ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΑΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ (ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ)

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αικατερίνη - Σοφία Γ. Παρτσινεβέλου
M.Sc. Γεωλόγος - Γεωπεριβαλλοντολόγος

Αθήνα, 2016

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

με τίτλο:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΙΑΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ (ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ)

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Στουρνάρας Γεώργιος	Ομότιμος Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α. (Επιβλέπων)	Συμβουλευτική Επιτροπή
Σταυροπούλου Μαρία	Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Κ.Π.Α.	
Λόζιος Στυλιανός	Επίκουρος Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.	
Λέκκας Ευθύμιος	Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.	
Σταμάτης Γεώργιος	Καθηγητής Γ.Π.Α.	
Βουδούρης Κωνσταντίνος	Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.	

Η έγκριση της παρούσας διδακτορικής διατριβής από το τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, δεν προϋποθέτει και την αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

(Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Στους γονείς μου και στο σύζυγό μου

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ειδικότερα, επιθυμώ να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες:

Στον επιβλέποντα Ομότιμο Καθηγητή κ. Στουρνάρα Γεώργιο, για την αμέριστη εμπιστοσύνη και στήριξη που μου έδειξε σε όλα τα στάδια της έρευνας αυτής, καθώς και για την επιστημονική βοήθεια και τη στήριξη σε όλη μου την πορεία στο τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, από το δεύτερο έτος σπουδών μέχρι και σήμερα. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, εντάσσοντάς με στην ερευνητική του ομάδα, δίνοντας μου έτσι την ευκαιρία να αποκομίσω πολύτιμες γνώσεις και εμπειρία.

Στα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Σταυροπούλου Μαρία και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λόζιο Στυλιανό, για την καθοδήγησή τους, τις εύστοχες παρατηρήσεις τους και τις συμβουλές τους κατά τη διάρκεια της έρευνας, καθώς και τη συμβολή τους για την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στον Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταμάτη, μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής, τόσο για την παραχώρηση του εργαστηρίου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την πραγματοποίηση των χημικών αναλύσεων, όσο και για τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγησή του στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των υδροχημικών αναλύσεων.

Στον Καθηγητή κ. Λέκκα Ευθύμιο, μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής, για τις πολύτιμες γνώσεις καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου, είτε σε προπτυχιακό είτε σε μεταπτυχιακό επίπεδο, καθώς και για την πολύτιμη συμβολή του στην προσπάθεια αυτή.

Στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο, μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής, για τις εποικοδομητικές συζητήσεις σε θέματα υδρογεωλογίας κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας διατριβής, καθώς και για την πολύτιμη συμβολή του για την ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής.

Στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Βασιλάκη Εμμανουήλ, για την παροχή δεδομένων τηλεπισκόπισης και στον κ. Δρ. Σούκη Κωνσταντίνο για την παροχή βιβλιογραφικών στοιχείων.

Στα μέλη Δ.Ε.Π., τους μεταπτυχιακούς φοιτητές, τους υποψήφιους διδάκτορες και το προσωπικό του Τομέα Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, που ήταν πάντα παρόντες και πρόθυμοι να βοηθήσουν οποιαδήποτε στιγμή.

Στη φίλη και συνάδελφο κ. Λάσκαρη Σοφία, για την πολύπλευρη βοήθειά της σε όλους τους τομείς, καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά της κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου.

Στην καλή φίλη κ. Κακαρούγκα Γιολάντα για την αμέριστη ηθική υποστήριξη και τη συνεχή παρότρυνσή της για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς μου και στο σύζυγό μου, οι οποίοι με στήριξαν με κάθε δυνατό τρόπο όσο κανένας άλλος σε όλα τα στάδια της διδακτορικής μου διατριβής, οικονομικά και ηθικά, και ιδιαίτερα για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν στη νήσο Νάξο.

Περίληψη

Ως σκληρά διερρηγμένα πετρώματα εννοούνται τα κρυσταλλικά πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, τα μη καρστικοποιημένα ανθρακικά, καθώς και τα ισχυρώς συγκολλημένα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της επιφανειακής έκτασης, τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε εθνικό επίπεδο, και καλύπτουν σημαντικές υδατικές ανάγκες. Τα πετρώματα αυτά εμπλέκονται στη διαμόρφωση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος με την ανάπτυξη υδροφοριών, όπου η εμφάνιση κυρίως του δευτερογενούς πορώδους, η ανισοτροπία και η ετερογένεια είναι τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Το συνολικό υδρογεωλογικό περιβάλλον των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, καθώς επικρατούν διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες.

