας
5. η μέση βροχόπτωση
6. ο μέσος όρος της τυπικής απόκλισης της βροχόπτωσης
7. ο μέσος όρος του συντελεστή ασυμμετρίας της βροχόπτωσης (skewness coefficient)
8. η πιθανότητα μιας υγρής μέρας μετά από μια ξηρή
9. η πιθανότητα μιας υγρής μέρας μετά από μια υγρή
10. ο μέσος αριθμός υγρών/βροχερών ημερών
11. ο μέσος όρος μέγιστου ύψους βροχόπτωσης 30 λεπτών
12. η μέση ηλιακή ακτινοβολία
13. η μέση ταχύτητα ανέμου
14. η μέση τιμή της θερμοκρασίας σημείο δρόσου.

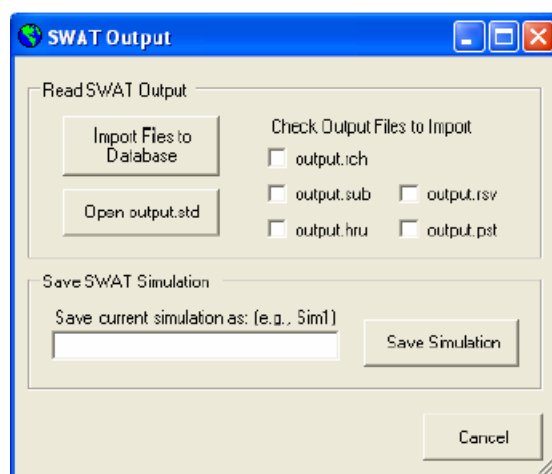
Τα δεδομένα αυτά, αν και φαινομενικά διαθέσιμα απαιτούν πολύ δουλειά για να προετοιμαστούν έτσι όπως ζητούνται και πολλές υπολογιστικές πράξεις. Ωστόσο, καταφέραμε με δύο προγράμματα και τα εργαλεία τους να μειώσουμε τις διαδικασίες.

Αρχικά, τα δεδομένα των τριών τελευταίων παραμέτρων τα έχουμε ήδη έτοιμα, αφού τα δεδομένα που είχαμε διαθέσιμα αφορούσαν μόνο μηνιαίους μέσους όρους. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήσαμε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel, και εκτελώντας την επιλογή για κατασκευή πινάκων Pivot, μπορέσαμε άμεσα και εύκολα να υπολογίσουμε τον μέσο όρο κάθε μήνα από τα ημερήσια δεδομένων 22 ετών. Όμοια, για να υπολογίσουμε τις τυπικές αποκλίσεις και τον συντελεστή ασυμμετρίας. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους χρησιμοποιήσαμε το στατιστικό πρόγραμμα «pcpSTAT» που βρήκαμε σαν προτεινόμενο στον διαδικτυακό χώρο του SWAT, αφού είχε προβληματίσει και άλλους ερευνητές ο υπολογισμός τους. Για τον υπολογισμό των μέσων μέγιστων μηνιαίων βροχοπτώσεων μισής ώρας, η ερευνητική ομάδα πρότεινε και άλλο πρόγραμμα, ωστόσο, προτιμήσαμε την επεξεργασία του μέσω πινάκων Pivot και από ωριαία δεδομένα που αντλήσαμε από την βιβλιοθήκη της Ιτιάς και αφορούσε το σταθμό Αργιθέα. Με αναγωγές και επεξεργασία προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, τα ωριαία δεδομένα μπήκαν σε πίνακα Pivot και με την εντολή «MAX» μας επέλεξε αυτομάτως τις μέγιστες ωριαίες βροχοπτώσεις της μιας ώρας για κάθε μήνα όλης της χρονοσειράς, ενώ στο τέλος υπολογίστηκε η τελική μέγιστη ωριαία βροχόπτωση του κάθε μήνα από όλα τα έτη. Το ωριαίο ύψος αυτό, αφού θεωρήσαμε ότι κατανέμεται ομοιόμορφα και με την ίδια ένταση μέσα στην μία ώρα, υπολογίσαμε το μέγιστο ύψος βροχής μισής ώρας.

Τέλος, να αναφέρουμε ότι ο χρήστης μπορεί να διαχειριστεί και να αλλάξει και άλλες παραμέτρους που έχουν υπολογιστεί κατά την εγγραφή των δεδομένων εισόδου ή και να αλλάξει τον τρόπο υπολογισμού τους. Εμείς, χρησιμοποιώντας την επιλογή για τα δεδομένα υδροκρίτη (Watershed Data), επιλέξαμε να αλλάξουμε τον τρόπο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής από Penman-Monteith που είναι η προεπιλογή σε Hargreaves.

7.2.5 Προσομοίωση SWAT

Το μοντέλο ουσιαστικά ολοκληρώνεται με την προσομοίωση. Αποτελεί το τελευταίο στάδιο των βημάτων και ο χρήστης επιλέγοντας να «τρέξει» το μοντέλο, ορίζει την αρχή και το τέλος της ιστορικής χρονοσειράς, ενώ παράλληλα καλείται να επιλέξει το χρονικό βήμα ανάγνωσης των αποτελεσμάτων (εμείς επιλέξαμε μηνιαίο). Έπειτα, επιλέγει το μοντέλο να πραγματοποιήσει ελέγχους για τη σωστή εκτέλεση και λειτουργία του, αν δηλαδή υπάρχουν ελλείψεις ή σφάλματα, και κατόπιν «τρέχει» το μοντέλο. Επιλέγοντας από το μενού να διαβάσουμε τα αποτελέσματα, μπορούμε να αντλήσουμε πολύτιμες πληροφορίες για το προσομοιωμένο μας μοντέλο που αφορά τη λεκάνη μας, και μεταξύ αυτών και την απορροή. Η φόρμα ανάγνωσης των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3: Φόρμα ανάγνωσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης του SWAT

Με την επιλογή ανάγνωσης του αρχείου «output.rch», ο χρήστης μπορεί να αναγνώσει τις μηνιαίες απορροές κάθε υπολεκάνης, και στην περίπτωση μας που έχουμε μόνο μία, τα τελικά δεδομένα συμπίπτουν με τα αναγραφόμενα (FLOW_OUT). Τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν τώρα να ελεγχθούν και επομένως, αν δεν πληρούν τις προϋποθέσεις καταλληλότητας, να επαναληφθεί η διαδικασία, αφού πρώτα γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου που τρέξαμε.

7.3 Βαθμονόμηση Μοντέλου

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες απορροές της λεκάνης με τις παρατηρημένες και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απορροής της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Ως μέτρο σφάλματος χρησιμοποιείται ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination), που είναι το τυπικό μέτρο καλής προσαρμογής υδρολογικών μοντέλων (Nash & Sutcliffe, 1970).

Ο τύπος «3.44» που αναφέραμε στο 3^ο κεφάλαιο, προσαρμόζεται για τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες απορροές ως εξής (εδώ συμβολίζεται με *Eff* αντί για R^2 από το «efficient»):

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (7.1)$$

όπου: Q_{obs_i} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , Q_{sim_i} η υπολογισμένη απορροή του μήνα i και \bar{Q}_{obs} η μέση παρατηρημένη απορροή για την περίοδο της προσομοίωσης.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση Nash-Sutcliffe στα εξαγόμενα προσομοιωμένα αποτελέσματα από το μοντέλο κάθε λεκάνης, χωρίς να πραγματοποιήσουμε βαθμονόμηση, πήραμε τα εξής αποτελέσματα:

1. για την λεκάνη της Πύλης ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε ίσος με 0.7657 για περίοδο μελέτης τριών υδρολογικών ετών (10/1985-09/1988) και 0.7412 η επαλήθευση για περίοδο τριών υδρολογικών ετών (10/1991-09/1994).
2. για τη λεκάνη του Μουζακίου ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε ίσος με 0.8103 για περίοδο μελέτης τριών υδρολογικών ετών (10/1988-09/1991) και 0.7760 η επαλήθευση για περίοδο τριών υδρολογικών ετών (10/1991-09/1994).

Τα αποτελέσματα μπορεί να δείχνουν μια καλή προσομοίωση, ωστόσο επιθυμούσαμε να πετύχουμε συντελεστή συσχέτισης πάνω από 0.8, μιας και το δείγμα παρατηρημένων απορροών είναι πολύ μικρό. Μάλιστα, για τη λεκάνη του Μουζακίου το δείγμα παρατηρημένων απορροών είναι ακόμη μικρότερο, αφού το δείγμα δεν είναι συνεχές (διακόπτεται από μη μετρημένες παρατηρήσεις) και μπορούμε να εφαρμόσουμε τον συντελεστή μόνο σε συμπληρωμένα έτη, αλλιώς παρουσιάζεται σφάλμα (μπορεί και αρνητικά αποτελέσματα).

Για να βαθμονομήσουμε το μοντέλο το πρόγραμμα μας επιτρέπει, αφού «τρέξουμε» το μοντέλο είτε να επιλέξουμε μια χειροκίνητη βαθμονόμηση, είτε μια αυτόματη. Ωστόσο, προτιμήσαμε να μην εφαρμόσουμε την αυτόματη βαθμονόμηση, καθώς το δείγμα μας είναι πολύ μικρό και οι αλλαγές που θα πραγματοποιηθούν θέλουμε να έχουν στατιστική σημασία. Δεν επιθυμούμε απλά το μοντέλο μας να προσαρμόζει τις προσομοιωμένες του απορροές με

τις παρατηρημένες. Για το λόγο αυτό, ασχοληθήκαμε με την χειροκίνητη βαθμονόμηση, που είναι πολύ πιο επίπονη και απαιτεί αρκετές επαναλήψεις.

7.3.1 Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης

Μελετώντας τη λειτουργία του μοντέλου και έχοντας ως γνώμονα άλλες διπλωματικές και μεταπτυχιακές μελέτες που ασχολήθηκαν με το μοντέλο SWAT, διαπιστώσαμε ότι πέρα από τις πολλές παραμέτρους που υπάρχουν δεν επηρεάζουν όλες το μοντέλο. Ο Πίνακας 7.3 που ακολουθεί παρουσιάζει την ανάλυση ευαισθησίας της λειτουργίας του προσομοιωμένου μοντέλου για γειτονική λεκάνη (Αθανασία, 2010) των 9 παραμέτρων που κρίθηκαν στατιστικά σημαντικές και που επιβεβαιώνεται από άλλες μελέτες.

Πίνακας 7.3: Συνοπτική περιγραφή αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας για τη λεκάνη του Αγραφιώτη (Πηγή: Αθανασία, 2010)

Παράμετρος	Επίδραση στην επιφανειακή απορροή	Επίδραση στην υπόγεια απορροή
Αριθμός καμπύλης (CNII)	Πολύ μεγάλη	Μεγάλη
Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K)	Μέτρια	Μεγάλη
Διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC)	Πολύ μεγάλη	Μεγάλη
Παράγοντας Άλφα (ALFA_BF)	Ασήμαντη	Πολύ μικρή
Υστέρηση υπογείου Νερού (GW_DELAY)	Ασήμαντη	Μικρή
Συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP)	Ασήμαντη	Μέτρια
Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG_DP)	Ασήμαντη	Μέτρια
Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφορέα (GW_SPYLD)	Ασήμαντη	Μικρή
Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN)	Ασήμαντη	Μικρή

Αναλυτικά, οι παράμετροι αυτοί χωρίζονται σε αρχεία υπογείου νερού, σε αρχεία εδάφους και σε αρχεία υπολεκανών.

Τα αρχεία υπογείου νερού (*.gw) ρυθμίζουν την κίνηση του υπογείου νερού μέσα στις στρώσεις του επιφανειακού, ελεύθερου υδροφορέα και του βαθύ υδροφορέα, αλλά και τις κινήσεις από τη μία στρώση στην άλλη. Ο επιφανειακός, ελεύθερος υδροφορέας επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα και ο βαθύς, περιορισμένος υδροφορέας τροφοδοτεί τα υδατορεύματα εκτός λεκάνης απορροής, ενώ πάνω από τον επιφανειακό υδροφορέα βρίσκεται η ριζική ζώνη. Παρακάτω περιγράφονται οι 6 παράμετροι που αναφέραμε:

1. Παράγοντας Άλφα (Alpha factor - ALPHA_BF): Η παράμετρος αυτή ρυθμίζει την καμπύλη ύψους της παροχής του υπογείου νερού. Μεταβάλλεται από 0 έως 1 και λαμβάνει μικρές τιμές (κοντά στο 0) για απότομη καμπύλη ύψους.

2. Χρόνος υστέρησης υπογείου νερού (GW_DELAY): Είναι ο χρόνος σε ημέρες που απαιτείται για το νερό που φεύγει από το βάθος ριζοστρώματος μέχρι να φτάσει στον επιφανειακό υδροφόρα. Η παράμετρος αυτή επηρεάζει σημαντικά το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.
3. Συντελεστής επανατροφοδότησης υπογείου νερού (Revar Coefficient - GW_REVAP): Η μεταβλητή αυτή ελέγχει τον όγκο του νερού που θα κινηθεί από τον αβαθή υδροφόρα προς τη ζώνη ριζοστρώματος ως αποτέλεσμα της έλλειψης εδαφικής υγρασίας και της πρόσληψης νερού από δέντρα και θάμνους με βαθιές ρίζες. Όσο η παράμετρος αυτή πλησιάζει το μηδέν, η κίνηση του νερού προς τη ριζική ζώνη περιορίζεται και αντιστρόφα. Η τιμή του μεταβάλλεται από 0.02 έως 0.2.
4. Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφόρα (RCHRG_DP): Η παράμετρος αυτή ορίζει το ποσοστό του νερού της ριζικής ζώνης που τροφοδοτεί το βαθύ υδροφόρα. Λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.
5. Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN): Η παράμετρος αυτή εκφράζει το όριο του νερού στο ρηχό υδροφόρα (mm) που απαιτείται για να συμβεί επιστρέφουσα ροή. Η ροή του υπογείου νερού στο υδατόρευμα επιτρέπεται μόνο αν το βάθος του νερού στον επιφανειακό υδροφόρα είναι ίσο ή μεγαλύτερο του GWQMN.
6. Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφόρα (GW_SPYLD): Η μεταβλητή αυτή ορίζεται ως ο όγκος του νερού που αποστραγγίζεται με τη βοήθεια της βαρύτητας προς το συνολικό όγκο βράχου (m^3/m^3). Η παράμετρος αυτή έχει μηδαμινή επίδραση στην απορροή.

Τα αρχεία εδάφους (*.sol) περιέχουν όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την εδαφική σύσταση της περιοχής. Τα εδαφικά αρχεία επηρεάζουν την προσομοίωση σε ότι αφορά στο υδατικό ισοζύγιο όπου υπεισέρχονται παράγοντες όπως η υδατοπερατότητα του εδάφους και η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα. Οι δύο σημαντικοί παράμετροι που αναφέραμε είναι οι παρακάτω:

1. Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC): Αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο του υδατικού ισοζυγίου. Εκφράζεται ως ο όγκος του νερού που διατίθεται στα φυτά, όταν το έδαφος βρίσκεται σε υδατοϊκανότητα και υπολογίζεται ως το νερό που ελευθερώνεται μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μόνιμης μάρανσης.
2. Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K): Η μεταβλητή αυτή περιγράφει την ευκολία κίνησης του νερού στο έδαφος όταν είναι κορεσμένο, συνδέοντας την ταχύτητα ροής του νερού στο έδαφος με την εδαφική κλίση. Όσο αυξάνεται η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα συνήθως ακολουθεί και μικρή αύξηση της συνολικής απορροής της λεκάνης.

Τέλος, τα αρχεία υπολεκανών (*.sub) περιέχουν παραμέτρους που σχετίζονται με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των μονάδων υδρολογικής απόκρισης. Η σημαντικότερη παράμετρος αυτών είναι ο αριθμός καμπύλης CN για την υδρολογική κατάσταση II και μάλιστα είναι η πιο συνήθης παράμετρος που απαιτεί ρύθμιση. Οι αριθμοί CN διαβάζονται από το αρχείο δεδομένων cn.dbf ανάλογα με τη χρήση γης που επικρατεί στη μονάδα υδρολογικής απόκρισης και αντιστοιχούν στην υδρολογική κατάσταση II. Οι αριθμοί αυτοί προσαρμόζονται ανάλογα με την εκάστοτε υγρασία εδάφους, αλλά και με βάση την κλίση του εδάφους, κάθε φορά που εκτελείται μια προσομοίωση. Όσο αυξάνεται ο αριθμός καμπύλης ακολουθεί και αύξηση της επιφανειακής απορροής και κατά συνέπεια αύξηση των πλημμυρικών αιχμών.

7.3.2 Βέλτιστες τιμές παραμέτρων

Όπως αναφέραμε η βαθμονόμηση του μοντέλου και για τις δύο λεκάνες έγινε χειροκίνητα διορθώνοντας τιμές των παραμέτρων που αναφέραμε και ελέγχοντας την συμπεριφορά της μεταβολής τους στην τελική απορροή. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων προέκυψαν ύστερα από περισσότερες από 40 δοκιμές βαθμονόμησης για την λεκάνη Πύλης, ενώ αντίστοιχα εργαστήκαμε και για τη λεκάνη του Μουζακίου με λιγότερες βαθμονομήσεις ωστόσο, χρησιμοποιώντας τελικά τις ίδιες τιμές για τις παραμέτρους. Οι παράμετροι τελικά που χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτές εντοπίστηκαν οι βέλτιστες τιμές που προσομοιώνουν καλύτερα το μοντέλο, είναι πέντε και είναι η διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC), ο παράγοντας Άλφα (ALFA_BF), ο χρόνος υστέρησης υπογείου νερού (GW_DELAY), το κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG_DP) και ο αριθμός καμπύλης CN για την υδρολογική κατάσταση II (CNII).

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων αυτών που αφορούσαν και τις δύο λεκάνες είναι οι ακόλουθες:

1. SOL_AWC=0.24, από 0.26 που ήταν η αρχική τιμή της παραμέτρου
2. ALFA_BF=0.075, από 0.048 που ήταν η αρχική τιμή της παραμέτρου
3. GW_DELAY=14, από 31 που ήταν η αρχική τιμή της παραμέτρου
4. RCHRG_DP=0.01, από 0.05 που ήταν η αρχική τιμή της παραμέτρου
5. για τον αριθμό CNII για κάθε χρήση γης για τη λεκάνη Πύλης: AGRL=75 από 77, FRSD=65 από 66, FRST=58 από 55, RNGE=61 από 69 και FRSE=55 από 55.
6. για τον αριθμό CNII για κάθε χρήση γης για τη λεκάνη Μουζάκι: AGRL=75 από 77, FRSD=65 από 66, FRST=58 από 55, PAST=65 από 69, WWHT=71 από 73, RNGB=61 από 61 και FRSE=57 από 55.

Να σημειωθεί ότι οι τιμές του αριθμού καμπύλης CNII δεν λήφθησαν τυχαία, αλλά επιλέχθηκαν από το εγχειρίδιο δεδομένων εισόδου του SWAT (Input/Output File Documentation Soil and Water Assessment Tool, 2009) για τη βαθμονόμηση της απορροής του μοντέλου παραθέτοντας πίνακες που αντιστοιχίζουν κάποιες γενικευμένες χρήσεις γης, όπως τα δάση, θαμνώδης εκτάσεις, καλλιέργειες κλπ. με αριθμούς καμπύλης CNII, ανάλογα με την υδρολογική ομάδα του εδάφους (A, B, C, D), την υδρολογική κατάσταση (poor, fair, good) και διακρίνοντας κάποια είδη της χρήσης γης, για παράδειγμα για τα δάση μπορούν να διακριθούν σε φτωχής υδρολογικής κατάστασης αν είναι καλυμμένο με κλαδιά και φύλλα, αποτελείται από μικρά δέντρα και θάμνους που καταστρέφονται από βόσκηση ή φωτιές, μέτριας για δάση που οι θάμνοι βόσκονται αλλά δεν καίγονται και μέτρια κάλυψη εδάφους από κλαδιά και φύλλα και τέλος καλής υδρολογικής κατάστασης για δάση που προστατεύονται από την βόσκηση και τα φύλλα και θάμνοι καλύπτουν επαρκώς το έδαφος. Τέλος, να αναφέρουμε ότι μόνο η τιμή στην χρήση γης «FRSE» (Forest Evergreen) διαφοροποιήθηκε για τις δύο λεκάνες, καθώς η τιμή ίση με 57 που χρησιμοποιείται στη λεκάνη του Μουζακίου, για την λεκάνη της Πύλης μείωνε τον συντελεστή συσχέτισης, και το αντίστροφο ίσχυε για την λεκάνη του Μουζακίου.

Τελικά, με τις βελτιστοποιημένες τιμές αυτές των παραμέτρων ο συντελεστής συσχέτισης πήρε τις παρακάτω τιμές (με ακρίβεια 10^{-4}) για την κάθε λεκάνη:

1. για την λεκάνη της Πύλης ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε ίσος με 0.8006 για περίοδο μελέτης τριών υδρολογικών ετών (10/1985-09/1988) και 0.7681 η επαλήθευση για περίοδο τριών υδρολογικών ετών (10/1991-09/1994).

2. για τη λεκάνη του Μουζακίου ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε ίσος με 0.8200 για περίοδο μελέτης τριών υδρολογικών ετών (10/1988-09/1991) και 0.7874 η επαλήθευση για περίοδο τριών υδρολογικών ετών (10/1991-09/1994).

Οι τιμές αυτές του συντελεστή ήταν οι βέλτιστες που μπορούσαν να εκτιμηθούν.

Στο Παράρτημα Β των Σχημάτων παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης παρατηρημένων-προσομοιωμένων απορροών, καθώς και τα αντίστοιχα υπολειμματικά σφάλματος και για τις δύο λεκάνες (Σχ.Β.14.α και β και Σχ.Β.15.α και β αντίστοιχα).

7.4 Μελέτη Χαρακτηριστικών Ξηρασίας Ιστορικής Χρονοσειράς

Όπως υποδείξαμε και στο 5^ο κεφάλαιο, θα μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά ξηρασίας με τη βοήθεια του δείκτη SDI (Streamflow Drought Index), που ουσιαστικά εκτιμάει την ξηρασία από μια χρονοσειρά απορροών. Γενικά, υπολογίζεται ένας δείκτης για περίοδο αναφοράς του έτους, και συγκρίνεται με βάση μια κλίμακα σοβαρότητας ξηρασίας ανάλογα με την τιμή του δείκτη SDI. Η περίοδος αναφοράς μπορεί να αφορά 3 μήνες, 6 μήνες, 9 μήνες ή ολόκληρο το υδρολογικό έτος, από την έναρξη πάντα του υδρολογικού έτους, δηλαδή Οκτώβριος-Δεκέμβριος, Οκτώβριος-Μάρτιος, Οκτώβριος-Ιούνιος και Οκτώβριος-Σεπτέμβριος. Η εξίσωση περιέχει σαν μεταβλητή την αθροιστική απορροή του κάθε έτους, τον μέσο όρο του ιστορικού δείγματος για μεγάλη χρονοσειρά και την τυπική της απόκλιση και ορίζεται ως:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad i=1,2,\dots \quad k=1,2,3,4 \quad (7.1)$$

όπου, $V_{i,k}$ είναι ο αθροιστικός όγκος απορροής για το υδρολογικό έτος i και για την περίοδο αναφοράς k , με $k=1$ περίοδο αναφοράς Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου, $k=2$ για Οκτώβριο-Μάρτιο, $k=3$ για Οκτώβριο-Ιούνιο και $k=4$ για Οκτώβριο-Σεπτέμβριο, και ορίζεται από τον τύπο :

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i=1,2,\dots \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \quad (7.2)$$

με $Q_{i,j}$ η χρονοσειρά των μηνιαίων όγκων απορροής, i το υδρολογικό έτος και j ο μήνας εντός του υδρολογικού έτους, \bar{V}_k και s_k είναι ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του αθροιστικού όγκου απορροής, αντίστοιχα, για την περίοδο αναφοράς k , όπως αυτά εκτιμώνται για μακρόχρονη περίοδο.

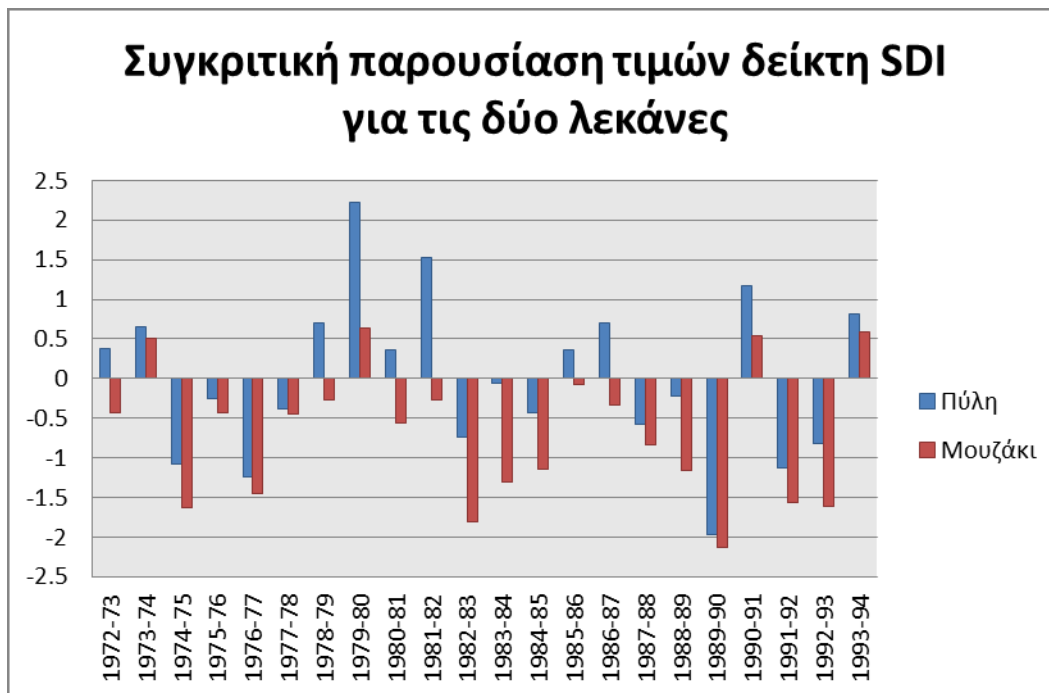
Βάσει των παραπάνω εξισώσεων και έχοντας τελικά εκτιμήσει μέσα από τη διαδικασία που αναφέρθηκε τις τελικές προσομοιωμένες απορροές του ιστορικού δείγματος 1972-1994 και για τις δύο λεκάνες, Πύλης και Μουζακίου, προχωρήσαμε στην εκτίμηση του δείκτη υδρολογικής ξηρασίας SDI.

7.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων με βάση τον δείκτη SDI

Στο σημείο αυτό ασχοληθήκαμε με τον υπολογισμό των τιμών του δείκτη SDI για κάθε λεκάνη ξεχωριστά, ενώ στο τέλος συγκρίναμε τις τιμές και σχολιάσαμε τον συσχετισμό τους.

Ειδικότερα, υπολογίσαμε πρώτα τους αθροιστικούς όγκους απορροής από τον τύπο 7.2, για περίοδο αναφοράς $k=4$, δηλαδή για όλο το υδρολογικό έτος. Τελικά, υπολογίσαμε 22 τιμές για κάθε λεκάνη $V_{i,4}$, όπου $i=1,\dots,22$ τα έτη του ιστορικού δείγματος. Στη συνέχεια, υπολογίσαμε βάσει των υπολογισμένων αθροιστικών απορροών, την μέση τιμή του δείγματος αυτού και την τυπική απόκλιση. Τελευταίο βήμα αποτελούσε η εφαρμογή της εξίσωσης 7.1

και τελικά ο υπολογισμός 22 τιμών δεικτών SDI, για κάθε λεκάνη. Οπότε και έχουμε το παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 7.4).



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα συγκριτικής παρουσίασης τιμών δείκτη SDI (SDI states) για τις λεκάνες Πύλης και Μουζακίου για την έκφραση της υδρολογικής ξηρασίας.