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι να παρουσιαστεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για την προσομοίωση της υπόγειας ροής σε ετερογενές μέσο ασυνεχειών, ούτως ώστε να είναι δυνατή η μελέτη των υδροφοριών και των υδραυλικών διασυνδέσεων μεταξύ τους, που αναπτύσσονται σε σκληρά διερρηγμένα πετρώματα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται λεπτομερής μελέτη όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την υπόγεια ροή στο μέσο ασυνεχειών, όπως η γεωλογία, η γεωμορφολογία, τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, κ.τ.λ. (ενδογενείς παράγοντες), καθώς και οι κλιματικοί παράγοντες και οι χρήσεις γης (εξωγενείς παράγοντες). Επίσης γίνεται μελέτη και πρόβλεψη των μεταβολών των υπόγειων υδατικών συστημάτων μέχρι το έτος 2100, έχοντας ως γνώμονα τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες που θα επικρατούν, λόγω των κλιματικών αλλαγών. Τέλος, γίνεται εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων με τη βοήθεια της πολυκριτιριακής ανάλυσης και της αναλυτικής διαδικασίας ιεράρχησης, με σκοπό την προσομοίωση της υπόγειας ροής και την τρισδιάστατη απεικόνιση αυτής, λαμβάνοντας υπόψη τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιώντας τα πακέτα λογισμικού SWAT και WASY FEFLOW.

Η μελέτη και η προσομοίωση της υπόγειας ροής εφαρμόζεται στη νήσο Νάξο, η οποία αποτελείται κυρίως από σκληρά διερρηγμένα πετρώματα και οι ανάγκες σε νερό εξασφαλίζονται κυρίως από τα περιορισμένα υπόγεια υδατικά αποθέματα, ενώ το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις υπόλοιπες Κυκλάδες, λόγω των παρόμοιων κλιματικών και υδρογεωλογικών συνθηκών, το οποίο πλέον αναφέρεται ως «Κυκλαδικό Υδρογεωλογικό Μοντέλο».

Λέξεις κλειδιά: Νάξος, υδρογεωλογία, τεκτονική, μέσο ασυνεχειών, SWAT, FEFLOW, Κυκλαδικό Υδρογεωλογικό Μοντέλο.

Abstract

Hard rocks are mainly crystalline igneous and metamorphic, but non karstified carbonate rocks, and strongly laminated sedimentary rocks, which occupy a significant part of both global and national surface area. They are often play the role of the principal aquifer in an environment of limited precipitation, strong evaporative conditions and limited island surface. These rocks are involved in the configuration of a specific hydrogeological environment, where the secondary porosity, the anisotropy and the heterogeneity are the main characteristics. Overall, the hydrogeological environment in hard fractured rocks is very complex, as many different hydrogeological conditions are observed, which are dependent by the characteristics of the fracture pattern.

The objective of this research is to design an integrated model to simulate the groundwater flow in heterogeneous fractured media, in order to study the hydraulic conditions and the aquifers that are developed in hard fractured rocks. Specifically, all the factors affecting the groundwater flow in hard fractured rocks are studied, such as the geology, the geomorphology, the characteristics of the fracture pattern, etc. (internal factors), simultaneously with the study of the climatic factors and the landuses (external factors). Also, a prediction of the changes in the groundwater systems by the year 2100 has been made, by studying the future climatic conditions due to the climate change in Greece. Finally, an estimation of the hydraulic parameters by using a multi-criteria analysis and the analytic hierarchy process to simulate the groundwater flow has been made. As a result, a three-dimensional representation has been created, by using the finite element method and the software packages SWAT and WASY FEFLOW.

The design of the model and the simulation of the groundwater flow is applied in the island of Naxos, which is consisted mainly by hard rocks and the water needs are addressed mainly by the limited underground water resources. While the designed model can be used in the rest of the Cyclades Islands, due to the similar climatic and hydrogeological conditions, the model is referred from now on as the "Cycladic Hydrogeological Model".

Keywords: Naxos Island, hydrogeology, tectonics, fractured media, SWAT, FEFLOW, Cycladic Hydrogeological Model.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1ο - Εισαγωγή 1

1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΔΙΕΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ 2

1.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΔΙΕΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ 4

1.3 ΤΟ ΜΕΣΟ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ: ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ 12

1.4 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 21

Κεφάλαιο 2ο - Νάξος: Η Περιοχή Μελέτης 23

2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ 24

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 26

2.3 ΧΛΩΡΙΔΑ - ΠΑΝΙΔΑ 27

2.4 ΔΗΜΟΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 30

2.5 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ 32

2.6 ΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ 35

Κεφάλαιο 3ο - Κλίμα 38

3.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ 39

3.2 ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ 41

3.3 ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ 43

3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ - ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ 50

3.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ 54

3.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ 58

3.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ 65

Κεφάλαιο 4ο - Γεωλογία 69

4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 70

4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ 79

4.2.1 Γενικά 79

4.2.2 Λιθοστρωματογραφία 81

4.2.2.1 Μεταλπικοί σχηματισμοί 83

4.2.2.1.1 Τεταρτογενείς αποθέσεις 83

4.2.2.1.3 Πλειοκαινικά ιζήματα 84

4.2.2.2 Μόλασσα 85
4.2.2.3 Κυκλαδική ενότητα 88
4.2.2.3.1 Μη μεταμορφωμένα κρυσταλλικά πετρώματα 88
4.2.2.4 Γρανοδιοριτική διείσδυση 89
4.2.2.5 Μεταμορφωμένα πετρώματα 90
4.2.3 Μεταμόρφωση 94
4.2.4 Τεκτονική 96
4.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ 101