Παραθέτουμε, επίσης και τον πίνακα που παρουσιάστηκε στο 5^ο κεφάλαιο (Πίνακας 5.1) για καλύτερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.4: Περιγραφή των κατηγοριών κατάταξης των επεισοδίων υδρολογικής ξηρασίας με βάση τον δείκτη SDI (Πηγή: Nalbantis, 2008).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ (%)
0	Μη-ξηρασία	$SDI \geq 0.0$	50.0
1	Ήπια ξηρασία	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1
2	Μέτρια ξηρασία	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2
3	Σοβαρή ξηρασία	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4
4	Ακραία ξηρασία	$SDI < -2.0$	2.3

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα για την περίοδο 1972-1994:

- για την λεκάνη της Πύλης έχουμε τα εξής: (α) μέτρια ξηρασία ($-1.5 \leq SDI < -1.0$) για τα έτη 1974-75, 1976-77, 1992-93 και (β) σοβαρή ξηρασία ($-2.0 \leq SDI < -1.5$) για το έτος 1989-90
- για την λεκάνη του Μουζακίου έχουμε τα εξής: (α) μέτρια ξηρασία ($-1.5 \leq SDI < -1.0$) για τα έτη 1976-77, 1983-84, 1984-85, 1988-89, (β) σοβαρή ξηρασία ($-2.0 \leq SDI < -1.5$) για τα έτη 1974-75, 1982-83, 1991-92, 1992-93 και (γ) ακραία ξηρασία ($SDI < -2.0$) για το έτος 1989-90
- για τη συγκριτική παρουσίαση των δύο λεκανών, για διαφορές μεγαλύτερες από 0.5 μονάδες κατά απόλυτη τιμή, μόνο για τα γεγονότα ξηρασίας, έχουμε τα εξής: μεγάλες

διαφορές μεταξύ των λεκανών για τα έτη 1982-83 (ήπια ξηρασία στην Πύλη-σοβαρή στο Μουζάκι), 1983-84 (ήπια Πύλη-μέτρια Μουζάκι) και 1988-89 (ήπια Πύλη-μέτρια Μουζάκι).

Ανάλογα θα εφαρμόσουμε τον δείκτη και για τις εξαγόμενες υπολογισμένες απορροές από το μοντέλο για μελλοντικό χρονικό ορίζοντα δύο περιόδων, 2020-2050 και 2070-2100.

8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε και τον ουσιαστικό στόχο της παρούσας Διπλωματικής, τη μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια, στην παραγωγή μελλοντικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας και την εφαρμογή σε αυτές των εκτιμώμενων μεταβολών σύμφωνα με τα αντίστοιχα σενάρια εκπομπών αερίων, τη σύνθεση των τελικών απορροών για κάθε ένα από τα σενάρια μέσω του υπολογιστικού μοντέλου SWAT και τέλος, τον υπολογισμό των αντίστοιχων δεικτών SDI για την μελέτη της ξηρασίας με βάση τη σοβαρότητα της με τον τρόπο που έχει περιγραφεί προωύτερα.

8.2 Παραγωγή Μελλοντικών Χρονοσειρών

Όπως έχουμε αναφέρει οι κλιματικές αλλαγές βάσει των σεναρίων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μελετώνται για τις χρονικές περιόδους 2020-2050 και 2070-2100. Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε τις μελλοντικές απορροές σε χρονικό ορίζοντα των δύο αυτών περιόδων 30 ετών θα πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε με κάποιο τρόπο τις χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για χρονική διάρκεια περισσότερων από εκατό ετών, από την ιστορική χρονοσειρά. Η παραγωγή μελλοντικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών. Η μέθοδος αυτή για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα με τη χρήση του υπολογιστικού υποσυστήματος Κασταλία που βρίσκεται στον Υδρογνώμονα.

8.2.1 Η Κασταλία για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών

Η Κασταλία ως υποσύστημα του λογισμικού Υδρογνώμων εκκινείται μέσω του περιβάλλοντος του. Το εργαλείο αυτό επιτρέπει τη σύνθεση χρονοσειρών με βάση μια ιστορική χρονοσειρά και ένα μοντέλο που προεπιλέγεται ανάμεσα στα δύο που προσφέρονται. Αυτά είναι το μοντέλο αυτοσυσχέτισης (AR) και το μοντέλο συμμετρικών κινούμενων μέσων όρων (SMA). Εμείς επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το δεύτερο και αυτό γιατί έχει αποδειχθεί ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε τέτοιου είδους μελέτες.

Πιο συγκεκριμένα, τα μοντέλα αυτά εφαρμόζουν τη θεωρία των στοχαστικών ανεξίτητων για την πρόγνωση των υδρομετεωρολογικών διεργασιών και τη θεώρηση αυτών ως τυχαίες μεταβλητές, κάτι που δεν μπορούσε να γίνει με τη χρήση προσδιοριστικών μοντέλων. Τα στοχαστικά αυτά υδρολογικά μοντέλα, που αποτελούνται από ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν στατιστικά τις συσχετίσεις των υδρολογικών διεργασιών, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους, εφαρμόζονται για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών που θα είναι συνεπείς με τις ιστορικές, δηλαδή αναπαράγουν την στατιστική δομή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων υδρολογικών διεργασιών.

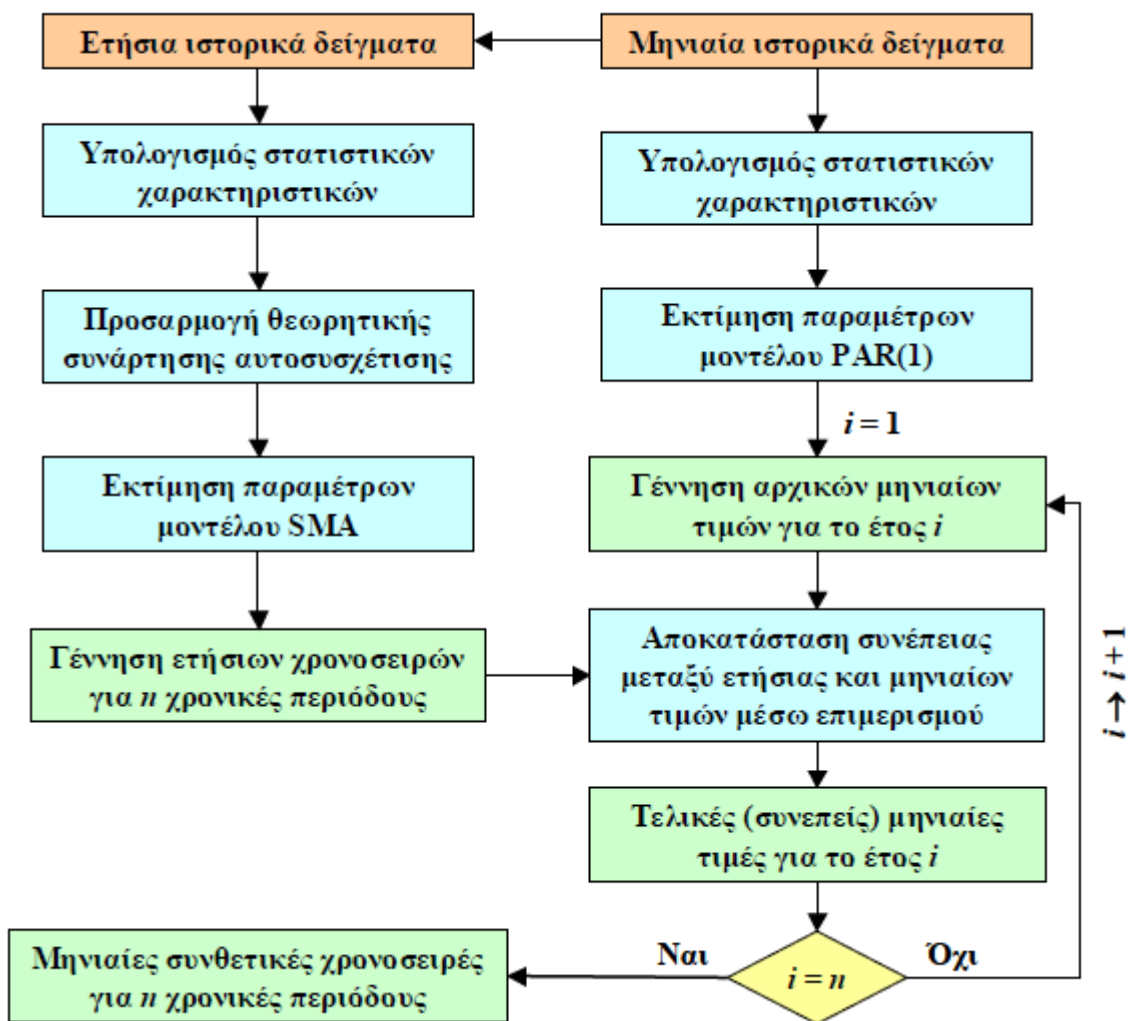
Το μαθηματικό σύστημα της Κασταλίας πληροί όλες τις απαιτήσεις που πρέπει να έχει ένα τέτοιο σύστημα ώστε να αναπαράγει τα χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών διαφόρων μεταβλητών που αναφέρονται σε χωρικά καταναμημένα στοιχεία των

υδροσυστημάτων. Η παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών γίνεται σε δύο χρονικά επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο γεννώνται συνθετικές χρονοσειρές ετήσιας κλίμακας μέσω μοντέλων που αναπαράγουν το φαινόμενο της εμμοής, ενώ στο δεύτερο επίπεδο γεννώνται συνθετικές χρονοσειρές μηνιαίου βήματος, μέσω μοντέλων που αναπαράγουν την ενδοετήσια περιοδικότητα των αντίστοιχων διεργασιών. Η Κασταλία αναπαράγει το σύνολο των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών δεδομένων, δηλαδή τις μέσες τιμές, διασπορές, συντελεστές ασυμμετρίας, συντελεστές αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης, που θα πρέπει να διατηρούνται αναλλοίωτες. Ωστόσο, στην πράξη, είναι αναπόφευκτη η εμφάνιση μικρών αποκλίσεων ως προς ορισμένα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών και συνθετικών δειγμάτων, στην περίπτωση που η εκτίμηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τα εν λόγω χαρακτηριστικά δεν γίνεται αναλυτικά αλλά προσεγγιστικά (μέσω βελτιστοποίησης). Το μοντέλο διατηρεί την χωρική και χρονική εξάρτηση των μεταβλητών, καθώς αναπαράγει όλες τις ουσιώδεις συνδιασπορές, δηλαδή τις ετεροσυσχετίσεις μηδενικής τάξης και αυτοσυσχετίσεις πρώτης τάξης. Επίσης, το μοντέλο θα διατηρεί τη μακροπρόθεσμη εμμοή, ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή αλληλουχιών ξηρών ετών παρόμοιων με αυτά που παρατηρήθηκαν στην τελευταία μεγάλη ξηρασία. Η αναπαραγωγή του φαινομένου της εμμοής (φαινόμενο Hurst) θεωρείται από τα κομβικά σημεία του σχήματος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε, καθώς βασίστηκε εξ ολοκλήρου σε πρωτότυπη ερευνητική εργασία. Η διατήρηση της μακροπρόθεσμης εμμοής επιτυγχάνεται με προσαρμογή ενός κατάλληλου θεωρητικού αυτοσυσχετογράμματος στις ετήσιες μεταβλητές και την σύζευξη αυτού με ένα σχήμα γέννησης κινούμενων μέσων όρων.

Στο μοντέλο γέννησης συνθετικών χρονοσειρών γίνεται χρήση της κατανομής γάμα τριών παραμέτρων που θεωρείται κατάλληλη τόσο για μηνιαίες όσο και για ετήσιες υδρολογικές μεταβλητές, δεδομένου ότι ορίζεται μόνο για θετικές τιμές της μεταβλητής και μπορεί να αναπαράγει την ασυμμετρία των ιστορικών δειγμάτων. Οι μηνιαίες χρονοσειρές θα πρέπει να είναι συνεπείς με τις ετήσιες. Στο μοντέλο, παρόλο που σε πρώτη φάση οι μηνιαίες μεταβλητές παράγονται ανεξάρτητα από τις ετήσιες (και μάλιστα με εφαρμογή διαφορετικών σχημάτων προσομοίωσης), στην συνέχεια ανάγονται μέσω μιας μεθοδολογίας επιμερισμού, έτσι ώστε για κάθε προσομοιωμένο έτος το άθροισμα των συνθετικών μηνιαίων τιμών να ισούται με την αντίστοιχη συνθετική ετήσια τιμή. Ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο εισάγονται τα μηνιαία ιστορικά δείγματα των μεταβλητών, βάσει των οποίων προκύπτουν τα αντίστοιχα ετήσια. Αρχικά, υπολογίζονται τα δειγματικά στατιστικά χαρακτηριστικά, σε μηνιαία αλλά και σε ετήσια βάση. Κατόπιν, για κάθε ετήσια μεταβλητή ορίζεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, η οποία περιγράφει την μακροπρόθεσμη εμμοή της αντίστοιχης υδρολογικής διεργασίας. Η δομή της αυτοσυσχέτισης αναπαράγεται μέσω ενός στάσιμου μοντέλου συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων (μοντέλο SMA), οι παράμετροι του οποίου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ετήσιων ιστορικών χρονοσειρών. Το μοντέλο SMA, που είναι γενικευμένο ώστε να προσαρμόζεται σε πολυμεταβλητά σχήματα προσομοίωσης, χρησιμοποιείται για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών σε όλες τις θέσεις και για όλον τον χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης.

Η στοχαστική προσομοίωση των μηνιαίων μεταβλητών βασίζεται στη χρήση ενός περιοδικού μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης (PAR(1)) διατυπωμένο ως πολυμεταβλητό. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των μηνιαίων ιστορικών χρονοσειρών. Η παραγωγή των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, που προϋποθέτει την ολοκλήρωση της γέννησης των ετήσιων συνθετικών τιμών, πραγματοποιείται σε στάδια. Πρώτα, το μοντέλο PAR(1) παράγει 12 μηνιαίες τιμές για κάθε ένα έτος ξεχωριστά, οι οποίες προφανώς δεν είναι συνεπείς με τις αντίστοιχες ετήσιες. Επομένως, για την αποκατάσταση της συνέπειας, εφαρμόζεται μια διαδικασία γραμμικής αναγωγής (μοντέλο επιμερισμού), μέσω της οποίας οι μηνιαίες συνθετικές τιμές

διορθώνονται, ώστε αθροιστικά να ισούνται με την αντίστοιχη ετήσια. Η διαδικασία αυτή γέννησης μηνιαίων τιμών επαναλαμβάνεται για όλα τα έτη, οπότε και προκύπτει ένα τελικό συνθετικό δείγμα μηνιαίων τιμών που είναι συνεπές με το ετήσιο, το οποίο έχει προκύψει με εφαρμογή του μοντέλου SMA, αναπαράγοντας κατά αυτόν τον τρόπο το ιδιαίτερα κρίσιμο φαινόμενο της εμμονής. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας γέννησης συνθετικών χρονοσειρών.



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα ροής σχήματος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών για την στοχαστική προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη. (Πηγή Ευστρατιάδης κ.ά., 2005)

Κάθε νέο υδρολογικό σενάριο που δημιουργείται στο υποσύστημα Κασταλία, δηλαδή το σύνολο των πληροφοριών που συνιστούν ένα πλήρες πρόβλημα σύνθεσης χρονοσειρών, επιτρέπει στον χρήστη να διαχειριστεί τις παραμέτρους και τις μεταβλητές του συστήματος βάσει των οποίων θα δημιουργηθεί η χρονοσειρά. Ως μεταβλητή του συστήματος ορίζεται μία ή περισσότερες ιστορικές χρονοσειρές, ενώ οι παράμετροι του υδρολογικού σεναρίου αφορούν τη διαδικασία αποσύνθεσης των μητρώων συνδιασπορών, τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, το στοχαστικό μοντέλο των ετήσιων μεταβλητών και την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών.

Πιο αναλυτικά, οι παράμετροι που αναφέρονται στη διαδικασία διάσπασης των μητρώων συνδιασπορών είναι οι παρακάτω:

1. Μέγιστο επιτρεπόμενο τετραγωνικό σφάλμα: Για την αποσύνθεση των μητρώων συνδιασπορών c σε πολυμεταβλητά στοχαστικά σχήματα, δηλαδή την επίλυση μιας μητρικής εξίσωσης της μορφής $b \times b^T = c$, εφαρμόζεται μια τεχνική βελτιστοποίησης. Η εν λόγω παράμετρος εκφράζει την μέγιστη αποδεκτή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (τυπικά όρια 0.001 – 0.1).
2. Μέγιστος αριθμός εκκινήσεων από διαφορετικές (τυχαίες) τιμές: Για την προσέγγιση της ολικά βέλτιστης λύσης, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται για καθορισμένο πλήθος αρχικών τιμών (1 - 100), ώστε να εξασφαλιστεί καλύτερη προσέγγιση της ολικά βέλτιστης λύσης. Η διαδικασία διακόπτεται μόλις επιτευχθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της συνάρτησης.
3. Κριτήριο σύγκλισης αλγορίθμου βελτιστοποίησης: Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης διακόπτεται μόλις η σχετική μεταβολή της τιμής της συνάρτησης γίνει μικρότερη από την τιμή της παραμέτρου (τυπικά όρια 0.0001 – 0.01).
4. Παράμετροι αντικειμενικής συνάρτησης ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, p$): Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει τρεις όρους: (α) απόκλιση ως προς τις ετεροσυσχετίσεις, (β) απόκλιση ως προς τις διασπορές, και (γ) απόκλιση ως προς την ασυμμετρία του δείγματος. Τα $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές βάρους, με τυπικές τιμές $\lambda_1=1, \lambda_2=100, \lambda_3=0.001$, ενώ ο ακέραιος p εκφράζει την σχετική βαρύτητα του μέγιστου ως προς τον μέσο συντελεστή ασυμμετρίας (τυπική τιμή $p=8$).
5. Ελάχιστη τιμή διαγώνιου στοιχείου (τριγωνοποίηση μητρώου b): Σε πρώτη προσέγγιση, το ζητούμενο μητρώο b υπολογίζεται με τη μέθοδο τριγωνοποίησης Cholesky. Αν το μητρώο δεν είναι θετικά ορισμένο, τίθεται μια μικρή, μη μηδενική τιμή ορισμού στα διαγώνια στοιχεία του (< 0.1).

Οι παράμετροι που αναφέρονται στην παραγωγή τυχαίων αριθμών είναι:

1. Γεννήτρια αριθμών γάμμα κατανομής: Μεταξύ των δύο γεννητριών, συνίσταται ο αλγόριθμος που βασίζεται στη μέθοδο της απόρριψης.
2. Αριθμός Seed: Αρχική τιμή ("σπόρος") της ακολουθίας των τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται βοηθητικά κατά την παραγωγή τυχαίων αριθμών γάμμα κατανομής και σε ορισμένες ρουτίνες βελτιστοποίησης. Αλλάζοντας την τιμή του αριθμού Seed, παράγονται χρονοσειρές με ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά αλλά διαφορετική ακολουθία τιμών.

Επίσης, οι παράμετροι που αναφέρονται στο στοχαστικό μοντέλο των ετήσιων μεταβλητών είναι οι ακόλουθοι:

1. Επιλογή μοντέλου: Δεν συστήνεται η εφαρμογή του μοντέλου AR(1) για την στοχαστική προσομοίωση των ετήσιων διεργασιών, καθώς πρόκειται για μοντέλο βραχείας μνήμης. Αντίθετα, συστήνεται η εφαρμογή του μοντέλου συμμετρικών κινούμενων μέσων όρων (SMA), το οποίο αναπαράγει το φαινόμενο της εμμονής.
2. Εκτίμηση συντελεστών α του μοντέλου SMA: Οι συντελεστές α του μοντέλου SMA συνδέονται με την ακολουθία των αυτοσυνδιασπορών μέσω ενός συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις έχουν αναλυτική λύση με εφαρμογή της μεθόδου FFT, που προϋποθέτει μήκος αυτοσυσχετογράμματος που είναι δύναμη του 2. Διαφορετικά, επιλέγεται είτε η αναλυτική επίλυση του ολοκληρώματος Fourier (σχετικά αργή σύγκλιση) είτε η αριθμητική εκτίμηση (πολύ αργή σύγκλιση).

3. Κριτήριο σύγκλισης αριθμητικής μεθόδου: Εφόσον η εκτίμηση των συντελεστών a γίνεται αριθμητικά, ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Η εν λόγω παράμετρος αποτελεί άνω όριο της σχετικής μεταβολής της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (τυπικά όρια 0.0001 – 0.01).
4. Συντελεστής αντικειμενικής συνάρτησης: Συντελεστής βάρους του δεύτερου όρου της αντικειμενικής συνάρτησης, ο οποίος εκφράζει την τετραγωνική απόκλιση ως προς τις διασπορές (τυπική τιμή 100).
5. Μήκος αυτοσυσχετογράμματος: Συστήνεται ο ορισμός τιμής που είναι δύναμη του 2, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η ταχεία μέθοδος FFT.

Τέλος, οι παράμετροι που αναφέρονται στη γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών είναι οι εξής:

1. Πλήθος συνθετικών χρονοσειρών: Το μέγιστο πλήθος χρονοσειρών είναι ίσο με 1000, υπό την προϋπόθεση συνολικού πλήθους δεδομένων ≤ 100000 .
2. Μήκος συνθετικών χρονοσειρών: Το μέγιστο μήκος κάθε χρονοσειράς είναι ίσο με 10000 έτη, υπό την προϋπόθεση συνολικού πλήθους δεδομένων ≤ 100000 .
3. Λειτουργία μοντέλου υπό μορφή πρόγνωσης: Το πρόγραμμα υποστηρίζει δύο τρόπους εφαρμογής του σχήματος γέννησης χρονοσειρών: (α) προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, και (β) πρόγνωση με δεδομένες αρχικές συνθήκες. Στη δεύτερη περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη η ακολουθία των παρελθουσών τιμών υπό μορφή μαθηματικής δέσμευσης.
4. Μέγιστη επιτρεπόμενη αρνητική τιμή: Εφόσον ο συντελεστής ασυμμετρίας είναι ιδιαίτερα υψηλός, μπορούν να παραχθούν αρνητικές τιμές. Η εν λόγω παράμετρος εκφράζει τη μέγιστη αποδεκτή αρνητική τιμή που στη συνέχεια τίθεται ίση με μηδέν.
5. Κριτήριο σύγκλισης αλγορίθμου γέννησης μηνιαίων χρονοσειρών: Για τη διατήρηση της ασυμμετρίας και των ετεροσυσχετίσεων των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών ακολουθείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος. Η παράμετρος εκφράζει την ανοχή μεταξύ της ετήσιας και των επιμέρους μηνιαίων τιμών, ως ποσοστό της ετήσιας τυπικής απόκλισης (τυπικά όρια 0.05 – 0.5).
6. Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων: Η παράμετρος εκφράζει το όριο επαναλήψεων του αλγορίθμου, ο οποίος διακόπτεται εφόσον επιτευχθεί το κριτήριο σύγκλισης (τυπικές τιμές 50 – 5000).

Οι τιμές των παραμέτρων που τελικά επιλέχθηκαν για την δημιουργία τεσσάρων χρονοσειρών, δύο βροχόπτωσης και δύο θερμοκρασίας, 1000 ετών με βάση τις ιστορικές χρονοσειρές είναι και αυτές που συστήνονται και ως προκαθορισμένες από το σύστημα, για διευκόλυνση των χρηστών που δεν είναι εξοικειωμένοι με το μαθηματικό υπόβαθρο του προγράμματος. Ειδικότερα, οι τιμές αυτές είναι ακόλουθες:

1. Μέγιστο επιτρεπόμενο τετραγωνικό σφάλμα: 0.05
2. Μέγιστος αριθμός εκκινήσεων από διαφορετικές (τυχαίες) τιμές: 50
3. Κριτήριο σύγκλισης αλγορίθμου βελτιστοποίησης: 10^{-5}
4. Παράμετροι αντικειμενικής συνάρτησης: $\lambda_1=1$, $\lambda_2=1000$, $\lambda_3=0.001$ και $p=8$
5. Ελάχιστη τιμή διαγώνιου στοιχείου (τριγωνοποίηση μητρώου b): 0.0001
6. Γεννήτρια αριθμών γάμμα κατανομής: 3 παράμετροι
7. Αριθμός Seed: 1

8. Επιλογή μοντέλου: SMA
9. Εκτίμηση συντελεστών α του μοντέλου SMA: FFT
10. Κριτήριο σύγκλισης αριθμητικής μεθόδου: 0.0001
11. Συντελεστής αντικειμενικής συνάρτησης: 100
12. Μήκος αυτοσυσχετογράμματος: 128
13. Πλήθος συνθετικών χρονοσειρών: 1
14. Μήκος συνθετικών χρονοσειρών: 1000
15. Μέγιστη επιτρεπόμενη αρνητική τιμή: -0.5
16. Κριτήριο σύγκλισης αλγορίθμου γέννησης μηνιαίων χρονοσειρών: 0.25
17. Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων: 100

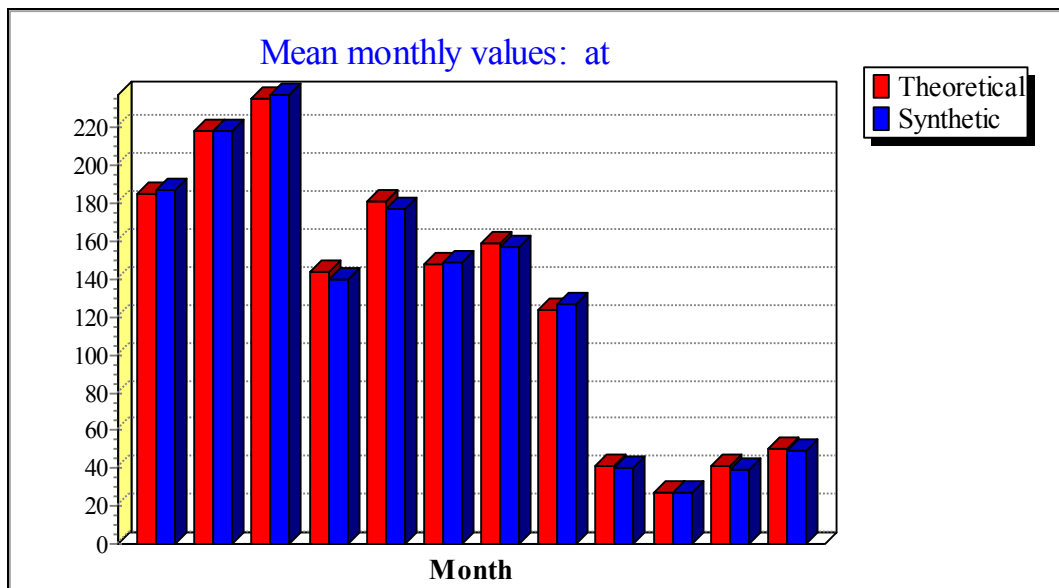
8.2.2 Οι συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας

Με την ολοκλήρωση του υποσυστήματος Κασταλία, εξάγονται τα αποτελέσματα συνθετικών χρονοσειρών σε μηνιαία κλίμακα διάρκειας 1000 ετών. Από τα 1000 αυτά έτη εμείς χρειαζόμαστε μόλις τα 80 για να κατασκευάσουμε χρονοσειρά αντίστοιχης διάρκειας που θα απευθύνεται στην περίοδο 2020-2100. Φυσικά, ένα τέτοιο αποτέλεσμα δεν εξάγεται άμεσα από το μαθηματικό μοντέλο της Καστάλιας και αυτό που θα πρέπει να κάνουμε είναι να αξιολογήσουμε πρώτα την κάθε χρονοσειρά 1000 ετών. Βέβαια, το ιδανικό θα ήταν να δημιουργήσουμε περισσότερα από εκατό σενάρια τιμών των χρονοσειρών για όλο το συνθετικό δείγμα, αλλά δυστυχώς κάτι τέτοιο στην παρούσα φάση δεν είναι εφικτό.

Από τα στατιστικά διαγράμματα, που παραθέτουμε παρακάτω, παρατηρούμε ότι το σύστημα της Κασταλίας προσεγγίζει τους μέσους όρους, ετήσιους και μηνιαίους, του θεωρητικού δείγματος στα εκτιμώμενα αποτελέσματα των συνθετικών χρονοσειρών. Ανάλογα απεικονίζονται και οι τυπικές αποκλίσεις. Να αναφέρουμε και πάλι ότι η θεωρητική χρονοσειρά είναι μία χρονοσειρά που δημιουργείται από τα ιστορικά δεδομένων χρονοσειρών και προσεγγίζει αυτά μέσω διαγράμματος ετήσιας αυτοσυσχέτισης. Με τον τρόπο αυτό διατηρούνται οι «τάσεις» της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας και βαθμονομείται το μοντέλο να προσεγγίζει τις τιμές αυτές, αλλά ουσιαστικά δεν εκτιμάται με ακρίβεια η χρονοσειρά βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για την συγκεκριμένη περίοδο 2020-2100, αφού κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό.

Παρατηρώντας τη συνθετική χρονοσειρά της βροχόπτωσης για την λεκάνη της Πύλης (Σχ. Β.16) που βρίσκεται στο Παράρτημα Σχημάτων, διαπιστώνουμε ότι διακρίνονται αυτές οι επαναλήψεις που αναφέραμε, που γίνονται πιο έντονες και πιο διακριτές στα μέγιστα και ελάχιστα. Οπότε, και δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιήσουμε ολόκληρο το δείγμα, αλλά να επιλέξουμε επισφαλώς ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 80 ετών. Εξάλλου, παρόλο που τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι μηνιαία και παρόλο που οι χρονοσειρές θα κατασκευαστούν σε ημερήσιο βήμα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις λειτουργίας του μοντέλου SWAT, οι απορροές για την εκτίμηση της ξηρασίας θα αξιολογηθούν ανά υδρολογικό έτος, για την απαλοιφή τέτοιου είδους αβεβαιοτήτων.

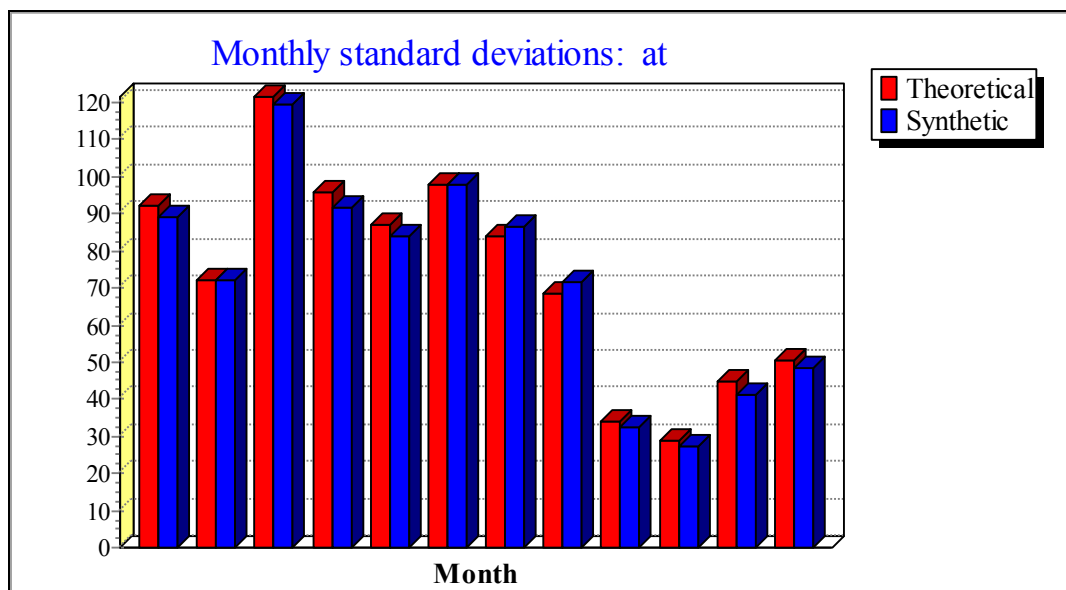
Παρακάτω, παραθέτονται δειγματικά τα διαγράμματα σύγκρισης των τιμών των μέσων όρων και τυπικών αποκλίσεων των θεωρητικών χρονοσειρών με τις συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης της λεκάνης Πύλης, με τους αντίστοιχους πίνακες μηνιαίων και ετήσιων τιμών μέσων όρων και τυπικής απόκλισης. Τα υπόλοιπα διαγράμματα χρονοσειρών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης και για τις δύο λεκάνες παραθέτονται στο Παράρτημα Β (Σχ. Β.17-21), ενώ οι αντίστοιχοι πίνακες στο Παράρτημα Α (πίνακες Α.3, Α.4 και Α.5).



Σχήμα 8.1: Μέσες μηνιαίες τιμές θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) βροχόπτωσης για την λεκάνη της Πύλης.

Πίνακας 8.1: Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για την λεκάνη της Πύλης.

	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.
Θεωρητική	185.57	218.45	235.57	143.48	181.17	147.51	159.5
Συνθετική	186.74	217.96	237.54	139.41	177.48	148.46	157.37
	Μαι.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Έτος	
Θεωρητική	123.75	40.78	27.55	41.48	50.58	1555.41	
Συνθετική	126.54	40.24	27.02	39.42	48.98	1547.16	



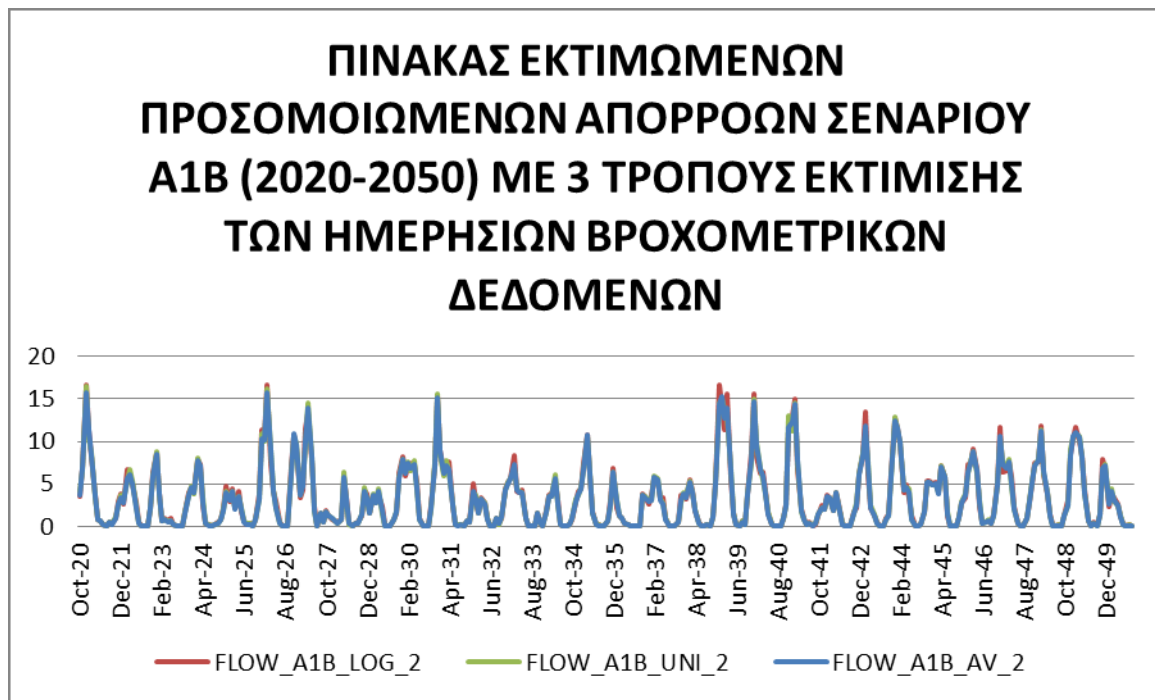
Σχήμα 8.2: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης της θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) βροχόπτωσης για την λεκάνη της Πύλης.

Πίνακας 8.2: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης της βροχόπτωσης για την λεκάνη της Πύλης.

	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.
Θεωρητική	92.08	72.22	121.58	95.68	86.91	97.99	83.86
Συνθετική	89.23	71.99	119.35	91.71	83.88	97.64	86.35
	Μαι.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Έτος	
Θεωρητική	68.27	33.94	28.96	45.06	50.39	309.13	
Συνθετική	71.46	32.51	27.45	41.17	48.22	318.16	

Οι χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας διάρκειας 80 ετών που επιλέχθηκαν είναι σε μηνιαίο βήμα. Το μοντέλο SWAT, όπως έχουμε αναφέρει, επιτρέπει σε αυτό την εισαγωγή μόνο ημερήσιων δεδομένων και επομένως οι χρονοσειρές θα πρέπει να υποκλιμακωθούν σε ημερήσιο βήμα. Η υποκλιμάκωση αυτή των μηνιαίων δεδομένων επιτεύχθηκε μέσω διαδικασιών επιμερισμού που προσφέρονται από το λογισμικό Υδρογνώμων. Ο Υδρογνώμονας μέσω της επιλογής του επιμερισμού (disaggregation) μας επιτρέπει αρχικά να επιλέξουμε αν οι μηνιαίες τιμές μας είναι αθροιστικές ή μέσοι όροι. Οι χρονοσειρές βροχόπτωσης σε μηνιαίο βήμα είναι απόρροια αθροιστικών τιμών (cumulative values) και οπότε στην συνέχεια μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε το είδος του επιμερισμού, δηλαδή αν θα πρόκειται για συνεχείς τιμές επιμερισμού ή τυχαίες τιμές. Για την πρώτη περίπτωση τίθεται για τα ημερήσια δεδομένα κάθε μήνα μία τιμή ίση με πηλίκο του μηνιαίου υετού προς τον αριθμό των ημερών. Η τιμή αυτή είναι ίδια για όλες τις μέρες του ίδιου μήνα, δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ως ο μέσος όρος των ημερήσιων τιμών κάθε μήνα. Για την δεύτερη περίπτωση, δηλαδή για τον επιμερισμό των μηνιαίων δεδομένων ως τυχαίων τιμών, μπορούν να επιλεγθούν διάφοροι τρόποι, όπως η ομοιόμορφη κατανομή (uniform), η λογαριθμική (logarithmic), η εκθετική (exponential) κ.ά. Εμείς από αυτές ασχοληθήκαμε με τις δύο πρώτες. Επίσης, οι χρονοσειρές θερμοκρασίας σε μηνιαίο βήμα είναι αποτέλεσμα μέσων όρων τιμών (average values), αφού η θερμοκρασία σαν μέγεθος δεν αθροίζεται. Και πάλι προσφέρονται οι δύο τρόποι επιμερισμού, ωστόσο δεν μπορούμε να επιλέξουμε τον επιμερισμό των τιμών ως τυχαίων, γιατί το πρόγραμμα δεν αντιλαμβάνεται ότι πρόκειται για θερμοκρασία και θέτει τυχαίες τιμές που ο μέσος όρος τους δίνει την μηνιαία τιμή. Αυτό όμως είναι λάθος, αφού το σύστημα μπορεί να δώσει τη μία μέρα μηδέν και την άλλη πενήντα και ο μέσος όρος να είναι εικοσιπέντε, κάτι που δεν έχει φυσική σημασία για τις θερμοκρασίες σε αντίθεση με τις βροχοπτώσεις. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση η μόνη επιλογή είναι ο επιμερισμός με ίδιες τιμές ημερήσιων μέσων όρων, που θα ισούνται με την μηνιαία τιμή θερμοκρασίας.

Όπως αναφέραμε, ο επιμερισμός των βροχοπτώσεων μπορεί να εφαρμοστεί είτε με την θεώρηση ως συνεχών τιμών και οπότε θέτουμε ημερήσια τιμή τον ημερήσιο μέσο όρο του μηνιαίου υετού είτε ως τυχαίων τιμών που ακολουθούν λογαριθμική ή ομοιόμορφη κατανομή. Για να γλιτώσουμε χρόνο και επαναληπτικές διαδικασίες θελήσαμε να αξιολογήσουμε τα τρία είδη επιμερισμών υπολογίζοντας τις μηνιαίες απορροές για το σενάριο A1B για την περίοδο 2020-2050 μέσω του μοντέλου SWAT. Σε αυτήν την περίπτωση δημιουργήσαμε τρεις ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης διαφορετικές ως προς τα ημερήσια δεδομένα και ίδιες ως προς τα μηνιαία, διάρκειας τριάντα ετών (2020-2050). Αφού εφαρμόστηκαν οι κλιματικές μεταβολές που θα περιγραφούν στην επόμενη ενότητα, τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας εισήχθησαν στο μοντέλο SWAT, και αφού πρώτα τρέξαμε και βαθμονομήσαμε το μοντέλο κατά τα γνωστά, θέτοντας τις ίδιες τιμές των παραμέτρων, συγκεντρώσαμε τις μηνιαίες απορροές για την κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια δημιουργήσαμε ένα συγκριτικό διάγραμμα των προσομοιωμένων απορροών που απεικονίζονται οι μηνιαίες τιμές τους για κάθε περίπτωση. Αυτό φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα σύγκρισης των υπολογισμένων απορροών για το σενάριο κλιματικών αλλαγών A1B με 3 τρόπους εκτίμησης λογαριθμική (κόκκινη), ομοιόμορφη (πράσινη) και μέσων όρων (μπλε).

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα δεν διακρίνονται σπουδαίες διαφορές, ακόμα και στην προσεκτικότερη ανάλυση σε μεγεθυμένο διάγραμμα. Διακριτές διαφορές φαίνονται μόνο στις μέγιστες τιμές των απορροών τις τάξης του ενός κυβικού μέτρου ανά δευτερόλεπτο ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) και πάλι όμως μόνο σημειακά σε όλο το δείγμα το τριάντα ετών. Με απλά λόγια ο τρόπος επιμερισμού δεν επηρεάζει τα τελικά υπολογισμένα αποτελέσματα απορροών και οι ελάχιστες διαφορές ίσως να οφείλονται σε ακραίες βροχοπτώσεις που έχει δημιουργήσει το μοντέλο (π.χ. στη λογαριθμική), οπότε και μεγαλύτερη αύξηση απορροής. Επομένως, και σύμφωνα με τα παραπάνω επιλέξαμε ως τρόπο επιμερισμού των μηνιαίων τιμών των χρονοσειρών βροχόπτωσης με τη θεώρηση ως συνεχών τιμών και τη θέση ενός ημερησίου μέσου όρου του κάθε μήνα στα ημερήσια δεδομένα.

8.3 Δεδομένα Κέντρου Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας

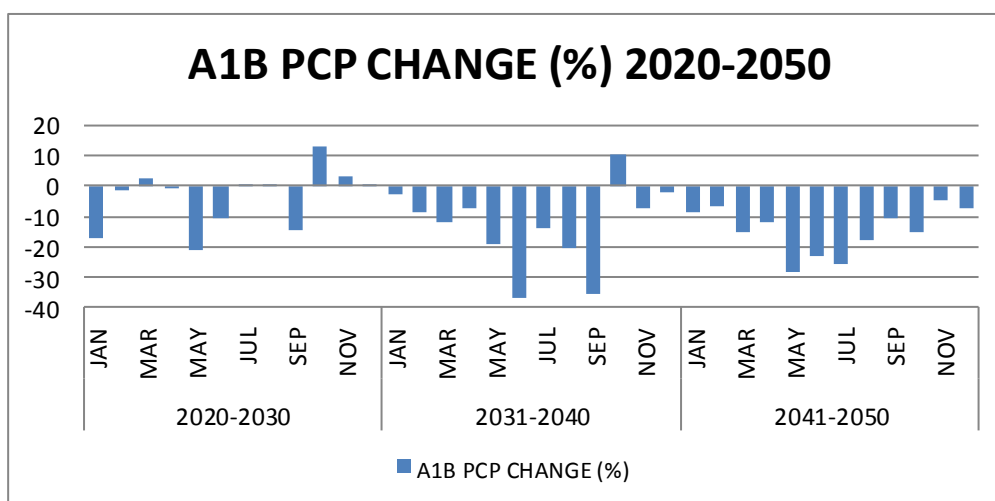
Το Κέντρο Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών, όπως αναφέραμε και στο 6^ο κεφάλαιο, μας χορήγησε τα δεδομένα των κλιματικών μεταβολών για τα σενάρια αερίων εκπομπών σύμφωνα με την IPCC. Τα δεδομένα αυτά κατασκευάστηκαν από τον διδάκτορα Κλιματολογίας και επιστημονικό συνεργάτη του Κέντρου Ερεύνες Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών, κ. Ιωάννη Καψωμενάκη, που αναφέρονταν σε χωρικό επίπεδο των λεκανών για το σενάριο A1B μέσω του προγράμματος ENSEMBLES και σε επίπεδο της ευρύτερης Θεσσαλίας, για τα σενάρια A2 και B2 μέσω του προγράμματος PRUDENCE. Ειδικότερα, οι κλιματικές μεταβολές των παραμέτρων του σεναρίου A1B εκτιμήθηκαν από 12 κλιματικά μοντέλα προσομοιώσεων σε μηνιαία κλίμακα ανά δεκαετία, δηλαδή 2020-2030, 2030-2040, 2040-2050, 2070-2080, 2080-2090 και 2090-2100. Επίσης, οι μεταβολές των δεδομένων των σεναρίων A2 και B2 εκτιμήθηκαν από 13 κλιματικά μοντέλα για το πρώτο σενάριο και 8 για το δεύτερο σε τριμηνιαία κλίμακα δεκαετιών (2070-2080, 2080-2090 και 2090-2100). Να αναφέρουμε και πάλι ότι η περίοδος 2020-2050 εκτιμήθηκε μόνο με το σενάριο A1B, αφού δεν

παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών σεναρίων για την συγκεκριμένη περίοδο. Σε κάθε περίπτωση έγινε η παραδοχή ότι οι χρήσεις γης παρέμειναν αμετάβλητες, δηλαδή δεν προβλέπονται αλλοιώσεις του φυσικού περιβάλλοντος, των δασών από πυρκαγιές και υπερβόσκηση, αύξηση των καλλιεργειών κ.ά.

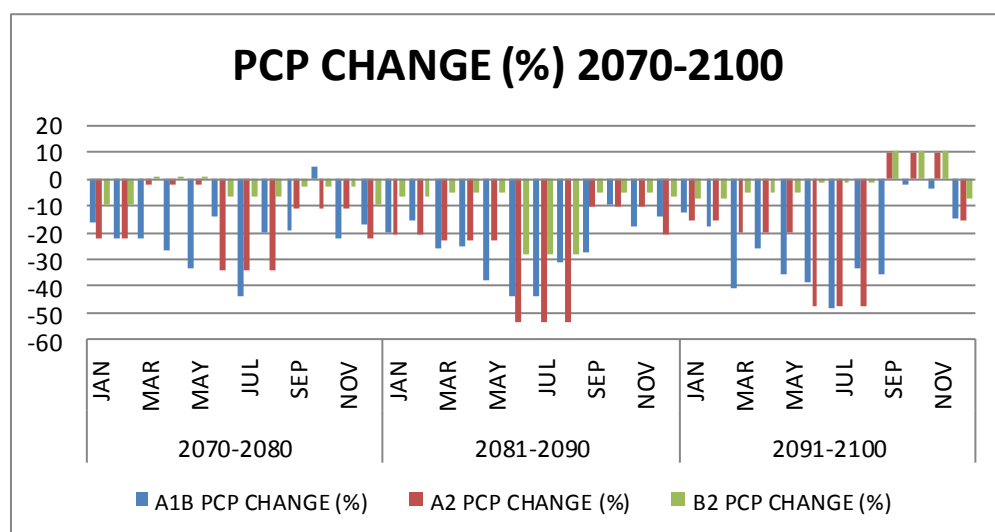
Τέλος, να αναφέρουμε ότι οι μεταβολές αυτές πραγματοποιήθηκαν στα μηνιαία δεδομένα των συνθετικών χρονοσειρών (βροχόπτωσης και θερμοκρασίας) και κατόπιν εφαρμόστηκε η μέθοδος του επιμερισμού για τα τελικά ημερήσια δεδομένα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μεταβολές των μετεωρολογικών παραμέτρων, για κάθε ένα σενάριο αερίων εκπομπών.

8.3.1 Μεταβολές βροχόπτωσης

Οι μεταβολές της βροχόπτωσης απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα ως οι ποσοστιαίες μεταβολές σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα, για κάθε περίοδο και κάθε σενάριο.



Σχήμα 8.4: Οι ποσοστιαίες μεταβολές της βροχόπτωσης (%) για την περίοδο 2020-2050 για το σενάριο A1B. (Πηγή: Καψωμενάκης, 2013)

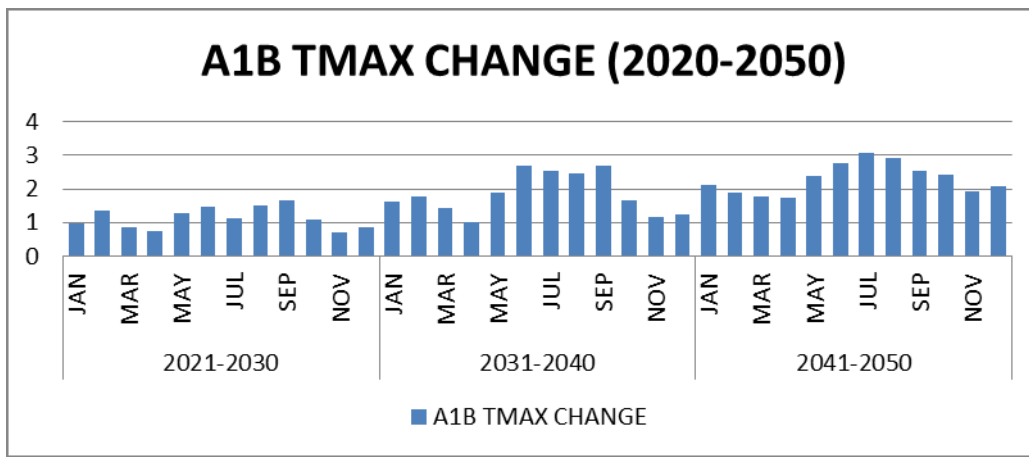


Σχήμα 8.5: Οι ποσοστιαίες μεταβολές της βροχόπτωσης (%) για την περίοδο 2070-2100 για τα 3 σενάρια A1B, A2 και B2. (Πηγή: ΚΕΦΑΚ, 2011)

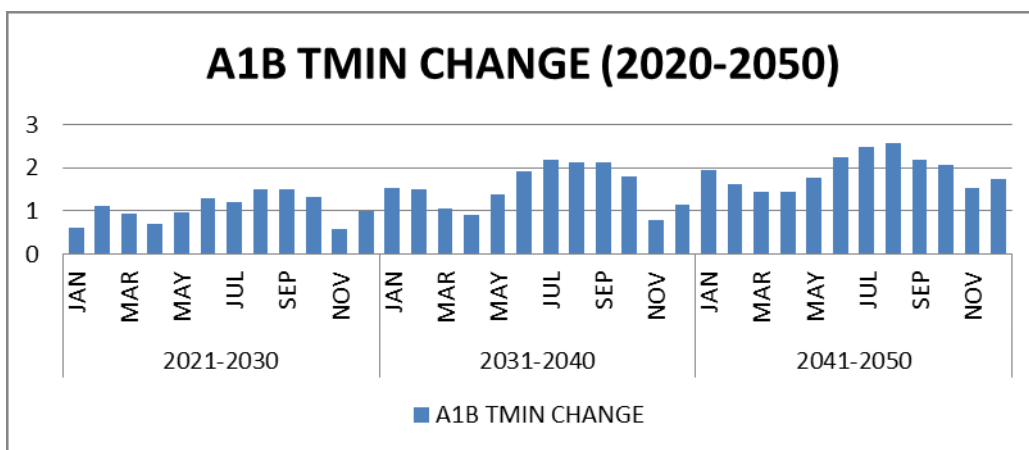
Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε μια γενική πτωτική τάση των υψών βροχόπτωσης, ιδιαίτερα τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες. Μάλιστα, η μείωση αυτή ξεπερνάει τα 30% για τους θερινούς μήνες την περίοδο 2030-2040, ενώ η μειωτική τάση φαίνεται να αυξάνει στο τέλος του αιώνα και κυρίως την περίοδο 2080-2090 που ξεπερνάει σε ορισμένες εκτιμήσεις (σενάριο A2) και τα 50% μείωσης βροχόπτωσης για τους θερινούς μήνες.

8.3.2 Μεταβολές θερμοκρασίας

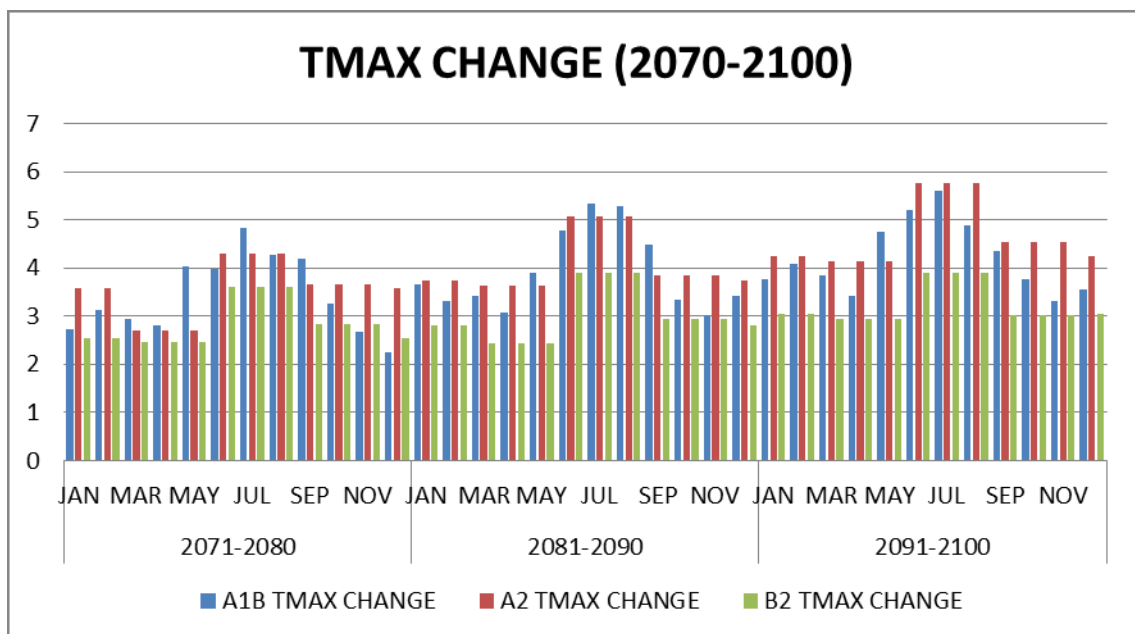
Οι μεταβολές της θερμοκρασίας που παραθέτονται στα επόμενα διαγράμματα είναι κατά απόλυτη τιμή σε βαθμούς Κελσίου (°C) σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα και αφορούν την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της.



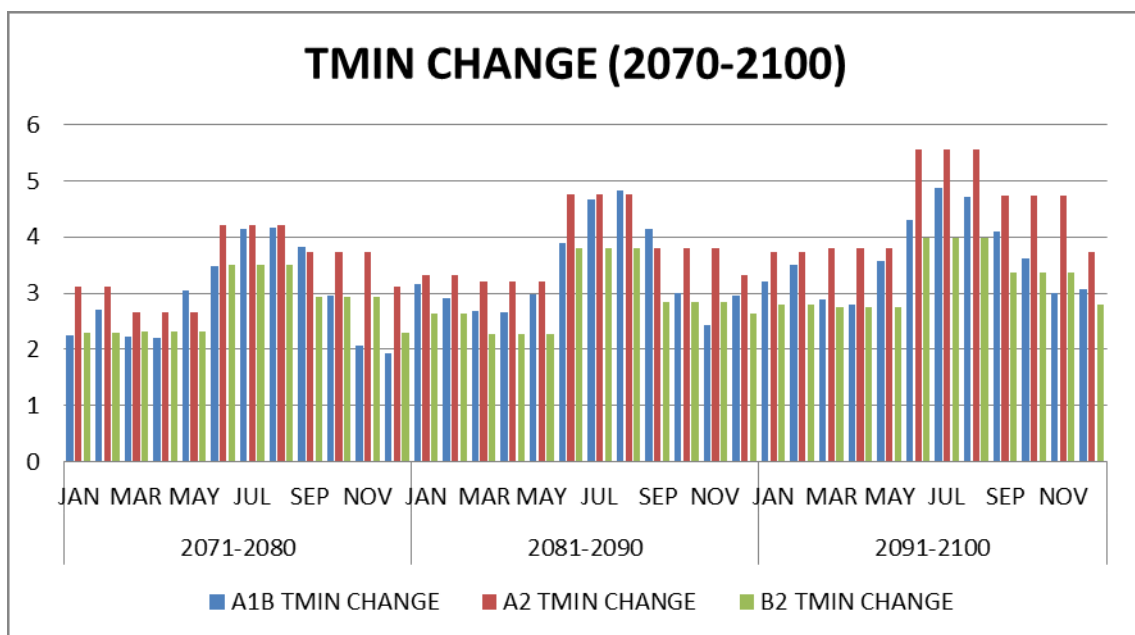
Σχήμα 8.6: Οι μεταβολές της μέγιστης θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2020-2050 για το σενάριο A1B. (Πηγή: Καμωμενάκης, 2013)



Σχήμα 8.7: Οι μεταβολές της ελάχιστης θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2020-2050 για το σενάριο A1B. (Πηγή: Καμωμενάκης, 2013)



Σχήμα 8.8: Οι μεταβολές της μέγιστης θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2070-2100 για τα σενάρια A1B, A2 και B2. (Πηγή: ΚΕΦΑΚ, 2011)

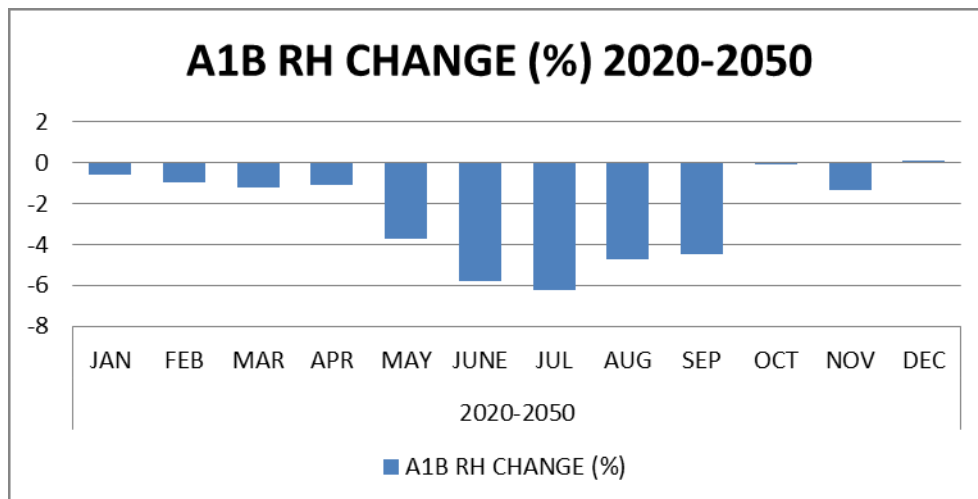


Σχήμα 8.9: Οι μεταβολές της ελάχιστης θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2070-2100 για τα σενάρια A1B, A2 και B2. (Πηγή: ΚΕΦΑΚ, 2011)

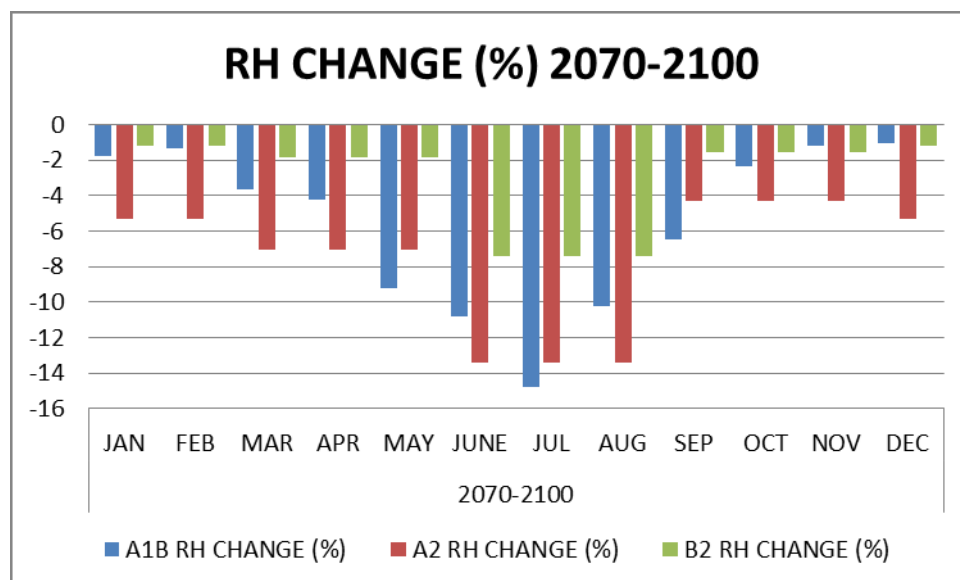
Οι παραπάνω θερμοκρασιακές μεταβολές μας δείχνουν μια αυξητική πορεία των τιμών των θερμοκρασιών της τάξης των 2-3°C για τις θερμοκρασίες της πρώτης περιόδου (2020-2050) που σταδιακά αυξάνεται και ξεπερνάει τους 5°C για τους θερινούς μήνες της τελευταίας δεκαετίας του αιώνα (2090-2100). Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι πολύ μεγαλύτερος από τον παγκόσμιο ρυθμό αύξησης για την περίοδο 1990-2006 που έφτανε τους 0.067°C/ έτος. Επιπρόσθετα, οι μελέτες της IPCC εκτίμησαν έναν μέσο όρο αύξησης της θερμοκρασίας που θα φτάσει τους 3°C στο τέλος του αιώνα. Η αύξηση που παρατηρείται στην περιοχή μας είναι σχεδόν διπλάσια από τον εκτιμώμενο μέσο όρο για την ίδια περίοδο.

8.3.3 Μεταβολές υπόλοιπων ατμοσφαιρικών παραμέτρων

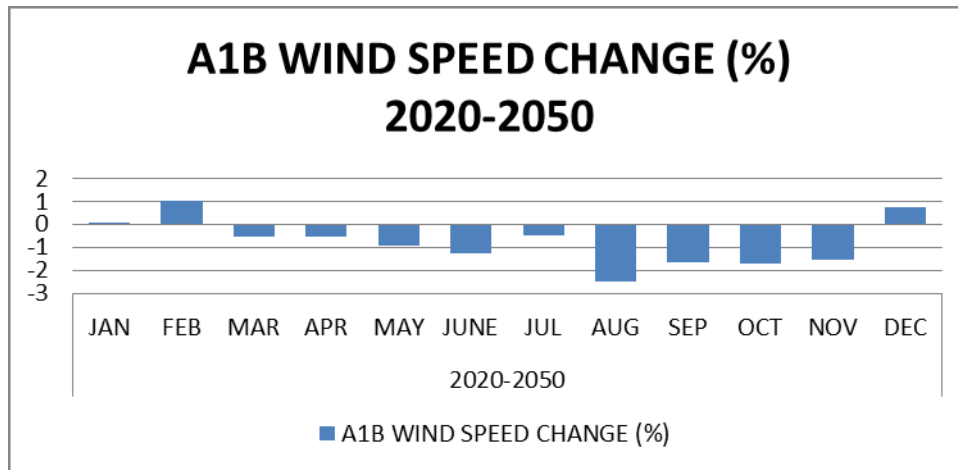
Οι υπόλοιπες τρεις ατμοσφαιρικοί παράμετροι αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία, την σχετική υγρασία και την ταχύτητα ανέμου. Επειδή οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την κατασκευή των σταθμών γέννησης μετεωρολογικών δεδομένων που εισάγουμε στο SWAT και έχουμε περιγράψει πρωτύτερα, χρησιμοποιήσαμε τους μηνιαίους μέσους όρους των μεταβλητών αυτών για τις μεταβολές τους. Οι μεταβολές τις σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου είναι ποσοστιαίες (%), ενώ της ηλιακής ακτινοβολίας κατά απόλυτη τιμή σε Watt/m^2 . Αυτές παρουσιάζονται διαγραμματικά παρακάτω.



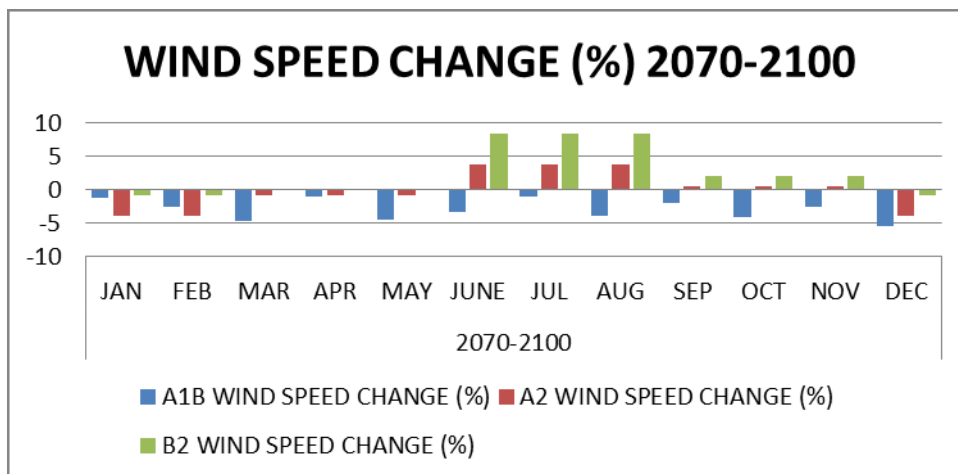
Σχήμα 8.10: Οι ποσοστιαίες μεταβολές της σχετικής υγρασίας (%) για την περίοδο 2020-2050 για το σενάριο A1B. (Πηγή: Κατωμενάκης, 2013)



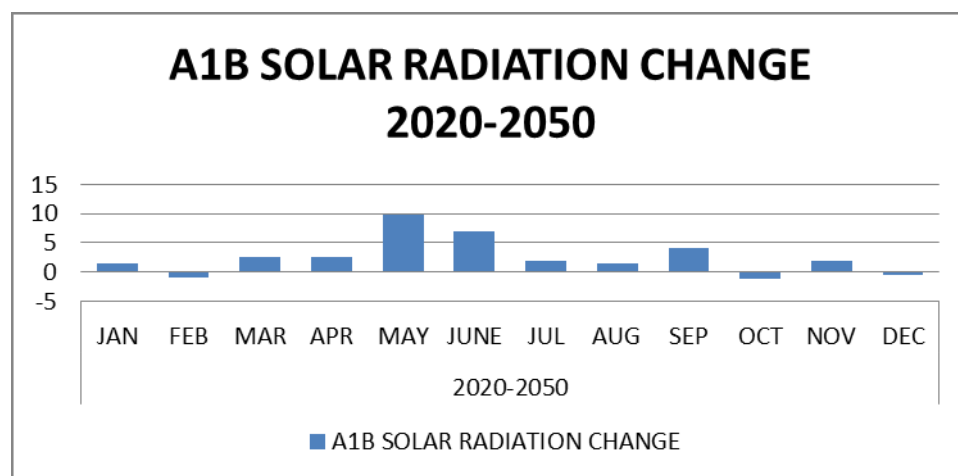
Σχήμα 8.11: Οι ποσοστιαίες μεταβολές της σχετικής υγρασίας (%) για την περίοδο 2070-2100 για τα σενάρια A1B, A2 και B2. (Πηγή: ΚΕΦΑΚ, 2011)



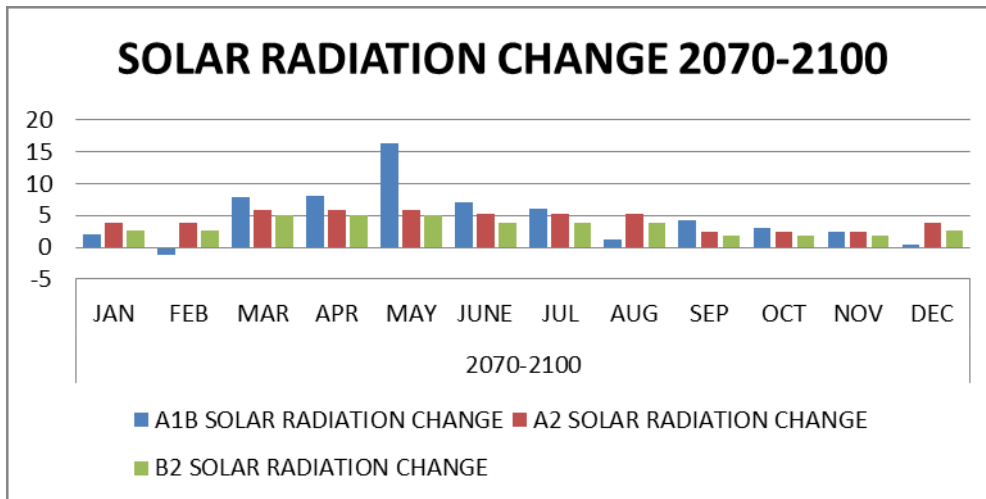
Σχήμα 8.12: Οι ποσοστιαίες μεταβολές της ταχύτητας ανέμου (%) για την περίοδο 2020-2050 για το σενάριο A1B. (Πηγή: Καψωμενάκης, 2013)



Σχήμα 8.13: Οι ποσοστιαίες μεταβολές της ταχύτητας ανέμου (%) για την περίοδο 2070-2100 για τα σενάρια A1B, A2 και B2. (Πηγή: ΚΕΦΑΚ, 2011)



Σχήμα 8.14: Οι μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) για την περίοδο 2020-2050 για το σενάριο A1B. (Πηγή: Καψωμενάκης, 2013)

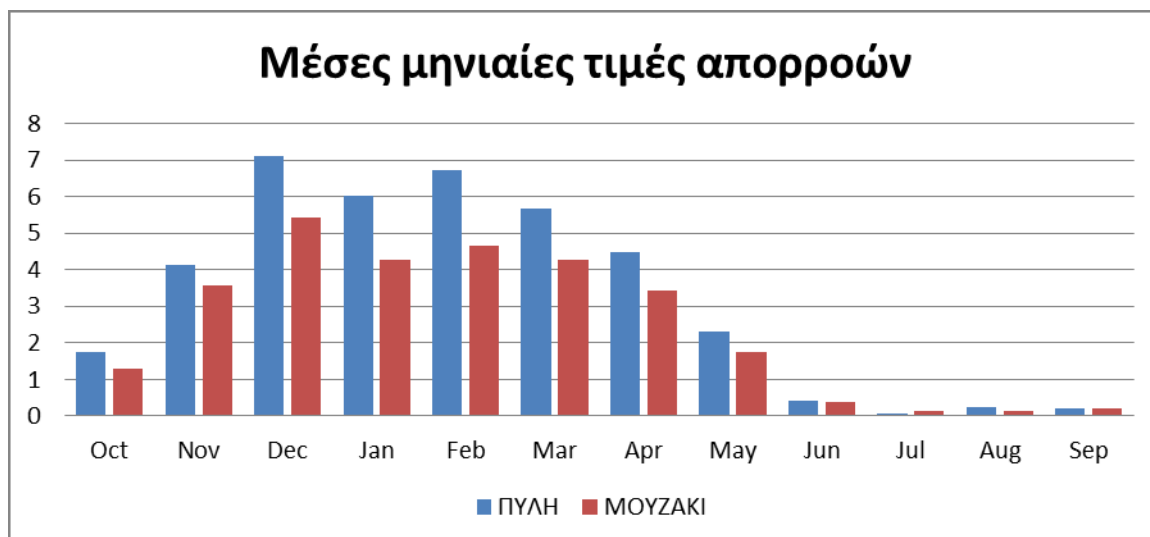


Σχήμα 8.15: Οι μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) για την περίοδο 2070-2100 για τα σενάρια A1B, A2 και B2. (Πηγή: ΚΕΦΑΚ, 2011)

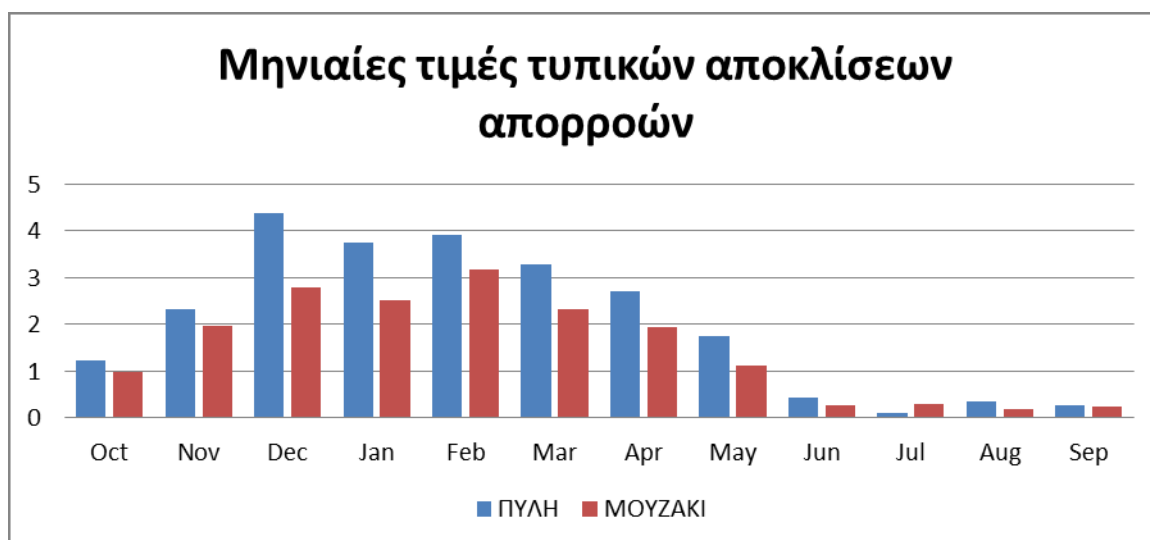
8.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Χρονοσειρών Μελλοντικών Απορροών

Τις παραπάνω κλιματικές μεταβολές των παραμέτρων τις εφαρμόσαμε για να κατασκευάσουμε τις τελικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για κάθε λεκάνη (Πύλη και Μουζάκι) για κάθε σενάριο, από ένα ζεύγος χρονοσειρών για κάθε λεκάνη για την περίοδο 2020-2050 υπό το σενάριο A1B και από τρία ζεύγη χρονοσειρών για κάθε λεκάνη για την περίοδο 2070-2100 υπό τα σενάρια A1B, A2 και B2. Συνολικά δημιουργήσαμε οκτώ ζεύγη χρονοσειρών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας (μέγιστης και ελάχιστης). Παράλληλα, δημιουργήσαμε μέσα στο περιβάλλον του ArcSWAT οκτώ νέους σταθμούς γέννησης μετεωρολογικών δεδομένων (user weather generator), αφού τα μετεωρολογικά στατιστικά (μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις κ.ά.) διαφέρουν για κάθε λεκάνη και κάθε σενάριο.

Έτσι, λοιπόν, εισήχθησαν απευθείας στα στημένα μοντέλα της κάθε λεκάνης τα μετεωρολογικά δεδομένα, δηλαδή τα αρχεία dbfs που εντοπίζουν τις ημερήσιες χρονοσειρές και τον αντίστοιχο σταθμό, εκτελώντας επακριβώς τα ίδια βήματα κάθε φορά. Συνοπτικά, «τρέξαμε» κάθε φορά το προσομοιωμένο μοντέλο που είχαμε κατασκευάσει για την κάθε λεκάνη βαθμονομώντας το με τις τιμές των παραμέτρων που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα τελικά εξαγόμενα αποτελέσματα ήταν δύο μηνιαίες χρονοσειρές απορροής για την περίοδο 2020-2050 εκτιμώμενες υπό το σενάριο A1B για κάθε λεκάνη, ενώ για την περίοδο 2070-2100 εξάγαμε έξι χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για κάθε ένα σενάριο της κάθε λεκάνης. Για την πρώτη περίοδο, 2020-2050, έχουμε τα παρακάτω εξαγόμενα αποτελέσματα μηνιαίων τιμών και τυπικών αποκλίσεων των απορροών των δύο λεκανών, που απεικονίζονται διαγραμματικά.



Σχήμα 8.4: Μέσες μηνιαίες τιμές απορροών των λεκανών Πύλης και Μουζάκι υπό το σενάριο A1B για την περίοδο 2020-2050.



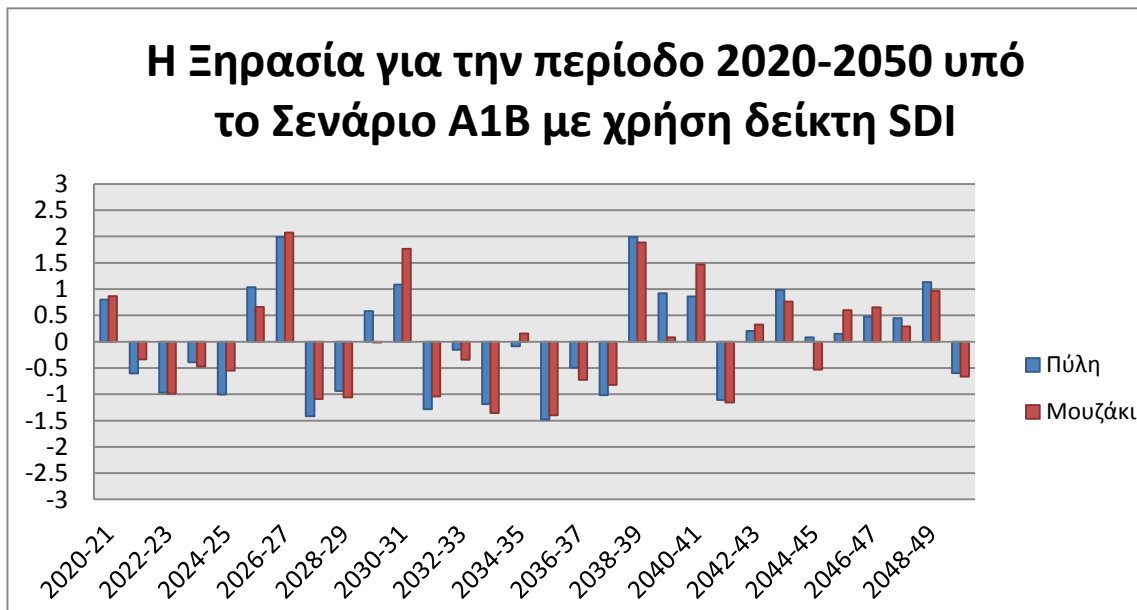
Σχήμα 8.5: Μηνιαίες τιμές τυπικών αποκλίσεων απορροών των λεκανών Πύλης και Μουζάκι υπό το σενάριο A1B για την περίοδο 2020-2050.

Οι πίνακες A.6, A.7, A.8 και A.9 του Παραρτήματος Πινάκων παραθέτουν τους μηνιαίους μέσους όρους και τυπικές αποκλίσεις για τις τρεις δεκαετίες της δεύτερης περιόδου, δηλαδή 2070-80, 2080-90 και 2090-100, και για τα 3 σενάρια των δύο λεκανών.

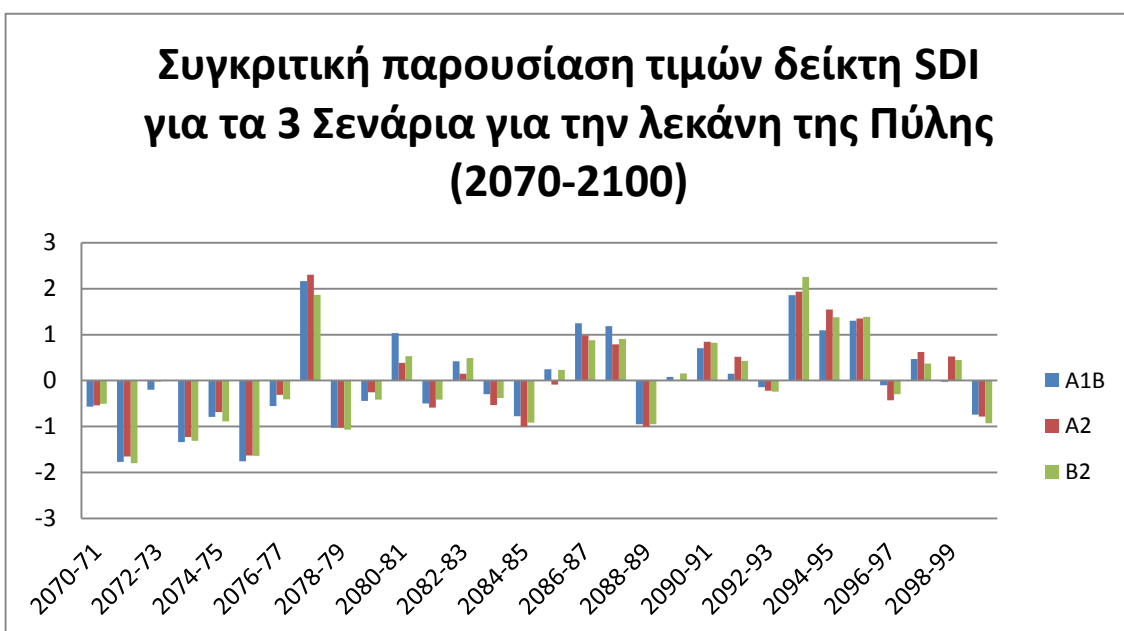
8.5 Έλεγχος Ξηρασίας με τον Δείκτη SDI

Με την ενότητα αυτή κλείνει ουσιαστικά και το υπολογιστικό κομμάτι της διπλωματικής και ολοκληρώνεται ο στόχος της για την μελέτη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία. Μέχρι τώρα, έχουμε βαθμονομήσει το μοντέλο SWAT που προσομοιώνει τις απορροές μας, έχουμε υπολογίσει τις συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας και σε αυτές προσθέσαμε τις επιμέρους κλιματικές μεταβολές για κάθε σενάριο και τέλος υπολογίσαμε τις τελικές προσομοιωμένες απορροές, όπως εξάγονται από το μοντέλο για δύο χρονικές περιόδους και για τρία σενάρια αερίων εκπομπών. Οι απορροές

αυτές είναι που θα μας δώσουν τα αποτελέσματα για την σοβαρότητα της ξηρασίας σε αυτή τη χρονική κλίμακα. Εφαρμόζοντας ότι πράξαμε και στο 7^ο κεφάλαιο για τη μελέτη της υδρολογικής ξηρασίας με τη χρήση του δείκτη SDI, θα υπολογίσουμε τις τιμές του δείκτη και θα εκφράσουμε διαγραμματικά για κάθε περίοδο και κάθε σενάριο την κατηγορία της ξηρασίας ως προς την σοβαρότητά της. Τα ακόλουθα διαγράμματα εκφράζουν την ποσοτικοποιημένη τη σοβαρότητα της ξηρασίας μέσω των τιμών του δείκτη SDI. Να υπενθυμίσουμε ότι οι τιμές από -1.5 έως και -2.0 εκφράζουν σοβαρή ξηρασία, ενώ οι τιμές μεγαλύτερες του -2.0 ακραία ξηρασία.

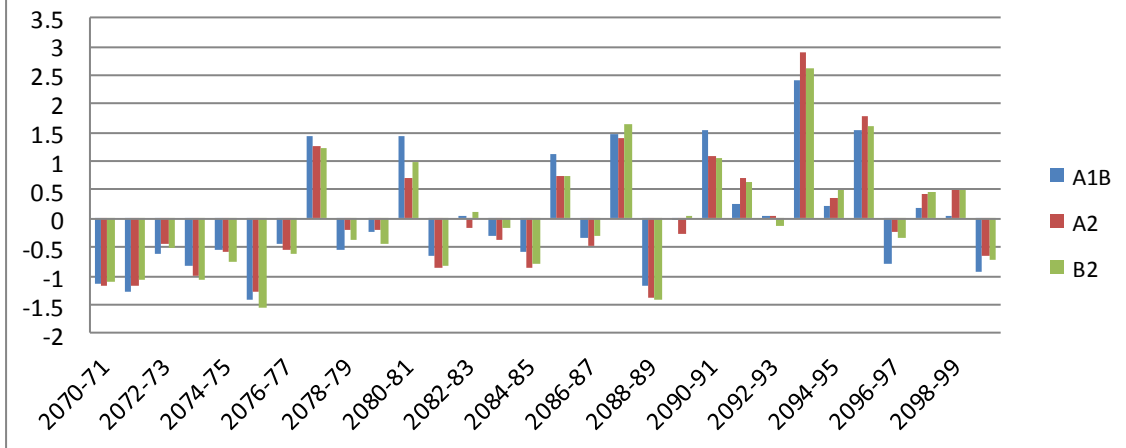


Σχήμα 8.6: Διάγραμμα τιμών δείκτη SDI για την περίοδο 2020-2050 υπό το Σενάριο A1B.



Σχήμα 8.7: Διάγραμμα τιμών δείκτη SDI για την περίοδο 2070-2100 για τα 3 Σενάρια για τη Πύλη.

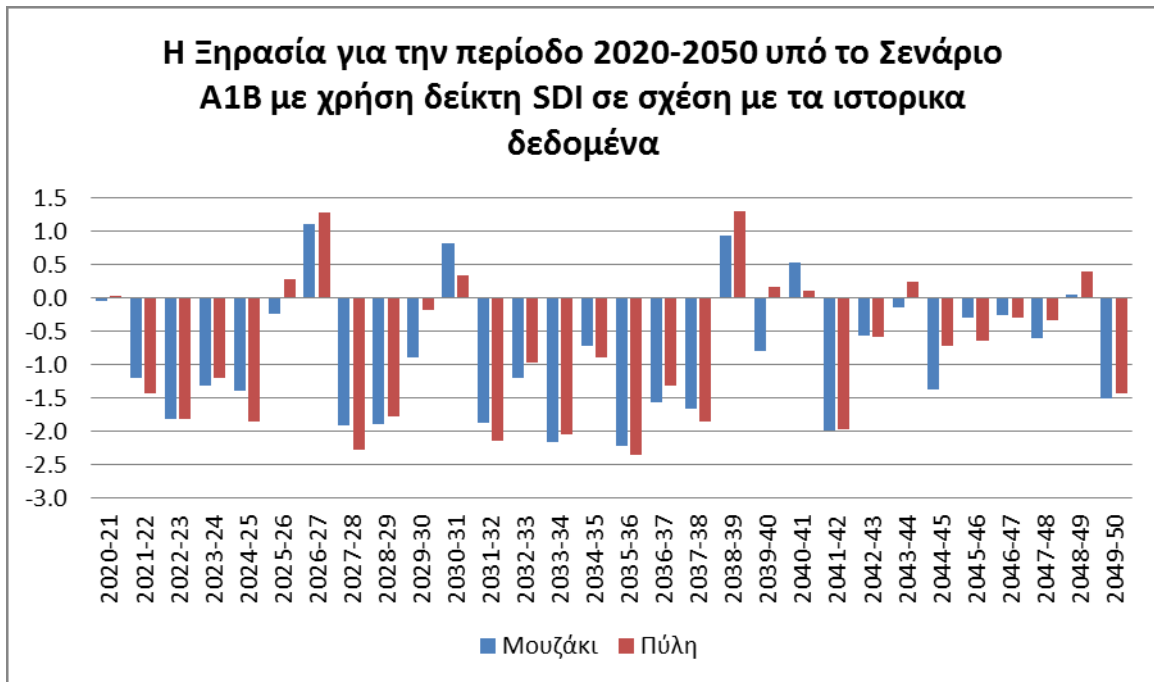
Συγκριτική παρουσίαση τιμών δείκτη SDI για τα 3 Σενάρια για την λεκάνη Μουζακίου (2070-2100)



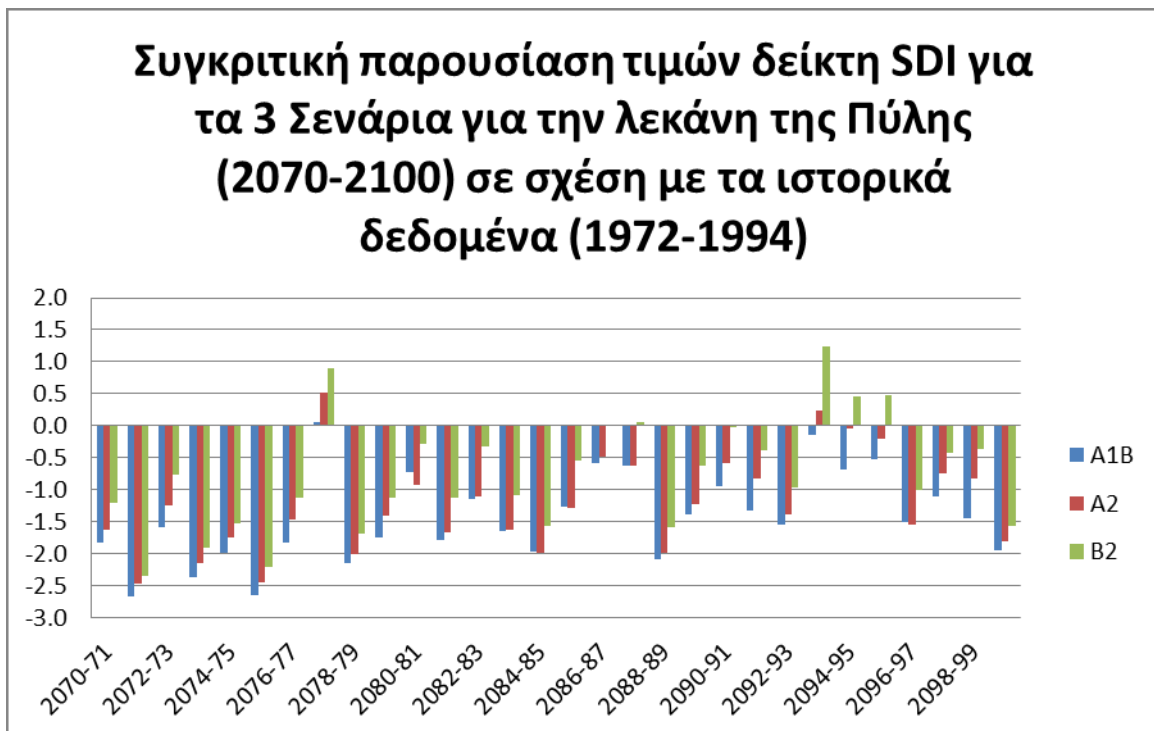
Σχήμα 8.8: Διάγραμμα τιμών δείκτη SDI για την περίοδο 2070-2100 για τα 3 Σενάρια για το Μουζάκι.

Ωστόσο, εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να εντοπίσουμε τις περιόδους σοβαρής ξηρασίας και να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι δεν παρατηρείται καμιά ακραία ξηρασία καθ' όλη τη διάρκεια των δύο περιόδων. Και μας κάνει ακόμη μεγαλύτερη εντύπωση το γεγονός ότι, ενώ στα ιστορικά δεδομένα παρουσιάστηκε υδρολογικό έτος ακραίας ξηρασίας, στο μέλλον και κάτω από μεγάλες και σοβαρές κλιματικές μεταβολές, δεν παρατηρείται. Μάλιστα, προσεκτικότερη μελέτη μας οδηγεί στο ότι δεν παρατηρούνται ούτε σοβαρές ξηρασίες. Προφανώς, μια τέτοια εκτίμηση είναι βεβιασμένη. Δεν θα πρέπει να μας κάνει εντύπωση το ότι δεν παρατηρείται ακραία ξηρασία ή έστω ότι δεν παρατηρούνται γεγονότα σοβαρής ξηρασίας. Αυτό που αναμέναμε σαν αποτέλεσμα δεν είναι άμεσα διακριτό και αυτό οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού του δείκτη SDI που χρησιμοποιεί τον μέσο όρο και τυπική απόκλιση του δείγματος που μελετάμε, δηλαδή σε κάθε περίπτωση των 30 ετών για κάθε περίοδο. Επομένως, και οι υπολογισμένοι δείκτες δεν είναι άμεσα συγκρίσιμοι με το παρόν, δηλαδή δεν μπορούμε να συσχετίσουμε τις τιμές των περιόδων αυτών με του ιστορικού δείγματος. Με απλά λόγια, αν μία περίοδος 30 ετών αντιμετωπίζει ξηρασία βάσει των σημερινών παρατηρημένων δεδομένων, μπορεί εύκολα να θεωρηθεί ως μη ξηρασία, αφού ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του δείγματος των αθροιστικών απορροών θα είναι πολύ χαμηλός.

Για αυτό το λόγο, αποφασίσαμε να παρουσιάσουμε τα παραπάνω διαγράμματα έχοντας υπολογίσει αυτή τη φορά τις τιμές του δείκτη SDI με τη χρήση των τιμών των μέσων όρων και τυπικής απόκλισης των ιστορικών δεδομένων απορροών που είχαμε πρωτύτερα υπολογίσει. Μπορεί στατιστικά να φαίνεται ότι δεν έχει νόημα, στην ουσία όμως μπορούμε και εκφράζουμε την ξηρασία που θα αντιμετωπιστεί στο μέλλον «μεταφρασμένη» σε σημερινές μεταβλητές. Με αυτό τον τρόπο είναι πιο εύκολα διακριτή η ξηρασία σε αρκετά έτη αν όχι σε όλα των δύο περιόδων για κάθε σενάριο. Ακολουθούν τα διαγράμματα αυτά που αναφέραμε.

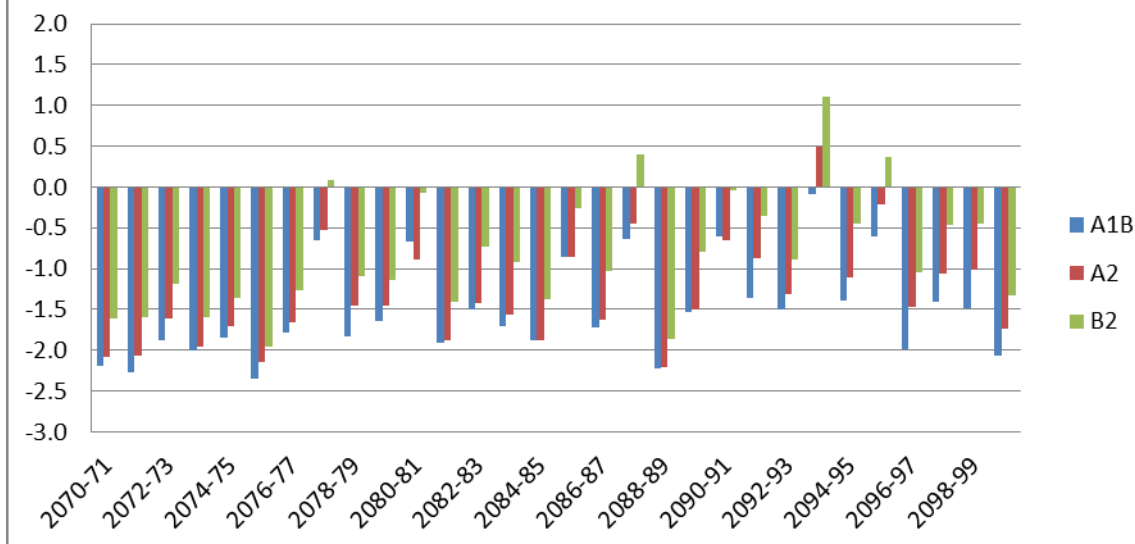


Σχήμα 8.9: Διάγραμμα τιμών δείκτη SDI για την περίοδο 2020-2050 υπό το Σενάριο A1B υπολογισμένο από τα στατιστικά των ιστορικών δεδομένων και για τις δύο λεκάνες.



Σχήμα 8.9: Διάγραμμα τιμών δείκτη SDI για την περίοδο 2070-2100 και για τα 3 Σενάρια υπολογισμένο από τα στατιστικά των ιστορικών δεδομένων για τη λεκάνη της Πύλης.

Συγκριτική παρουσίαση τιμών δείκτη SDI για τα 3 Σενάρια για την λεκάνη του Μουζακίου (2070-2100) σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα (1972-1994)



Σχήμα 8.10: Διάγραμμα τιμών δείκτη SDI για την περίοδο 2070-2100 και για τα 3 Σενάρια υπολογισμένο από τα στατιστικά των ιστορικών δεδομένων για τη λεκάνη του Μουζακίου.

Από το πρώτο διάγραμμα για την περίοδο 2020-2050 μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

1. παρατηρούνται 4 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας για την λεκάνη της Πύλης (2022-23, 2024-25, 2028-29, 2037-38, 2041-42) και 6 για τη λεκάνη του Μουζακίου (2022-23, 2027-28, 2028-29, 2031-31, 2037-38, 2041-42)
2. παρατηρούνται 4 υδρολογικά έτη ακραίας ξηρασίας για τη λεκάνη της Πύλης (2027-28, 2031-32, 2034-35, 2035-36) και 2 για τη λεκάνη του Μουζακίου (2034-35, 2035-36)
3. η ξηρασία είναι εντονότερη για τη λεκάνη της Πύλης
4. από τα συνολικά 30 έτη της περιόδου τα 10 έτη αντιστοιχούν σε γεγονότα σοβαρής και ακραίας ξηρασίας, ενώ σχεδόν τα μισά έτη της περιόδου αντιμετωπίζουν από μέτρια έως ακραία ξηρασία
5. δύο κοντινές περιόδους αντιμετωπίζουν έντονη ξηρασία μακράς διάρκειας, η περίοδος 2021-2025 (4 υδρολογικά έτη) και η περίοδος 2031-2038 (7 υδρολογικά έτη) όπου παρατηρούνται και τα πιο ακραία γεγονότα ξηρασίας
6. πτώση των ακραίων και σοβαρών φαινομένων ξηρασίας παρατηρείται μετά το 2042
7. γενικά η ξηρασία για αυτή την περίοδο συναντάται τις δύο πρώτες δεκαετίες.

Από το συγκριτικό διάγραμμα για τη λεκάνη της Πύλης για την περίοδο 2070-2100 που αφορά τις τιμές του δείκτη SDI υπό τα τρία σενάρια κλιματικών αλλαγών, διαπιστώνουμε τα εξής:

1. παρατηρούνται 10 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας υπό το σενάριο A1B (2070-71, 2072-73, 2074-75, 2076-77, 2079-80, 2081-82, 2083-84, 2084-85, 2092-93, 2099-00), 9 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας υπό το σενάριο A2 (2070-71, 2074-75, 2078-79, 2081-82, 2083-84, 2084-85, 2088-89, 2096-97, 2099-00) και 5 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας για το σενάριο B2 (2074-75, 2078-79, 2084-85, 2088-89, 2099-00)
2. παρατηρούνται 5 υδρολογικά έτη ακραίας ξηρασίας για το σενάριο A1B (2071-72, 2073-74, 2075-76, 2078-79, 2088-89) 3 υδρολογικά έτη για το σενάριο A2 (2071-72, 2073-74, 2075-76) και 2 υδρολογικά έτη ακραίας ξηρασίας υπό το σενάριο B2 (2071-72, 2075-76)
3. από τα συνολικά 30 έτη της περιόδου παρατηρούνται 15 υδρολογικά έτη σοβαρής και ακραίας ξηρασίας για το σενάριο A1B, 12 υδρολογικά έτη για το σενάριο A2 και 7 υδρολογικά έτη σοβαρής και ακραίας ξηρασίας για το σενάριο B2
4. αντίστοιχα 22 υδρολογικά έτη αντιμετωπίζουν γεγονότα ξηρασίας από μέτρια έως ακραία για το σενάριο A1B, 19 για το σενάριο A2 και 14 για το σενάριο B2.
5. έντονη ξηρασία μεγάλης χρονικής διάρκειας παρατηρούνται τις περιόδους 2070-77 (7 υδρολογικά έτη), 2078-86 (8 έτη), 2088-93 (5 έτη) και 2096-00 (4 έτη) με πιο σοβαρή και ακραία την πρώτη περίοδο, ενώ αντίστοιχα υποκλιμακώνεται η ένταση της ξηρασίας
6. μικρή πτώση ή «παύση» της ξηρασίας παρατηρείται μόνο την περίοδο 2093-96
7. γενικά τα πιο ακραία γεγονότα ξηρασίας συναντώνται την πρώτη δεκαετία της περιόδου και τα υπόλοιπα σοβαρά κατά τη δεύτερη

Από το συγκριτικό διάγραμμα για τη λεκάνη του Μουζακίου για την περίοδο 2070-2100 που αφορά τις τιμές του δείκτη SDI υπό τα τρία σενάρια κλιματικών αλλαγών, συμπεραίνουμε τα παρακάτω:

1. παρατηρούνται 12 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας υπό το σενάριο A1B (2072-73, 2073-74, 2074-75, 2076-77, 2078-79, 2079-80, 2081-82, 2083-84, 2084-85, 2086-87, 2089-90, 2096-97), 10 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας υπό το σενάριο A2 (2072-73, 2073-74, 2074-75, 2076-77, 2081-82, 2083-84, 2084-85, 2086-87, 2089-90, 2099-00) και 5 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας για το σενάριο B2 (2070-71, 2071-72, 2073-74, 2075-76, 2088-89)
2. παρατηρούνται 5 υδρολογικά έτη ακραίας ξηρασίας για το σενάριο A1B (2070-71, 2071-72, 2075-76, 2088-89, 2099-00), 4 υδρολογικά έτη για το σενάριο A2 (2070-71, 2071-72, 2075-76, 2088-89) και δεν παρατηρείται κανένα υδρολογικό έτος ακραίας ξηρασίας υπό το σενάριο B2
3. από τα συνολικά 30 έτη της περιόδου παρατηρούνται 17 υδρολογικά έτη σοβαρής και ακραίας ξηρασίας για το σενάριο A1B, 14 υδρολογικά έτη για το σενάριο A2 και 5 υδρολογικά έτη σοβαρής ξηρασίας για το σενάριο B2
4. αντίστοιχα 23 υδρολογικά έτη αντιμετωπίζουν γεγονότα ξηρασίας από μέτρια έως ακραία για το σενάριο A1B, 22 για το σενάριο A2 και 15 για το σενάριο B2.
5. έντονη ξηρασία μεγάλης χρονικής διάρκειας παρατηρούνται τις περιόδους 2070-77 (7 υδρολογικά έτη), 2081-85 (4 έτη), 2088-91 (3 έτη) και 2096-00 (4 έτη) με πιο σοβαρή και ακραία την πρώτη περίοδο, ενώ αντίστοιχα υποκλιμακώνεται η ένταση της ξηρασίας
6. μικρή πτώση ή «παύση» της ξηρασίας δεν παρατηρείται για διάστημα μεγαλύτερο του ενός έτους

7. γενικά τα ακραία και σοβαρά γεγονότα ξηρασίας είναι σχετικά ομοιόμορφα κατανομημένα κατά την πρώτη και δεύτερη δεκαετία της περιόδου

Συγκεφαλαιωτικά, μπορούμε να κρίνουμε ότι η λεκάνη της Πύλης πρόκειται να πληγεί πολύ περισσότερο από ακραία φαινόμενα ξηρασίας μεγάλης διάρκειας που σίγουρα θα επηρεάσουν το υδατικό δυναμικό της, ενώ γενικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι μετά το 2027 οι κάτοικοι θα αντιμετωπίζουν την ξηρασία ως ένα φαινόμενο με μεγάλη συχνότητα επανεμφάνισης. Τέλος, διαπιστώνουμε ότι όντως το Σενάριο B2 είναι το λιγότερο ακραίο, αλλά ταυτόχρονα και το πιο απίθανο, αφού απαιτείται μεγάλη οργάνωση από μέρους της Πολιτείας για περιβαλλοντική συνείδηση. Το Σενάριο A1B που θεωρείται και ως το επικρατέστερο σενάριο να συμβεί φαίνεται στην παρούσα μελέτη ως το πιο ακραίο και όχι το A2, όπως αρχικά υποθέσαμε. Αυτό δεν σημαίνει ότι το σενάριο A2 δεν είναι ακραίο ούτε και ότι έχουμε εσφαλμένα αποτελέσματα, αλλά συμβαίνει γιατί η εκτίμηση των μεταβολών υπό το σενάριο A1B έγινε ακριβέστερα σε καλύτερη χωρική ανάλυση και αναλυτικότερη μεθοδολογία. Ένας αναλυτικότερος υπολογισμός των μεταβολών του Σεναρίου A2 υπό τις ίδιες προϋποθέσεις θα μας έδινε πιο βέβαια αποτελέσματα. Όπως και να έχει, η υδρολογική ξηρασία υπό την επίδραση των κλιματικών αλλαγών είναι εμφανής σε κάθε περίπτωση και κάθε Σενάριο, σε σχέση πάντα με τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1972-1994. Οι ίδιοι υπολογισμοί για ιστορικά δεδομένα από το 1972 έως σήμερα θα προσέδιδε ελαφρώς μειωμένα αποτελέσματα υδρολογικής ξηρασίας και αυτό γιατί η απορροή έχει εμφανώς μειωθεί την τελευταία δεκαετία που διανύουμε (μείωση των βροχοπτώσεων, υπόγεια υπεράντληση κ.ά.).

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα Διπλωματική ασχολήθηκε με τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογική ξηρασία, εντοπίζοντας την με τη αξιοποίηση του δείκτη SDI στις υπολογισμένες προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής για τις περιόδους 2020-2050 και 2070-2100 βάσει των κλιματικών αλλαγών που προβλέπονται από τα σενάρια αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου SRES της IPCC. Αποδείχθηκε η ύπαρξη στον μελλοντικό αυτό χρονικό ορίζοντα των ακραίων και σοβαρών φαινομένων υδρολογικής ξηρασίας και περιεγράφησαν συγκεκριμένα οι περίοδοι εμφάνισης και σοβαρότητας αυτών των γεγονότων. Γενικά, θα πρέπει να τονιστεί ότι η περιοχή Πύλης και Μουζακίου συγκεντρώνουν, με βάσει τα ιστορικά δεδομένα, από τα υψηλότερα ύψη υετού όλου του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Οι υπόγειοι και επιφανειακοί υδροφορείς των λεκανών τροφοδοτούν το υδατικό δυναμικό του Πηνειού, που χρησιμοποιείται κυρίως για άρδευση αλλά και για ύδρευση και βιομηχανική χρήση. Μάλιστα, πρόσφατες μελέτες έχουν αποδείξει ότι το ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας είναι ελλειμματικό και συγκεκριμένα το πλέον ελλειμματικό όλης της χώρας (έλλειμμα μεγαλύτερο από $120 \times 10^6 \text{ m}^3$).

Η επίδραση των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών με τη μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της θερμοκρασίας θα επηρεάσει τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα, αφού προβλέπεται σημαντική μείωση της απορροής. Η μελέτη αυτή δεν επιδιώκει μόνο στο να αναγνωριστεί η εκτίμηση εμφάνισης μακρών και έντονων γεγονότων υδρολογικής ξηρασίας, αλλά και να δοθεί έμφαση στη γενικότερη σοβαρότητα του προβλήματος που πρόκειται να αντιμετωπίσει αυτή η χώρα λόγω της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής. Ασχοληθήκαμε με δύο λεκάνες του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας που είναι οι πιο πλούσιες υδρολογικά, παρά το μέγεθος τους, και αυτό οφείλεται στο ψηλό υψόμετρο τους. Οπότε, δεν χρειάζεται να αναλογιστούμε τις επιπτώσεις που αναμένονται σε άλλες λεκάνες του υδατικού διαμερίσματος με ήδη μειωμένο εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό. Επομένως, η ανάγκη προσφυγής σε μέτρα προστασίας και μετριασμού από ακραίες ξηρασίες που θα προσβάλλουν τα υδατικά αποθέματα και θα θέσουν σε κίνδυνο τόσο την εύρυθμη λειτουργία του οικοσυστήματος, αλλά και της οικονομίας του τόπου που βασίζεται στην γεωργία, είναι παραπάνω από επιτακτική.

Οι κύριοι υδατικοί πόροι του διαμερίσματος είναι ο ποταμός Πηνειός και οι υπόγειοι υδροφορείς της δυτικής και της ανατολικής Θεσσαλίας. Οι τοπικοί υδατικοί πόροι, επιφανειακοί και υπόγειοι, παρά την ενίσχυσή τους από τις εκροές του ταμιευτήρα Πλαστήρα, δεν επαρκούν για την κάλυψη των απαιτήσεων σε αρδευτικό νερό των υφιστάμενων καλλιεργειών. Η έλλειψη υποδομών σε έργα ταμίευσης, σε συνδυασμό με τον μη ορθολογικό προγραμματισμό των καλλιεργειών, έχει οδηγήσει σε σημαντικό περιορισμό της θερινής ροής των ποταμών και δραματική υποβάθμιση των υδροφορέων, εξαιτίας της εντατικής χρήσης των γεωτρήσεων, τη στιγμή που η χρήση των, κατά κανόνα, χωμάτινων καναλιών ως έργων μεταφοράς έχει ως συνέπεια अपαράδεκτα υψηλές απώλειες νερού. Όλα αυτά θα προστεθούν στο «αποδυναμωμένο» υδατικό ισοζύγιο του διαμερίσματος υπό την επίδραση των κλιματικών αλλαγών και θα είναι εντονότερα σε αυτή την περίπτωση. Οπότε και επιβεβαιώνεται η ανάγκη λήψης μέτρων.

9.2 Προτάσεις

Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας συγκεντρώνει το μεγαλύτερο όγκο αρδευτικής υδατικής καταναλώσεως. Οι υπόγειοι υδροφορείς έχουν πρόβλημα ανανεώσεως των αποθεμάτων τους, πράγμα που αναμένεται να επιδεινωθεί με την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή, ειδικά σε ό,τι αφορά τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία. Τα νέα έργα στην περιοχή (φράγματα Σμοκόβου και πεδινής ζώνης, επανενεργοποίηση Κάρλας κ.λπ.) σε συνδυασμό με την αναδιάρθρωση των καλλιεργειών και την εφαρμογή συγχρόνων αρδευτικών συστημάτων μπορεί, ίσως, να αντιμετωπίσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, δεν μπορούμε να κάνουμε επισφαλείς προβλέψεις για ένα τόσο σοβαρό ζήτημα όσο η ξηρασία. Επομένως, περισσότερο από απαραίτητη κρίνεται η εφαρμογή της μερικής εκτροπής του Αχελώου και της κατασκευής φραγμάτων στη λεκάνη Πύλης και Μουζακίου που θα τροφοδοτούνται από τα νερά του Αχελώου με υπόγειες σήραγγες. Το έργο αυτό προσβλέπει στην αύξηση των υδατικών αποθεμάτων της Θεσσαλίας από τα νερά του Αχελώου, αλλά και την αξιοποίηση των υπαρχουσών εισροών του διαμερίσματος του χειμερινούς μήνες, που εκβάλλονται άδικα στη θάλασσα. Η μελέτη των έργων εκτροπής του άνω ρου του Αχελώου έχει ολοκληρωθεί, μαζί με την κατασκευή κάποιων έργων, όπως των υπόγειων σιράγγων. Παρόλα αυτά, το έργο έχει «παγώσει» και αναμένεται η τελική έγκριση για την ολοκλήρωση των εργασιών που θα πλουτίσουν τα υδατικά αποθέματα και θα ευνοηθεί περαιτέρω η ανάπτυξη της γεωργίας. Όπως και να έχει, το έργο κρίνεται σκόπιμο για μελλοντικό χρονικό ορίζοντα, στην περίπτωση που επιθυμούμε την αποφυγή ή έστω τον μετριασμό των επιπτώσεων μακρών υδρολογικών γεγονότων ξηρασίας, όπως αποδεικνύεται από την παρούσα διπλωματική.

Η Τράπεζα της Ελλάδος σε συνεργασία με Δημόσιους φορείς αξιολόγησε τις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών σε οικονομικά νούμερα, παραθέτοντας τρία σενάρια δράσης της Πολιτείας και το συνολικό κόστος σε κάθε περίπτωση, αλλά και το όφελος που μπορεί να προσκομιστεί. Πιο συγκεκριμένα, τα τρία αυτά σενάρια αφορούν το Σενάριο Μη Δράσης, που αντιστοιχεί σε ανυπαρξία κάθε δράσης για μείωση των αερίων εκπομπών, το Σενάριο Μετριασμού, που σχετίζεται με την πολιτική μετριασμού της κλιματικής αλλαγής με τη συνεχή και δραστική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από σήμερα, ώστε οι εκπομπές μέχρι το 2050 να μην υπερβούν το 80% των εκπομπών του 1990 και τέλος το Σενάριο Προσαρμογής, δηλαδή η ανάληψη δράσης κατά τομέα ώστε να μειωθούν οι ζημιές εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Σύμφωνα, με τα οικονομικά στοιχεία που δημιουργήθηκαν εικάζεται ότι το κόστος του Σεναρίου Μη Δράσης ανέρχεται στα 701 δισεκ. ευρώ, το κόστος του Σεναρίου Μετριασμού προκύπτει ίσο με 436 δισεκ. ευρώ, που αποτελείται από το κόστος των μέτρων μείωσης των εκπομπών (142 δισεκ. ευρώ) και το κόστος της εναπομένουσας κλιματικής αλλαγής (294 δισεκ. ευρώ), ενώ, τέλος, το κόστος του Σεναρίου Προσαρμογής εκτιμήθηκε ίσο με 578 δισεκ. ευρώ, που είναι το άθροισμα του κόστους που επιφέρουν στην οικονομία τα μέτρα προσαρμογής και του κόστους που οφείλεται στον περιορισμό των ζημιών εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Κλείνοντας τη διπλωματική αυτή να αναφέρουμε ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα με κάθε κόστος, αφού το κόστος από τις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στην περίπτωση που δεν έχουν προβλεφθεί σημαντικές αποφάσεις που να περιορίζουν τις κλιματικές επιπτώσεις (μείωση εκπομπών) και να προσαρμόζουν την κοινωνία σε αυτές (έργα ταμίευσης και διαχείρισης υδατικών πόρων), θα είναι πολύ μεγαλύτερο και σε οικονομικά μεγέθη.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

- Αθανασιά, Γ., *Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη με χρήση του μοντέλου SWAT*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ), *Οι Περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα*, Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα, 2011a.
- Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ), *Σενάρια Ανθρωπογενούς Παρέμβασης στην Κλιματική Αλλαγή και τα Προγράμματα Prudence και Ensembles*, Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα, 2011b.
- Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ. και Κοζάνης, Σ., *Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών «Κασταλία»*, Τεύχος 3, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα, Οδυσσεύς, Αθήνα, 2005.
- Καψωμενάκης, Ι., *Μεταβολές παραμέτρων υπό το Σενάριο A1B*, Προσωπικό αρχείο με τις κλιματικές μεταβολές των παραμέτρων της περιοχής μελέτης των λεκανών απορροής Πύλης και Μουζακίου για το Σενάριο A1B, ΚΕΦΑΚ, Αθήνα, 2013.
- Κέντρο Ερεύνης Φυσικής Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας (ΚΕΦΑΚ), *Κλιματικές μεταβολές των παραμέτρων υπό τα Σενάρια A2 και B2*, Αρχείο που δημιουργήθηκε από το ΚΕΦΑΚ για λογαριασμό της ΤτΕ για σύνταξη της Έκθεσης της ΕΜΕΚΑ, Αθήνα, 2011.
- Κοζάνης, Σ., Χριστοφίδης, Α. & Ευστρατιάδης, Α., *Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων έκδοση 4*, Αθήνα, 2010.
- Κουτσογιάννης, Δ. & Ξανθόπουλος, Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Μαλλιάρος, Α., *Διαχείριση Υδατικών Αποθεμάτων ταμειυτήρων σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής, Εφαρμογή στους ταμειυτήρες Πλαστήρα και Σμοκόβου Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- Μαμάσης, Ν., και Ε. Ξανθοπούλου, *Ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα, Υδροσκόπιο II - Δημιουργία Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας*, Τεύχος Α, 473 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος, 1996.
- Ναλμπάντης, Ι. και Κουτσογιάννης Δ., *Ερευνητικό Έργο Αναβάθμιση και Επικαιροποίηση της Υδρολογικής Πληροφορίας της Θεσσαλίας*, Τεύχος 4, ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων ΕΥΔΕ Αχελώου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων-Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Αθήνα, 1997.

Ναλμπάντης, Ι., *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.

Πικούνης, Μ., *Αρχές καλής μοντελοποίησης για την εναρμόνιση των υδρολογικών ομοιομάτων: Εφαρμογή και ποιοτικός έλεγχος του ομοιώματος SWAT στην εκτίμηση των υδρολογικών επιπτώσεων των αλλαγών χρήσεων γης*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.

Στουρνάρας, Γ., *Νερό Περιβαλλοντική Διάσταση και Διαδρομή*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2007

Τσακίρης, Γ. (υπεύθυνος έκδοσης), *Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.

Τσακίρης, Γ. (υπεύθυνος έκδοσης), *Υδραυλικά Έργα Σχεδιασμός και Διαχείριση Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2006.

Ξενόγλωσσες

Bengston, L., Snowmelt-generated runoff in urban areas. p. 444-451. In B.C. Yen (ed.) *Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage*, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981 Water Resources Publications, Littleton, CO, 1981.

CDC, *The Interagency Working Group on Climate Change and Health (IWGCCCH), A Human Health Perspective on Climate Change: A report outlining the research needs on the human health effects on climate change*, Environmental Health Perspectives, National Institute of Environmental Health Sciences, 2009.

Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.

European Commission, *Protecting and Harnessing the Seas*, Environment for Europeans, Magazine of the Directorate-General for the Environment, Supplement 2008, No. 32, 2008.

European Environment Agency (EEA), *10 messages for 2010. Climate Change and Biodiversity*, Copenhagen, 2010.

European Environmental Agency (EEA), *Impacts of Europe's Changing Climate – 2008 Indicator-based Assessment*, Joint EEA/JRC-WHO report, EEA Report No. 4/2008, JRC Reference Report No. JRC47756, European Environment Agency, 2008.

FAO (2008), *Report of the FAO Expert Workshop on Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture*, Rome, Italy, 7-9 April, FAO Fisheries Report No. 870, 2008.

Flato, G.M. and G.J. Boer, *Warming asymmetry in climate change experiments*, Geophysical Research Letters, 28:195–198, 2001.

Food & Agricultural Organization of the United Nations (FAO), *The State of Food Insecurity in the World: Economic Crises: Impacts & Lessons Learned*, Electronic Publishing Policy & Support Branch Communication Division, FAO, 2009.

Giakoumakis, S., Tsakiris, G. & Efremides, D., On the rainfall-runoff modelling in a Mediterranean island environment, in G. Tsakiris (editor), *Proceedings of the EWRA conference "Advances in Water Resources Technology"*, Athens, 20-23 March 1991, Balkema, Rotterdam, 1991.

- Hayes M. J., *Drought Indices*, National Drought Mitigation Centers, Lincoln, NE, 1999.
- Huber, W.C. & R.E. Dickinson, *Storm water management model, version 4: user's manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1988.
- IPCC, Appendix I, Parry M.L. et al. (eds), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- Karl T. R., Knight R. W., Ezell D. S. and Quinlan F. T., *Probabilities and precipitation required to end/ameliorate droughts*, Historical Climatology Series, 3-16, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1986.
- Kim, S.-J., G. Flato, and G. Boer, *A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: Approach to equilibrium*, *Climate Dynamics*, 20, 635-661, 2003.
- Kim, S.-J., G. Flato, G. Boer, and N. McFarlane, *A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 1: Transient multi-decadal response*, *Climate Dynamics*, 19, 515-537, 2002.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*, World Resource Institute, Washington, DC, USA, 2005.
- Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Z. Dadi, *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G., *Assessment of Hydrological Drought Revisited*, *Water Resources Management*, 23: 881-897, 2009
- Nalbantis, I., *Evaluation of a Hydrological Drought Index*, *European Water* 23/24: 67-77, 2008, E.W. Publications, 2008.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., *River flow forecasting through conceptual models*, A discussion of principles, *Journal of hydrology* 10(3), 282-290, 1970.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. & Williams J.R., *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, Texas, 2005.
- Nicks, A.D., *Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall*, p. 154-171. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, 1974.
- Palmer, W., *Meteorological Drought*, Research paper no.45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Office of Climatology, Washington, D.C., 1965.
- Rio Summit, *Convention on Climate Change, Convention on Biological Diversity*, United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Agenda 21, Rio Declaration, Forestry Agreement, Ocean Conference, Rio, Brasil, 1992.
- Shuttleworth, W., Evaporation, Chapter 4 in *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, editor, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.

- Sloan, J., *GIS Database Development: Lesson 3, Georeferencing Raster Images*. The Pennsylvania State University World Campus Certificate Program in GIS. Retrieved May 2, 2007
- Sloan, P.G., Morre I.D., Coltharp G.B. & Eigel J.D., *Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds*, Water Resources Inst. Report 142. Univ. Kentucky, Lexington, 1983.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J.R., *The Water Balance*, Drexel Inst. Tech. Publ. In *Climatol.*, 8(8), 1-104, 1995.
- Thornthwaite, C. W., *An approach toward a rational classification of climate*, *Geogr. Rev.*, 38(1), 55-94, 1948.
- Tsakiris, G and Vangelis, H., *Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration*, *European Water*, Issue 9/10, 3-11, 2005.
- United Nations Climate Change Conference (UNFCCC), *Climate Change: Impacts, Vulnerabilities and Adaptation in Developing Countries*, Bali, Indonesia, 2007.
- USDA Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology*, Chapters 4-10, 1972.
- USDA Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology*, Chapter 19, 1983.
- Wilson, E.M., *Engineering Hydrology*, The McMillan Press Ltd., London, U.K., 1974.
- World Health Organization (WHO), *Climate Change and Human Health: Risks and Responses*, 2003.

Παράρτημα Α: Πίνακες

Πίνακας Α.1: Υπόμνημα χρήσεων γης της περιοχής μελέτης κατά CORINE LandCover 2000

ΚΩΔΙΚΟΣ ΧΡΗΣΗΣ ΓΗΣ ΚΑΤΑ CORINE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΩΔΙΚΟΥ-ΧΡΗΣΗΣ ΓΗΣ
1.1.2	Ασυνεχής αστικός ιστός
2.1.1	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
2.3.1	Λιβάδια
2.4.2	Σύνθετες καλλιέργειες
2.4.3	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης
3.1.1	Δάσος πλατύφυλλων
3.1.2	Δάσος κωνοφόρων
3.1.3	Μικτό δάσος
3.2.1	Φυσικοί βοσκότοποι
3.2.2	Θάμνοι και χερσότοποι
3.2.3	Σκληροφυλλική βλάστηση
3.2.4	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
3.3.2	Απογυμνωμένοι βράχοι
3.3.3	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση

Πίνακας Α.2: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης

	ΕΛΑΤΗ	ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ	ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ	ΜΟΥΖΑΚΙ
ΕΛΑΤΗ	1	0.364192	0.745433	0.789361
ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ	0.364192	1	0.429253	0.530025
ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ	0.745433	0.429253	1	0.630527
ΜΟΥΖΑΚΙ	0.789361	0.530025	0.630527	1

(Με κίτρινο σημειώνεται ο σταθμός που συγκεντρώνει τις καλύτερες συσχετίσεις με τους υπόλοιπους σταθμούς)

Πίνακας Α.3: Μέσες μηνιαίες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη της Πύλης.

	Min T Πύλη (Means)		Min T Πύλη (St.Dev.)		Max T Πύλη (Means)		Max T Πύλη (St.Dev.)	
	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.
Μήνας								
Οκτ.	8.3	8.15	1.15	1.17	17.61	17.63	1.58	1.58
Νοε.	3.94	3.82	1.53	1.54	11.52	11.49	1.50	1.48
Δεκ.	0.97	1.13	1.36	0.98	8.29	8.32	1.56	1.60
Ιαν.	-0.22	0.39	1.31	0.65	7.87	7.92	0.91	0.87
Φεβ.	0.55	1.03	1.84	1.45	8.66	8.74	1.79	1.84
Μαρ.	3.07	2.93	1.90	1.88	12.11	12.28	2.62	2.55
Απρ.	6.5	6.37	0.85	0.95	16.53	16.66	1.79	1.73
Μαι.	10.12	9.99	0.87	0.92	21.35	21.33	1.35	1.41
Ιουν.	13.49	13.37	0.99	1.05	25.83	25.91	1.45	1.56
Ιουλ.	15.64	15.5	0.91	0.96	28.18	28.19	1.39	1.35
Αυγ.	15.09	14.9	1.14	1.24	27.29	27.37	1.45	1.49
Σεπ.	12.11	12.02	1.00	1.02	23.68	23.79	1.78	1.79
Έτος	7.46	7.47	1.24	1.15	17.41	17.47	1.60	1.60

Πίνακας Α.4: Μέσες μηνιαίες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη του Μουζακίου.

	Min T Μουζάκι (Means)		Min T Μουζάκι (St.Dev.)		Max T Μουζάκι (Means)		Max T Μουζάκι (St.Dev.)	
	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.
Μήνας								
Οκτ.	8.79	8.72	1.15	1.16	18.10	18.18	1.58	1.64
Νοε.	4.42	4.37	1.53	1.58	12.00	12.03	1.50	1.48
Δεκ.	1.45	1.50	1.36	1.11	8.77	8.76	1.56	1.57
Ιαν.	0.27	0.67	1.31	0.86	8.35	8.42	0.91	0.89
Φεβ.	1.03	1.31	1.84	1.54	9.15	9.25	1.79	1.98
Μαρ.	3.55	3.38	1.90	1.83	12.59	12.80	2.62	2.71
Απρ.	6.98	6.89	0.85	0.90	17.01	17.07	1.79	1.81
Μαι.	10.61	10.53	0.87	0.90	21.84	21.82	1.35	1.39
Ιουν.	13.97	13.90	0.99	1.01	26.32	26.33	1.45	1.42
Ιουλ.	16.12	16.03	0.91	0.97	28.66	28.64	1.39	1.36
Αυγ.	15.57	15.46	1.14	1.21	27.77	27.80	1.45	1.42
Σεπ.	12.60	12.57	1.00	1.05	24.17	24.26	1.78	1.86
Έτος	7.95	7.94	1.24	1.18	17.89	17.95	1.60	1.63

Πίνακας Α.5: Μέσες μηνιαίες τιμές και τυπικές αποκλίσεις της βροχόπτωσης για την λεκάνη του Μουζακίου.

	Μουζάκι (Means)		Μουζάκι (St.Dev.)	
	Θεωρ.	Συνθετ.	Θεωρ.	Συνθετ.
Μήνας				
Οκτ.	152.89	149.12	77.48	73.53
Νοε.	188.13	190.67	70.87	69.51
Δεκ.	190.83	190.86	88.16	93.44
Ιαν.	126.09	125.92	76.41	76.40
Φεβ.	152.91	150.77	85.06	88.75
Μαρ.	127.27	127.70	66.42	65.89
Απρ.	140.95	139.36	59.86	60.33
Μαι.	107.69	105.40	44.30	46.08
Ιουν.	46.67	46.55	28.89	29.62
Ιουλ.	30.53	30.10	29.43	28.85
Αυγ.	36.66	39.03	30.14	29.22
Σεπ.	47.99	46.70	42.00	41.42
Έτος	1348.62	1342.15	242.43	249.50

Πίνακας Α.6: Μέσοι όροι απορροών λεκάνης Πύλης για κάθε σενάριο (2070-2100).

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Year
2070-2080													
A1B	1.27	3.31	4.30	3.63	3.59	2.97	2.10	1.08	0.25	0.03	0.03	0.07	1.89
A2	1.05	3.76	4.63	3.52	3.56	3.66	3.42	2.38	0.59	0.05	0.02	0.09	2.23
B2	1.21	4.34	5.49	4.34	4.50	4.26	3.76	2.60	0.70	0.08	0.06	0.13	2.62
2080-2090													
A1B	1.49	3.41	6.46	5.31	5.54	4.21	2.87	1.37	0.23	0.03	0.03	0.19	2.60
A2	1.46	3.86	6.44	5.21	5.31	4.18	2.94	1.60	0.31	0.02	0.01	0.24	2.63
B2	1.57	4.28	7.74	6.56	6.80	5.61	4.38	2.69	0.64	0.06	0.05	0.27	3.39
2090-2100													
A1B	1.24	3.48	6.76	6.37	6.20	3.99	3.31	2.09	0.45	0.04	0.09	0.20	2.85
A2	1.68	4.62	7.52	6.49	6.31	4.87	4.09	2.78	0.69	0.04	0.05	0.38	3.29
B2	1.71	4.93	8.56	7.64	7.37	5.95	5.43	4.03	1.19	0.13	0.20	0.42	3.96

Πίνακας Α.7: Τυπικές αποκλίσεις απορροών λεκάνης Πύλης για κάθε σενάριο (2070-2100).

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Year
2070-2080													
A1B	0.58	2.01	3.13	2.91	2.67	3.51	2.20	1.11	0.38	0.10	0.09	0.19	1.19
A2	0.51	1.84	2.86	2.48	2.20	3.35	2.10	1.02	0.34	0.04	0.03	0.16	1.11
B2	0.58	2.01	3.13	2.91	2.67	3.51	2.20	1.11	0.38	0.10	0.09	0.19	1.19
2080-2090													
A1B	0.45	1.55	3.94	2.24	1.96	1.27	1.46	0.72	0.13	0.04	0.06	0.31	0.72
A2	0.43	1.78	4.05	2.07	1.81	1.29	1.49	0.79	0.20	0.02	0.01	0.41	0.67
B2	0.48	1.99	4.43	2.41	2.40	1.80	2.08	1.27	0.44	0.04	0.07	0.43	0.78
2090-2100													
A1B	0.60	1.83	2.21	2.24	2.84	1.91	2.00	1.43	0.42	0.06	0.12	0.28	0.70
A2	1.13	2.41	2.56	2.07	2.84	2.72	2.47	1.87	0.75	0.06	0.07	0.54	0.86
B2	1.21	2.46	2.92	2.73	3.32	3.38	3.10	2.47	1.06	0.15	0.22	0.54	1.07

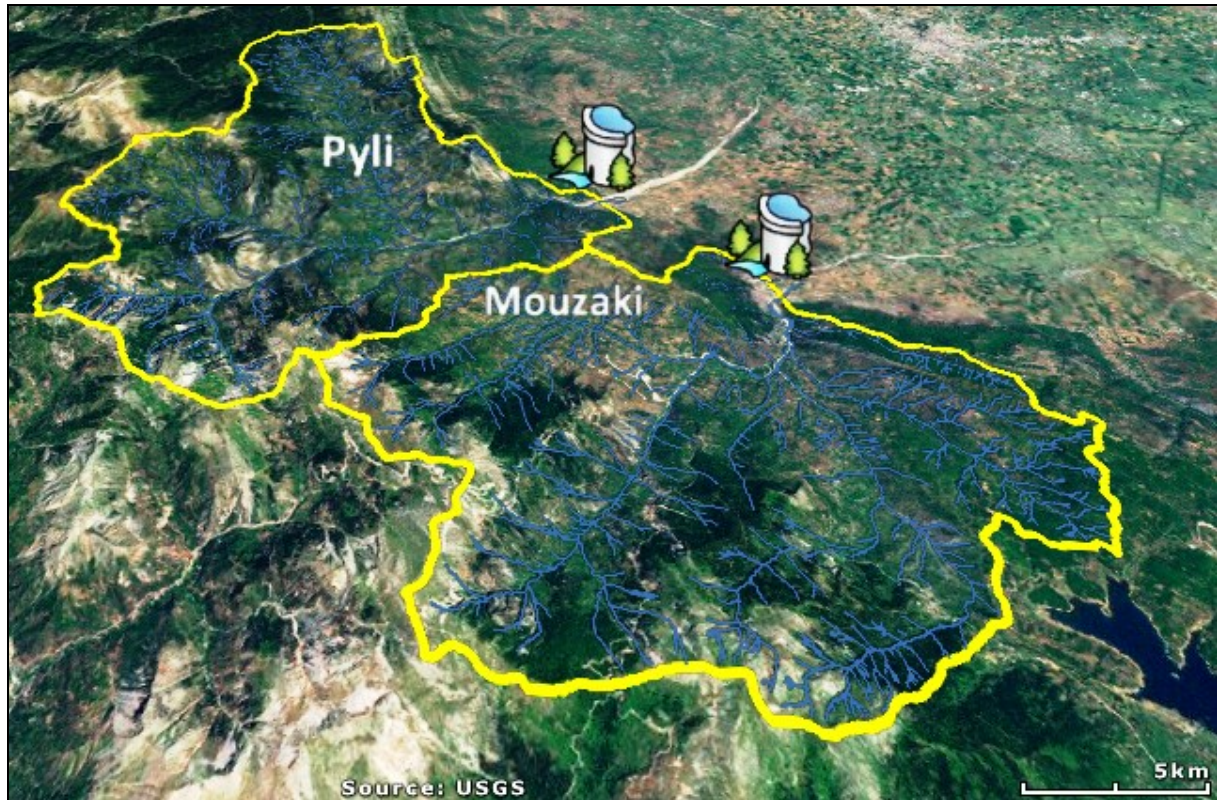
Πίνακας Α.8: Μέσοι όροι απορροών λεκάνης Μουζακίου για κάθε σενάριο (2070-2100).

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Year
2070-2080													
A1B	0.99	2.18	2.51	3.18	3.38	2.35	1.30	0.51	0.14	0.02	0.12	0.27	1.46
A2	0.88	2.42	2.68	3.07	3.29	2.91	2.22	1.14	0.23	0.02	0.09	0.32	1.62
B2	1.00	2.95	3.56	4.09	4.38	3.60	2.57	1.27	0.28	0.04	0.17	0.40	2.09
2080-2090													
A1B	0.75	1.72	3.86	3.92	4.83	3.43	2.03	0.85	0.14	0.06	0.04	0.30	1.82
A2	0.80	1.97	3.91	3.93	4.59	3.38	2.08	1.02	0.19	0.04	0.01	0.41	1.87
B2	0.88	2.26	4.94	5.23	6.13	4.71	3.36	1.87	0.39	0.11	0.05	0.47	2.51
2090-2100													
A1B	1.00	2.84	4.05	4.38	5.12	3.54	2.23	0.97	0.24	0.07	0.06	0.15	1.98
A2	1.25	3.77	4.75	4.61	5.29	4.50	3.01	1.33	0.28	0.07	0.03	0.31	2.34
B2	1.35	4.16	5.53	5.53	6.33	5.68	4.17	2.05	0.61	0.25	0.18	0.36	2.93

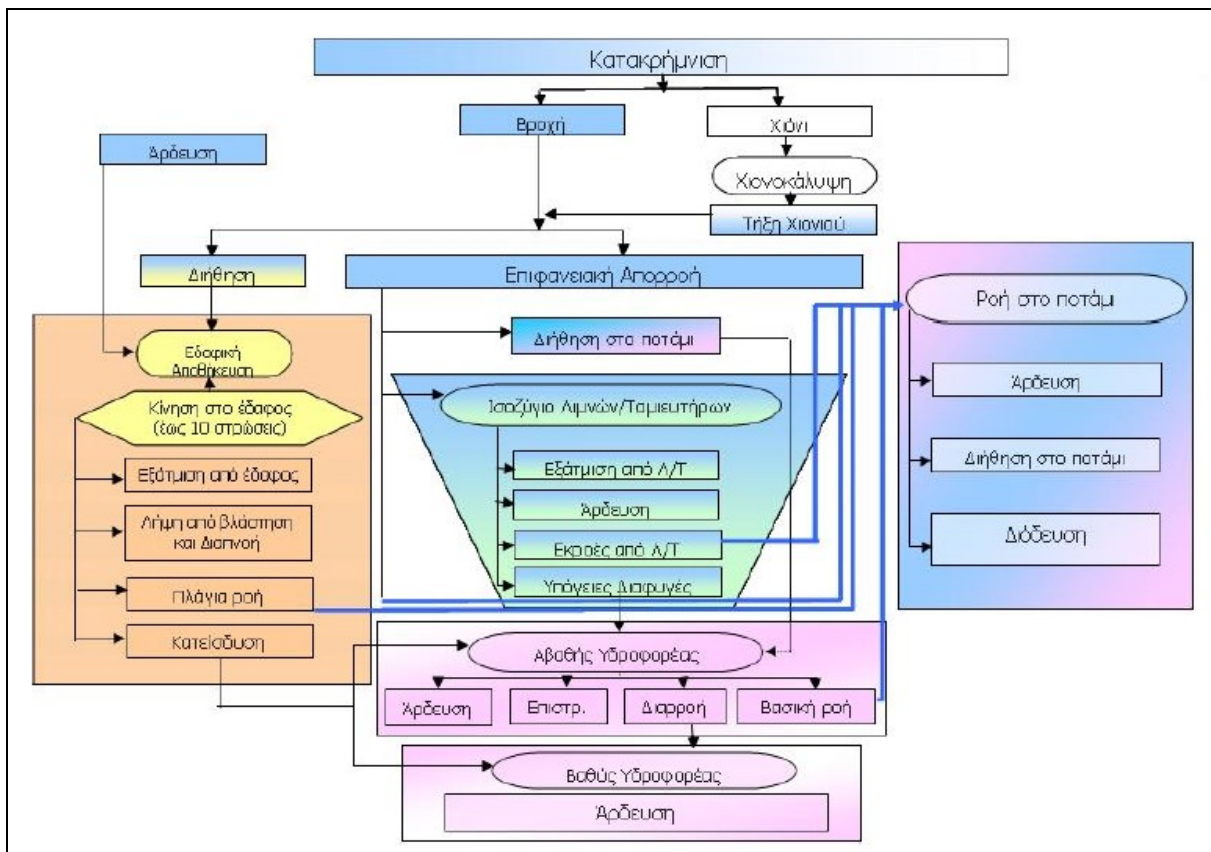
Πίνακας Α.9: Τυπικές αποκλίσεις απορροών λεκάνης Μουζακίου για κάθε σενάριο (2070-2100).

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Year
2070-2080													
A1B	0.33	1.02	1.30	1.79	1.75	1.37	0.82	0.37	0.07	0.02	0.21	0.67	0.44
A2	0.35	1.16	1.36	1.67	1.70	1.66	1.40	0.77	0.14	0.01	0.16	0.82	0.49
B2	0.42	1.44	1.87	2.10	1.96	1.88	1.61	0.86	0.15	0.04	0.29	0.94	0.67
2080-2090													
A1B	0.43	0.70	0.97	1.74	3.70	1.81	1.00	0.52	0.08	0.10	0.05	0.54	0.50
A2	0.46	0.77	0.98	1.85	3.36	1.63	1.05	0.62	0.12	0.07	0.02	0.74	0.48
B2	0.51	0.96	1.18	2.26	4.31	1.96	1.59	1.16	0.29	0.15	0.06	0.82	0.59
2090-2100													
A1B	0.41	1.52	2.06	2.20	3.37	1.57	0.98	0.46	0.19	0.11	0.05	0.18	0.66
A2	0.53	1.99	2.36	2.09	3.17	1.56	1.31	0.59	0.19	0.11	0.04	0.33	0.69
B2	0.58	2.18	2.68	2.48	3.75	1.75	1.72	0.92	0.44	0.32	0.12	0.32	0.72

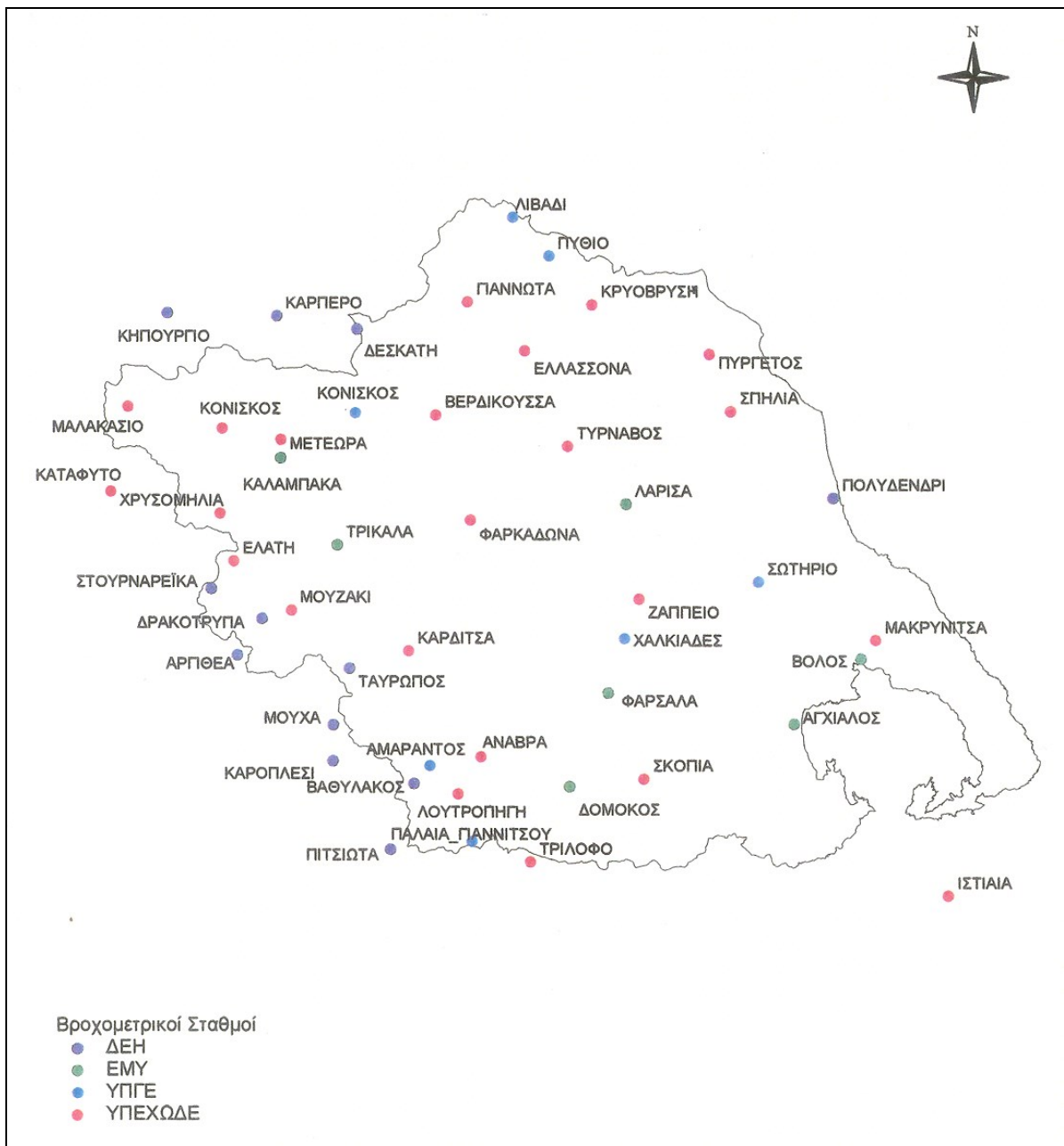
Παράρτημα Β: Σχήματα



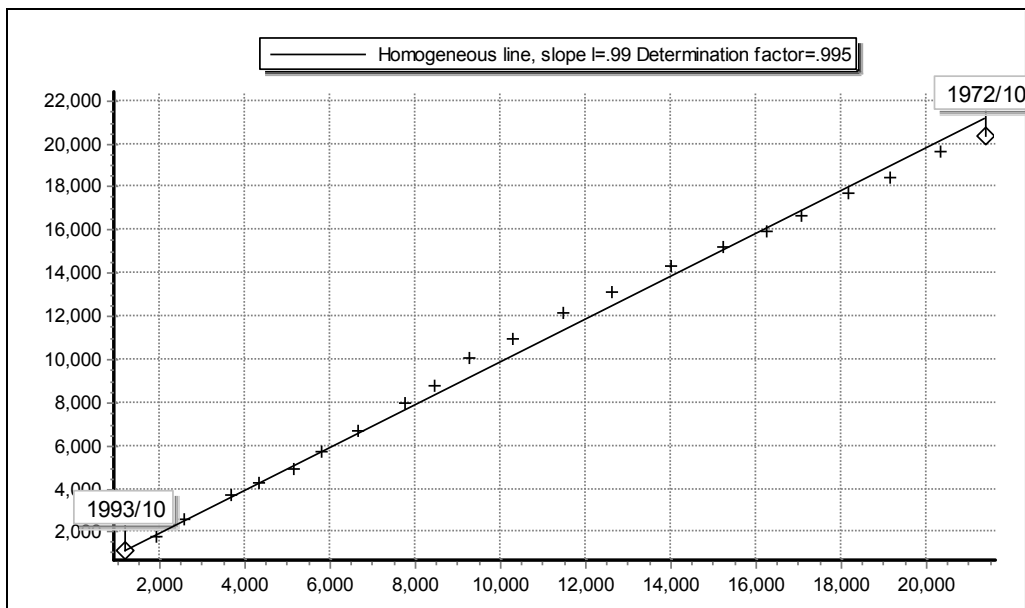
Σχήμα Β.1: Ο χάρτης της περιοχής μελέτης σε τρισδιάστατη απεικόνιση με σχεδιασμένες τις λεκάνες απορροής ανάντη των υδρομετρικών σταθμών, και το αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο, όπως σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον του ArcMap.



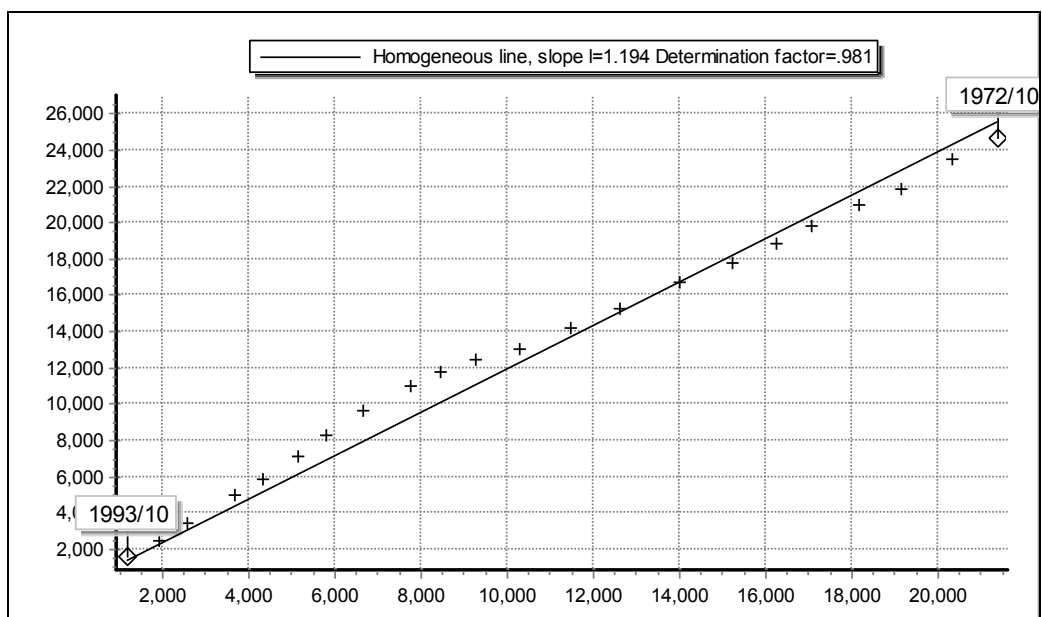
Σχήμα Β.2: Διάγραμμα ροής του υδρολογικού κύκλου του μοντέλου (Πηγή: Neitsch et al., 2005).



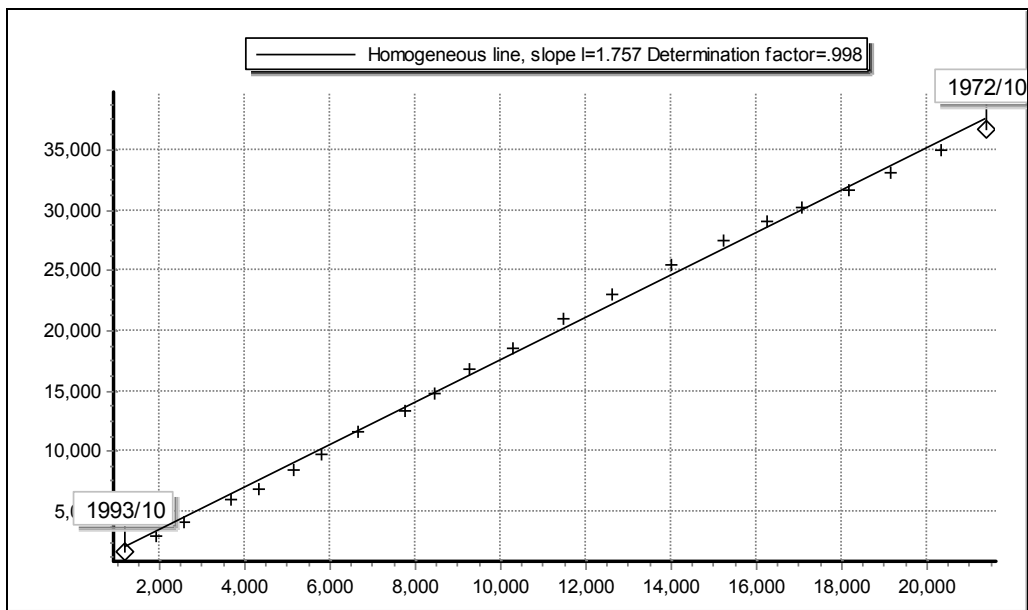
Σχήμα Β.3: Ο χάρτης των βροχομετρικών σταθμών του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: Ι. Ναλμπάντης & Δ. Κουτσογιάννης, 1997)



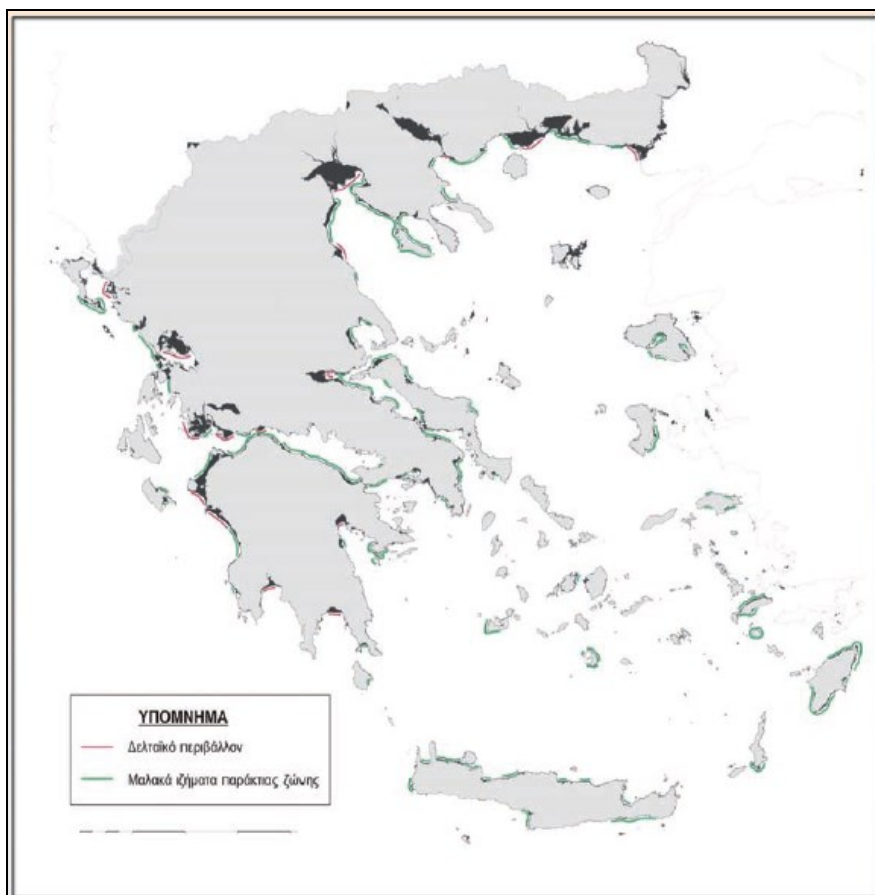
Σχήμα Β.4.α: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Μουζάκι και ελεγχόμενο σταθμό το Μορφοβούνι (συντελεστής $R^2= 0.995$, κλίση ευθείας $I=0.99$)



Σχήμα Β.4.β: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Μουζάκι και ελεγχόμενο σταθμό τη Δρακότρυπα (συντελεστής $R^2= 0.981$, κλίση ευθείας $I=1.194$)

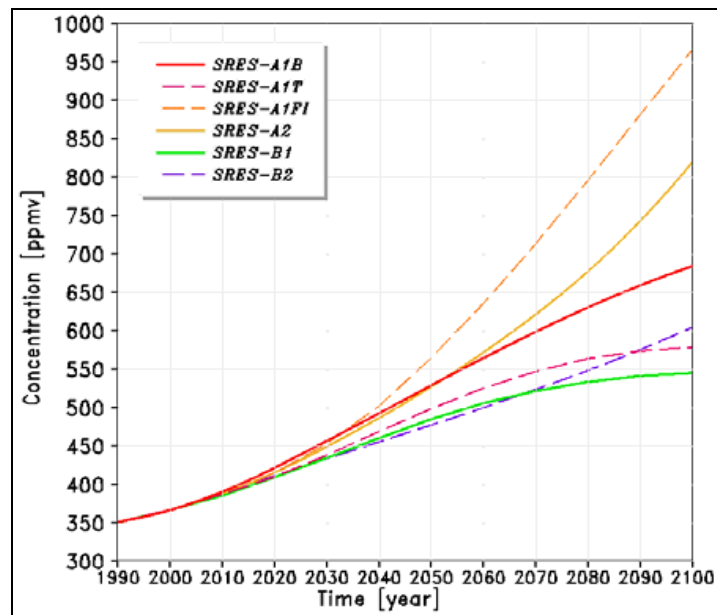


Σχήμα Β.4.γ: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Μουζάκι και ελεγχόμενο σταθμό την Ελάτη (συντελεστής $R^2= 0.998$, κλίση ευθείας $l=1.757$)



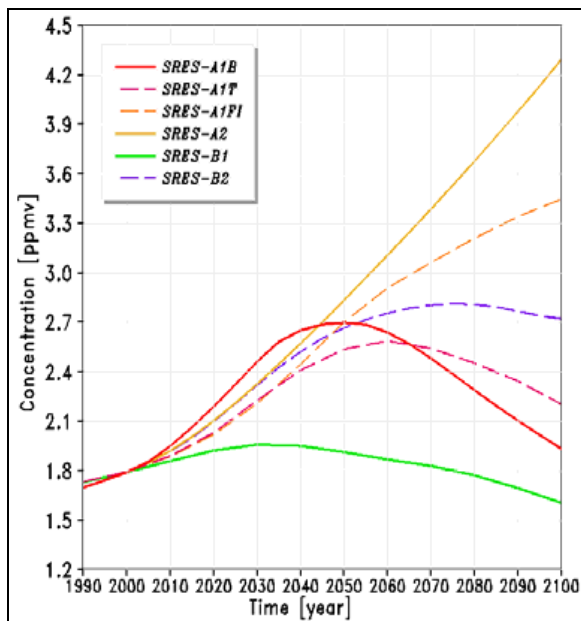
Σχήμα Β.5: Χάρτης της Ελλάδας των ζωνών που διακρίνονται σε: μέτριας (πράσινο χρώμα) και υψηλής τρωτότητας (ερυθρό χρώμα) και περιοχές χαλαρών ιζηματογενών αποθέσεων με υψόμετρο κάτω των 20 μέτρων (μαύρο χρώμα). (Πηγή: ΕΜΕΚΑ, 2011α)

CO₂

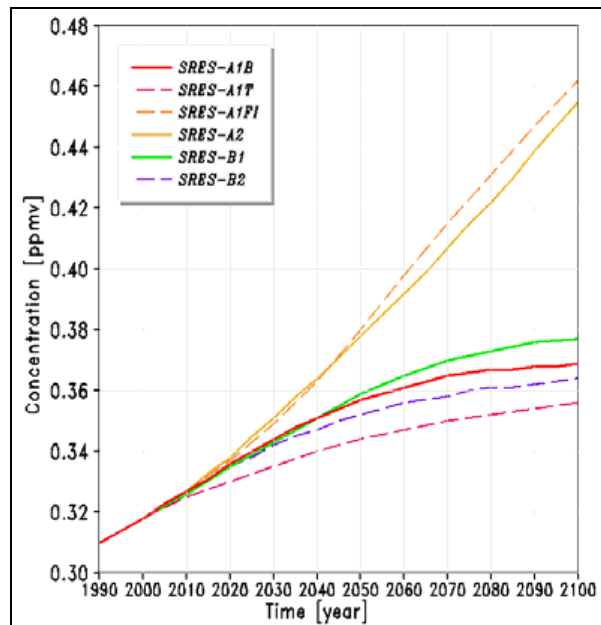


Σχήμα Β.6.α: Χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά τον 21ο αιώνα βάσει των σεναρίων εκπομπών A1B, A1T, A1F, A2, B1 και B2. (Πηγή ΕΜΕΚΑ, 2011b)

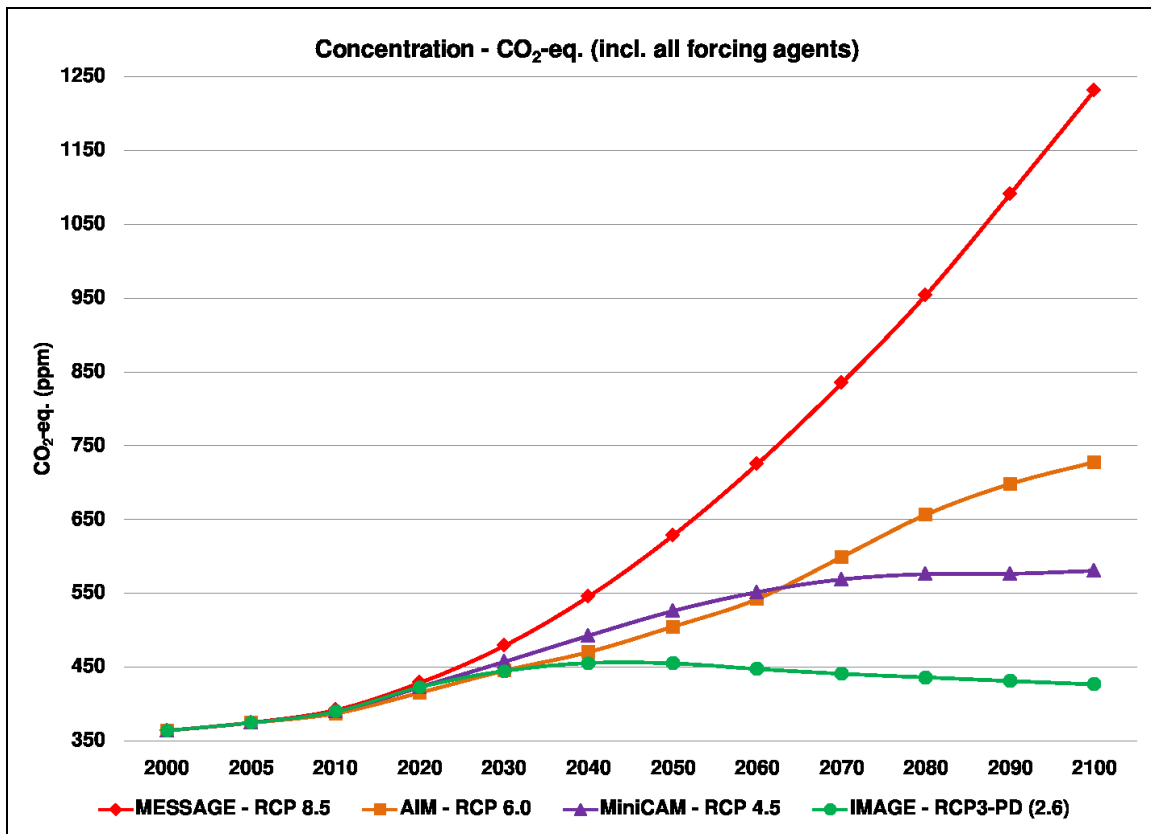
CH₄



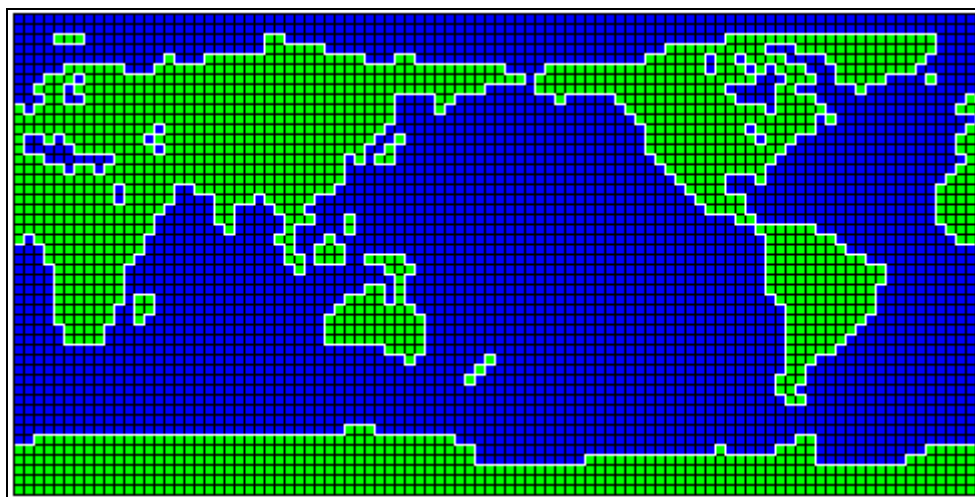
N₂O



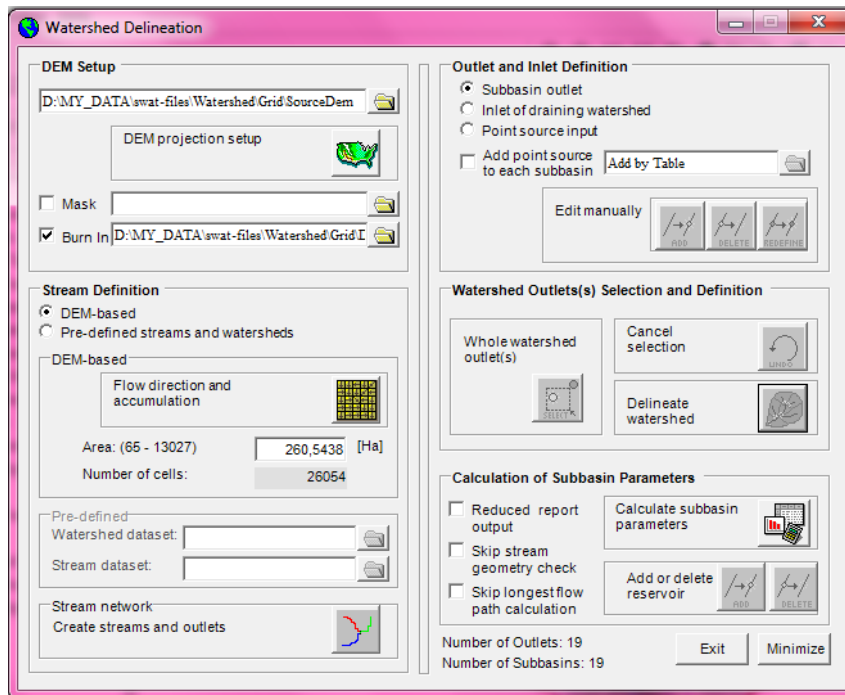
Σχήμα Β.6.β: Χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων του μεθανίου (CH₄) και του μονοξειδίου του αζώτου (N₂O) κατά τον 21ο αιώνα βάσει των σεναρίων εκπομπών A1B, A1T, A1F, A2, B1 και B2. (Πηγή ΕΜΕΚΑ, 2011b)



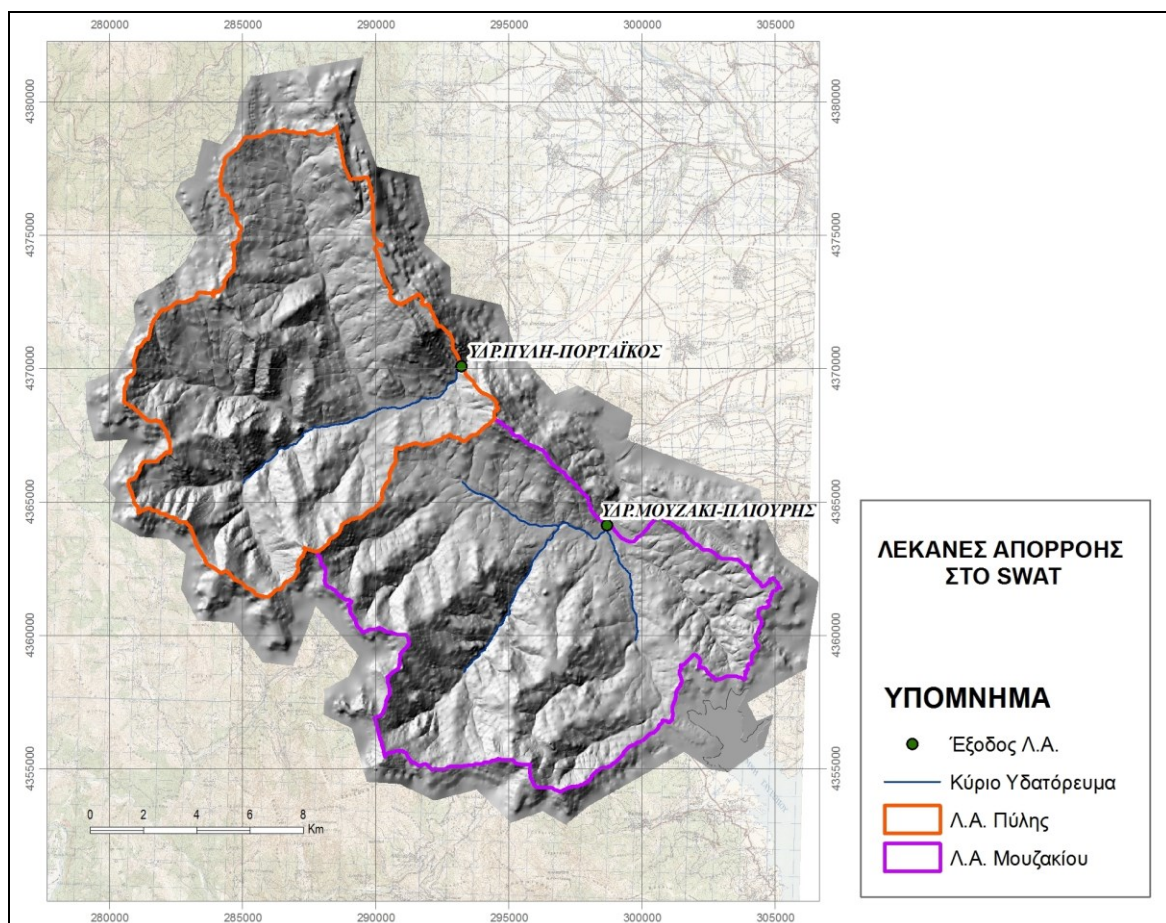
Σχήμα Β.7: Ισοδύναμες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO₂ για την διαφορά ακτινοβολίας βάσει των τεσσάρων RCPs (ppm). (Πηγή Wikipedia)



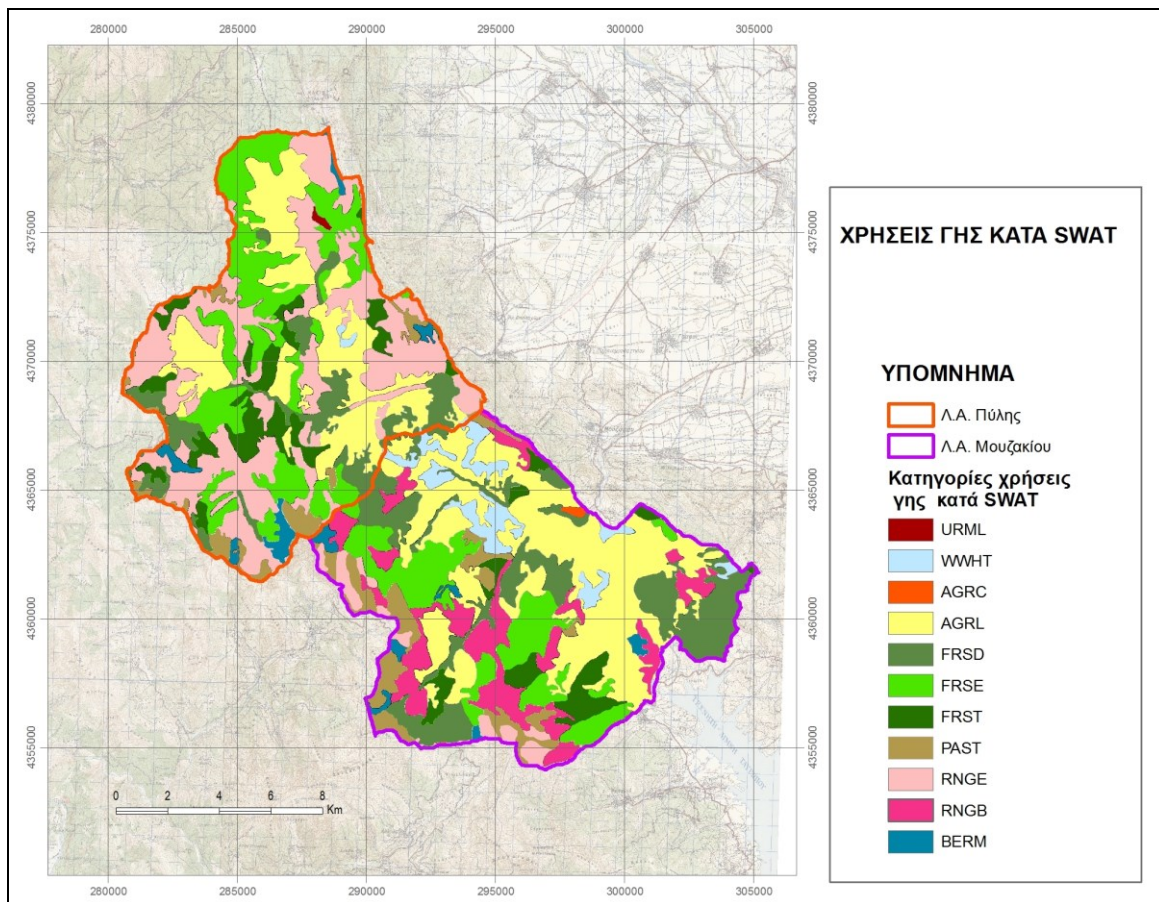
Σχήμα Β.8: Ο τετραγωνικός κάρναβος του μοντέλου CGCM3, έκδοσης T47, που αποτελείται από 96×48 εικονομηφίδες ανάλυσης 3.75° × 3.75°. Η Ελλάδα μετά βίας διακρίνεται (Πηγή CCCma).



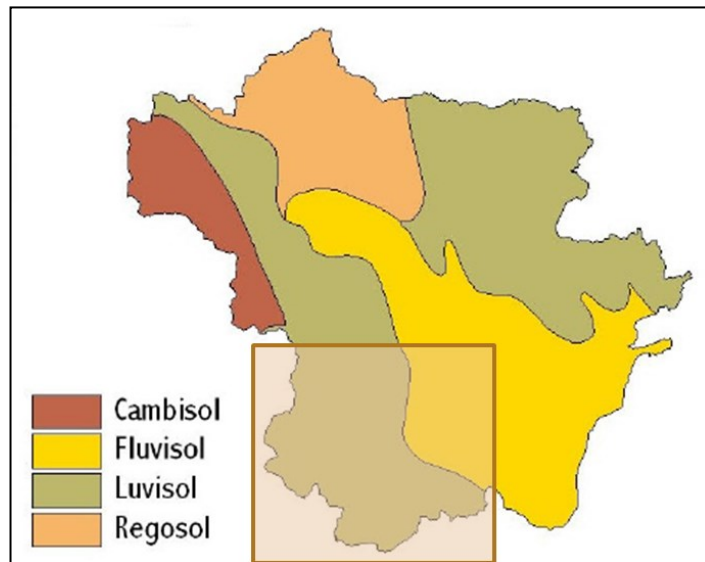
Σχήμα Β.9: Το πλαίσιο ενεργειών χάραξης του υδροκρίτη



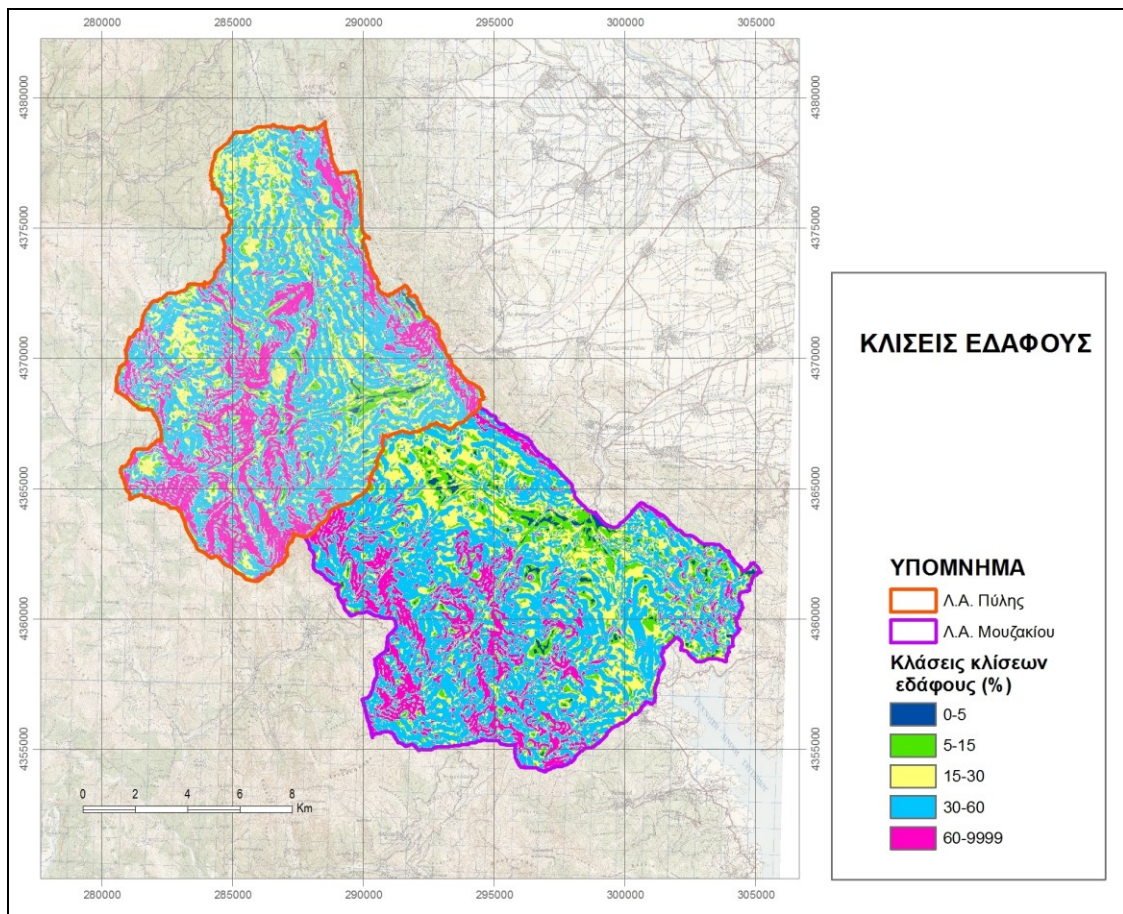
Σχήμα Β.10: Χάρτης των λεκανών απορροής που απεικονίζει τους υδροκρίτες, τα κύρια υδατορεύματα και τις επιλεγθείσες εξόδους της κάθε λεκάνης με υπόβαθρο το ΨΜΕ.



Σχήμα Β.11: Χάρτης των λεκανών που απεικονίζει τις χρήσεις γης κατά SWAT.



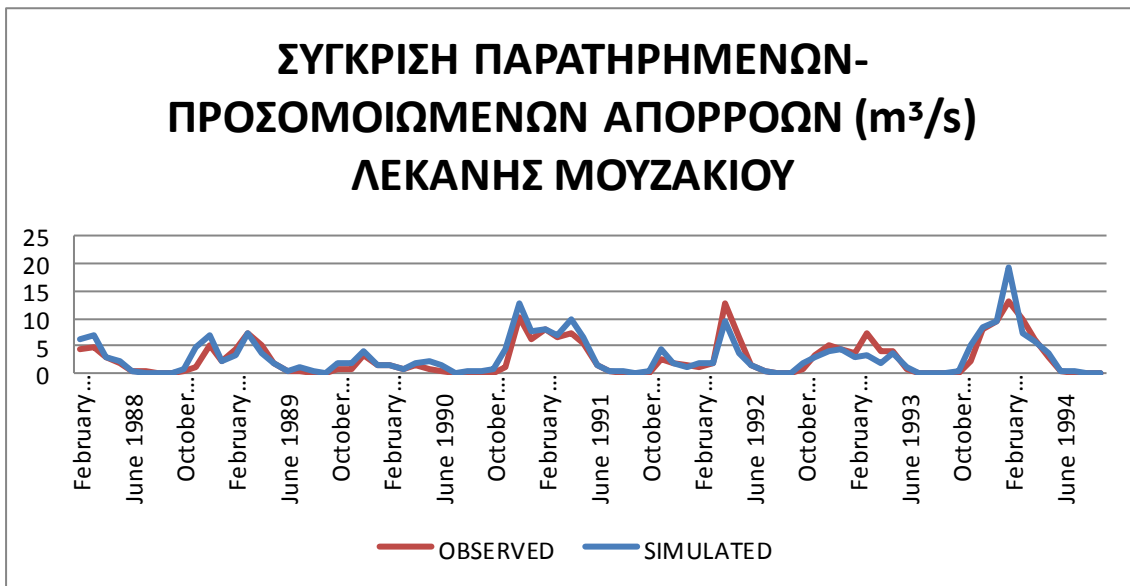
Σχήμα Β.12: Εδαφολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης σε ομαδοποίηση εδαφών κατά εδαφικές κατηγορίες FAO. Η περιοχή μελέτης των λεκανών απορροής Πύλης και Μουζακίου βρίσκεται μέσα στο πλαίσιο. (Πηγή: Πικούνης, 2002)



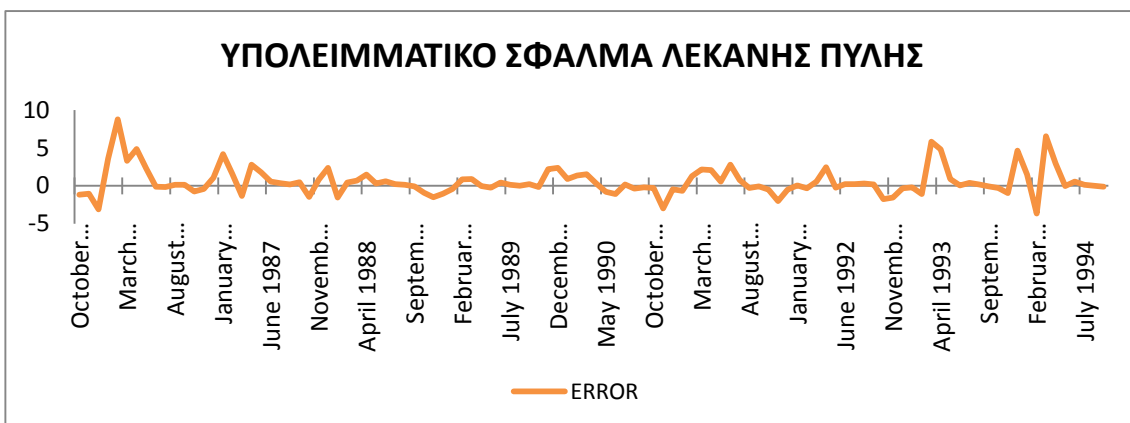
Σχήμα Β.13: Χάρτης των λεκανών που απεικονίζει τις κλίσεις του αναγλύφου.



Σχήμα Β.14.α: Διάγραμμα σύγκρισης παρατηρημένων (observed) με προσομοιωμένες (simulated) απορροές για την λεκάνη της Πύλης.



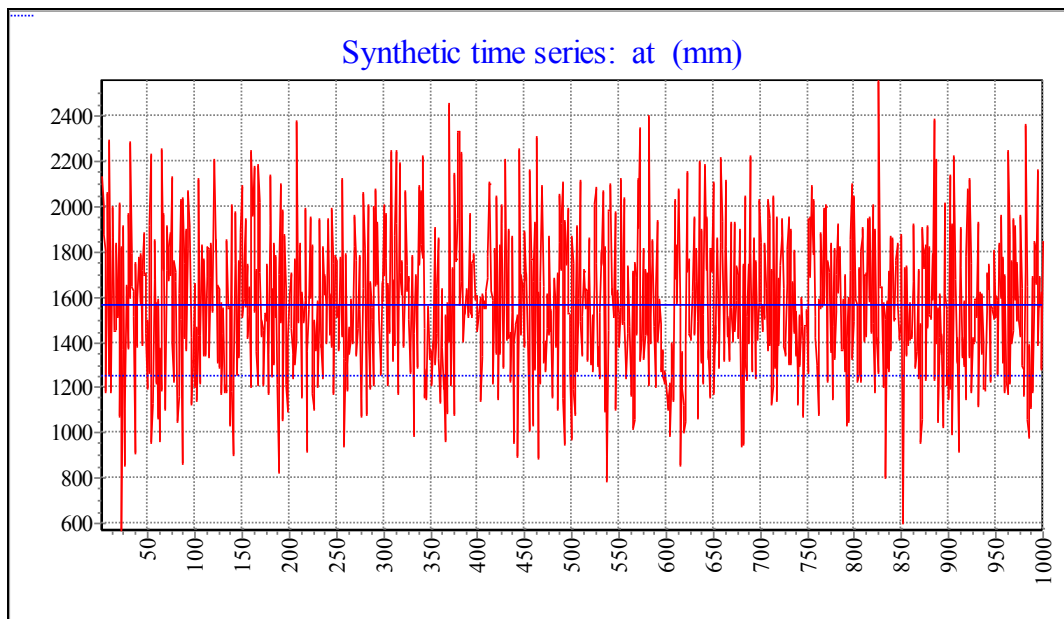
Σχήμα Β.14.β: Διάγραμμα σύγκρισης παρατηρημένων (observed) με προσομοιωμένες (simulated) απορροές για την λεκάνη του Μουζακίου.



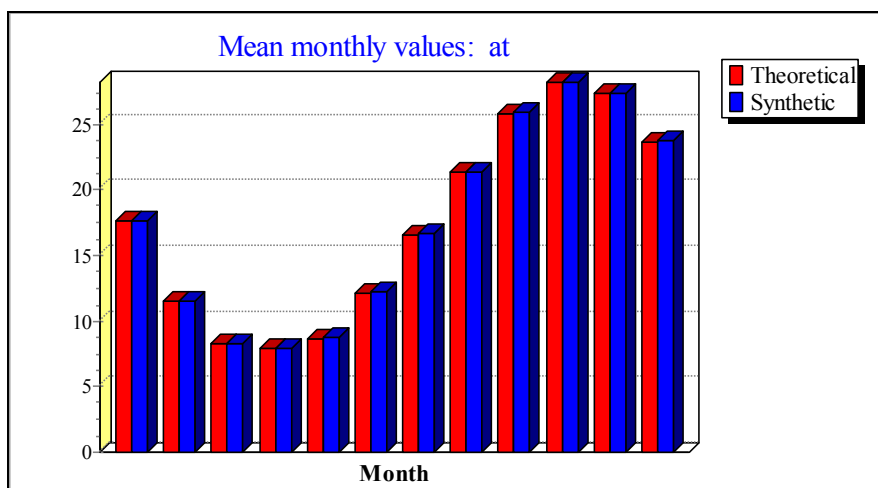
Σχήμα Β.15.β: Διάγραμμα υπολειμματικού σφάλματος (σφάλμα κλεισίματος) μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων απορροών της λεκάνης της Πύλης.



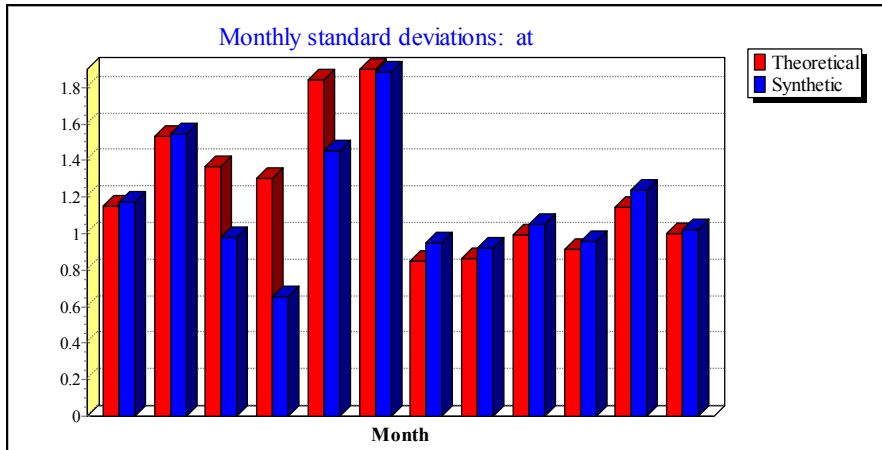
Σχήμα Β.15.β: Διάγραμμα υπολειμματικού σφάλματος (σφάλμα κλεισίματος) μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων απορροών της λεκάνης της Πύλης.



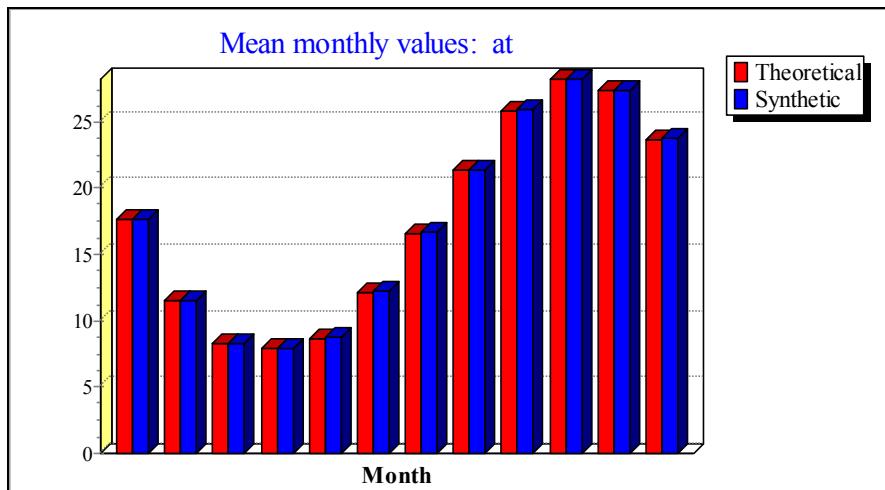
Σχήμα Β.16: Διάγραμμα συνθετικής χρονοσειράς βροχόπτωσης 1000 ετών για τη λεκάνη Πύλης.



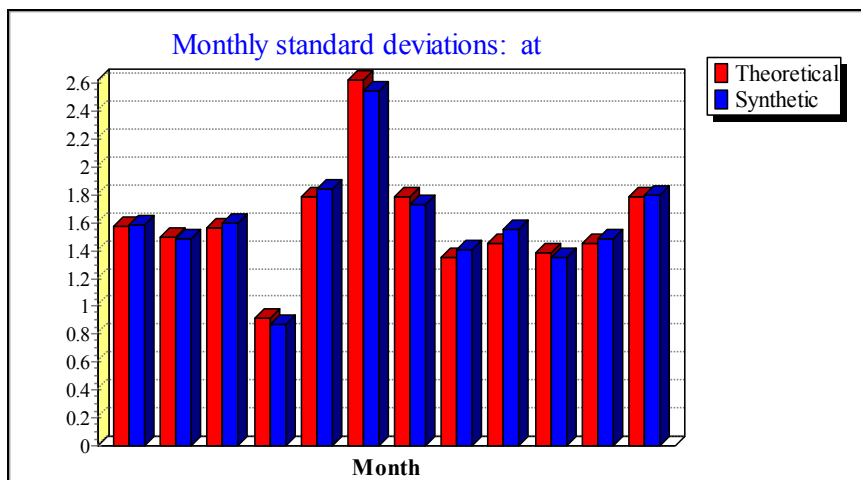
Σχήμα Β.17.α: Μέσες μηνιαίες τιμές θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) ελάχιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη της Πύλης.



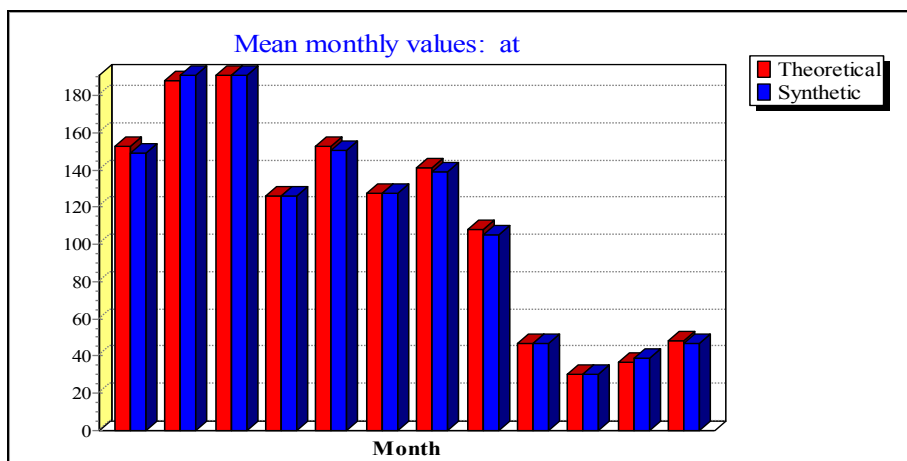
Σχήμα Β.17.β: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) ελάχιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη της Πύλης.



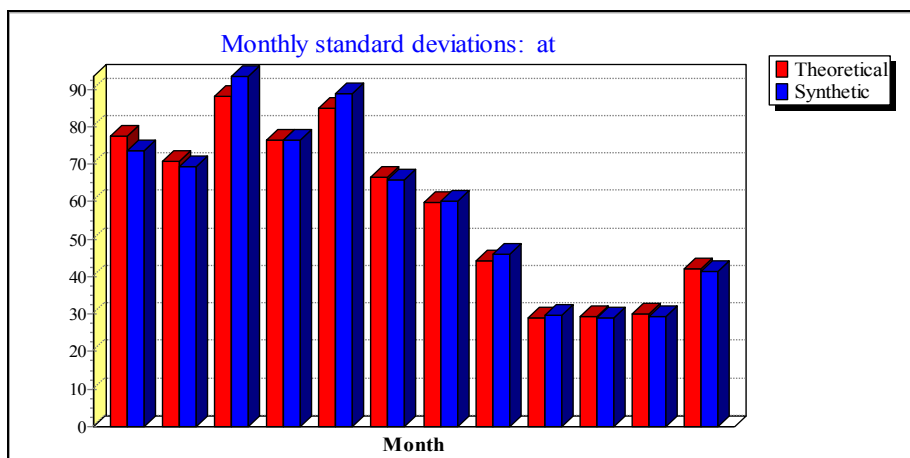
Σχήμα Β.18.α: Μέσες μηνιαίες τιμές θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) μέγιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη της Πύλης.



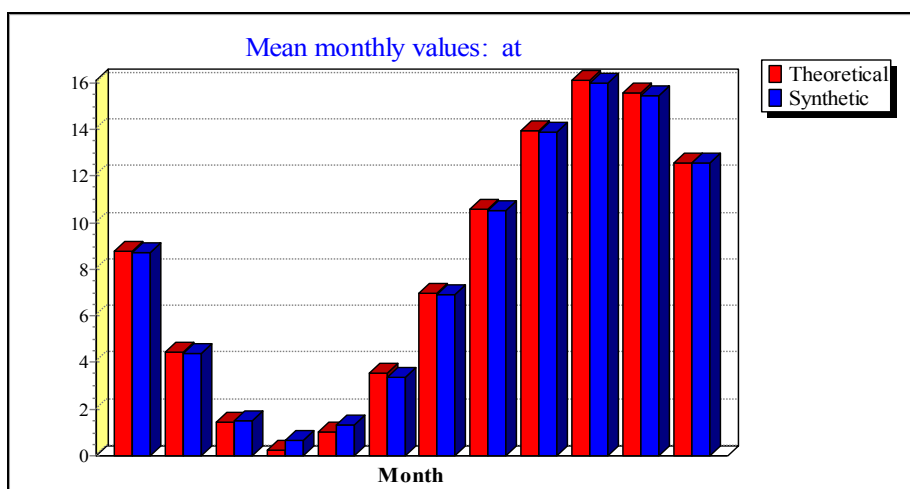
Σχήμα Β.18.β: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) μέγιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη της Πύλης.



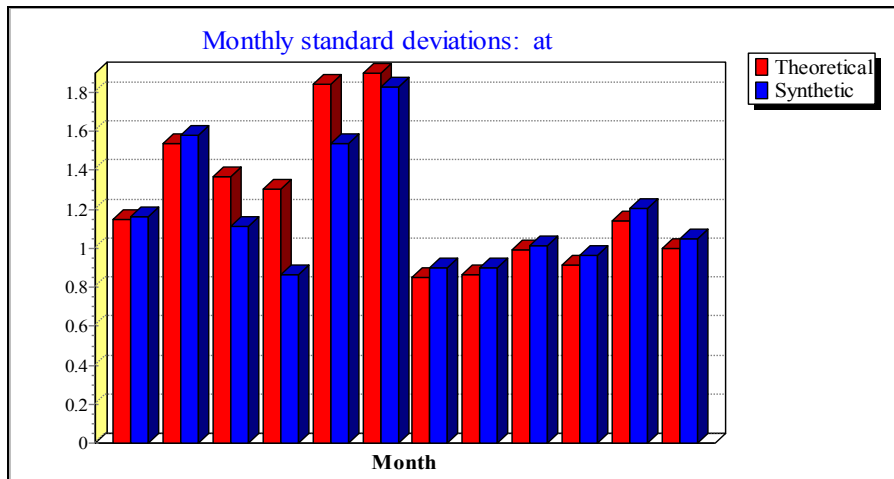
Σχήμα Β.19.α: Μέσες μηνιαίες τιμές θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) βροχόπτωσης για την λεκάνη του Μουζακίου.



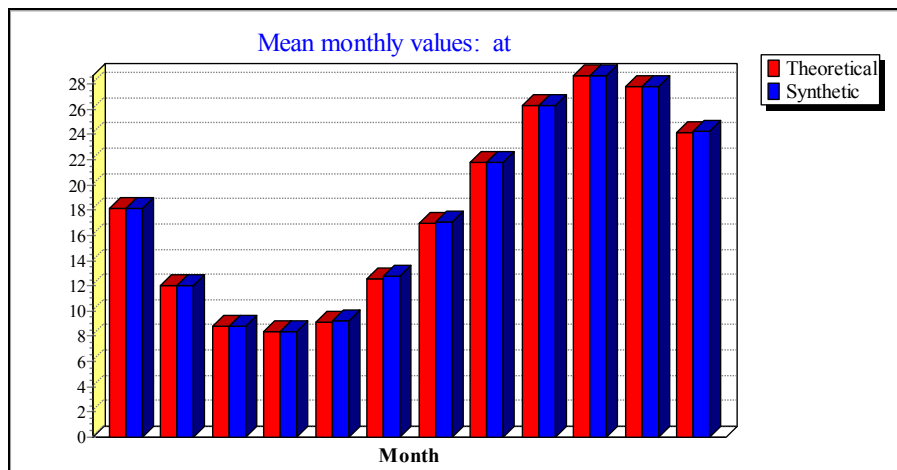
Σχήμα Β.19.β: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) βροχόπτωσης για την λεκάνη του Μουζακίου.



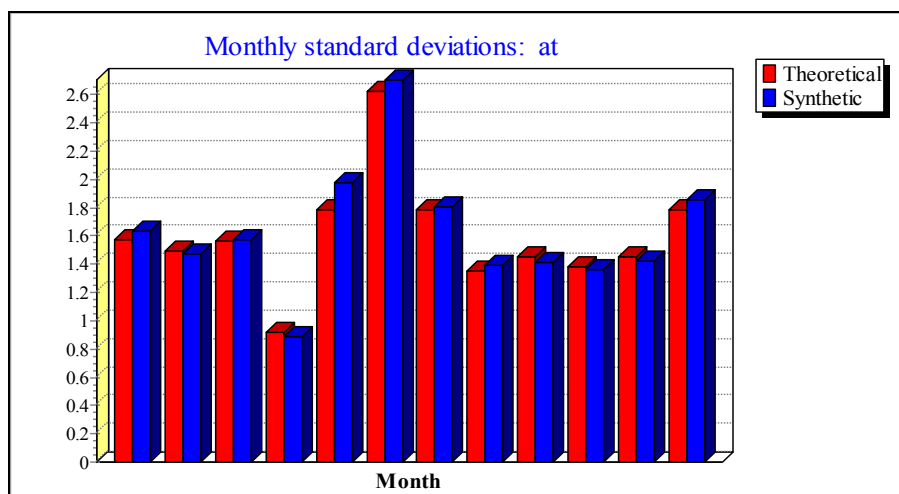
Σχήμα Β.20.α: Μέσες μηνιαίες τιμές θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) ελάχιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη του Μουζακίου.



Σχήμα Β.20.β: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) ελάχιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη του Μουζακίου.



Σχήμα Β.21.α: Μέσες μηνιαίες τιμές θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) μέγιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη του Μουζακίου.



Σχήμα Β.21.β: Μηνιαίες τιμές τυπικής απόκλισης θεωρητικής χρονοσειράς (κόκκινο) και συνθετικής χρονοσειράς (μπλε) μέγιστης θερμοκρασίας για την λεκάνη του Μουζακίου.