Κεφάλαιο 5ο - Το Μέσο Ασυνεχειών της Νήσου Νάξου 104
5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΩΣΕΩΝ - ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ 105
5.1.1 Γενικά 105
5.1.2 Περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των δεδομένων 105
5.1.3 Επεξεργασία δεδομένων 107
5.1.3.1 Βασική επεξεργασία 107
5.1.3.1.1 Ατμοσφαιρική διόρθωση 108
5.1.3.1.2 Γεωμετρική διόρθωση 108
5.1.3.2 Ειδική επεξεργασία 110
5.1.4 Κατασκευή χάρτη φωτογραμμώσεων - διαρρήξεων 116
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ 118
5.2.1 Γενικά 118
5.2.2 Γεωγραφική κατανομή των ασυνεχειών 120
5.2.3 Προσανατολισμός των ασυνεχειών 120
5.2.4 Διαστάσεις των ασυνεχειών 123
5.2.5 Χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών 125
5.2.6 Βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών 125

Κεφάλαιο 6ο - Γεωμορφολογία 129
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ 130
6.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ 137
6.3 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΝΑΞΟΥ 141
6.3.1 Γενικά 141
6.3.2 Ανάλυση του Υδρογραφικού Δικτύου της Νήσου Νάξου 141

6.3.2.1 Μελέτη της Υδρογραφικής Υφής 141

6.3.2.2 Συσχέτιση του Υδρογραφικού Δικτύου με τους Λιθολογικούς Σχηματισμούς 146

6.3.2.3 Συσχέτιση του Υδρογραφικού Δικτύου με το Μέσο Ασυνεχειών 148

6.4 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΟ ΚΥΚΛΑΔΙΚΟ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 153

Κεφάλαιο 7ο - Υδρολογία 155

7.1 ΓΕΝΙΚΑ 156

7.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ 157

7.2.1 Γενικά 157

7.2.2 Στάδια εκτέλεσης του υδρολογικού μοντέλου 158

7.2.2.1 Υδρολογική Ανάλυση 161

7.2.2.2 Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης (Μ.Υ.Α.) 163

7.2.2.3 Εισαγωγή μετεωρολογικών παραμέτρων 165

7.2.2.4 Εκτέλεση του μοντέλου 166

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ 167

7.3.1 Γενικά 167

7.3.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα 169

7.3.3 Εξατμισιδιαπνοή 171

7.3.4 Επιφανειακή απορροή 171

7.3.5 Κατείσδυση 175

7.3.6 Υδρολογικό ισοζύγιο 176

Κεφάλαιο 8ο - Υδρογεωλογία 183

8.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΕΣΟ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ 184

8.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 185

8.2.1 Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών της Νάξου 185

8.2.1.1 Αλλουβιακές - Πλειστοκαινικές αποθέσεις 185

8.2.1.2 Νεογενείς αποθέσεις 185

8.2.1.3 Διαβάσες, πυροκλαστικά, υπερβασικά και γαββροειδή πετρώματα 186

8.2.1.4 Γρανοδιορίτες 186

8.2.1.5 Μάρμαρα και μετακροκαλοπαγή 186

8.2.1.6 Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι 188

8.2.1.7 Μιγματίτης 189

8.2.2 Υδρολιθολογική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών της νήσου Νάξου 189

8.2.3 Κύρια υδροφόρα συστήματα της νήσου Νάξου 192

8.2.3.1 Ανθρακικό σύστημα Γαλανάδου - Βίβλου (Ντουμπακάδες) 193

8.2.3.2 Ανθρακικό σύστημα Μελάνων 193

8.2.3.3 Ανθρακικό σύστημα Άη-Λιά 193

8.2.3.4 Ανθρακικός υδροφορέας ασυνεχειών Φιλωτίου 194

8.2.3.5 Προσχωματικός υδροφόρος Λιβαδίου 194

8.2.3.6 Προσχωματικός υδροφόρος Γαλήνης - Εγγαρών 194

8.2.3.7 Άλλοι ανθρακικοί υδροφορείς ασυνεχειών 195

8.2.4 Υπόγεια υδατικά συστήματα 195

8.2.5 Πηγές της περιοχής μελέτης 198

8.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΖΩΝΩΝ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ ΥΔΑΤΩΝ 214

8.3.1 Εισαγωγή 214

8.3.2 Μεθοδολογία 215

8.3.3 Γεωμορφολογία – Τοπογραφική Κλίση (S) 220

8.3.4 Χωρική Πυκνότητα Ασυνεχειών (LD) 221

8.3.5 Υδρολιθολογία (HL) 223

8.3.6 Υδρογραφική Πυκνότητα (DD) 224

8.3.7 Χρήσεις Γης (LU) 225

8.3.8 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα 226

Κεφάλαιο 9^{ο} - Υδροχημεία 229

9.1 ΓΕΝΙΚΑ 230

9.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΙΟΝΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ 233

9.2.1 Κατιόντα 233

9.2.1.1 Νάτριο (Na^{+}) 233

9.2.1.2 Κάλιο (K^{+}) 233

9.2.1.3 Ασβέστιο (Ca^{2+}) 233

9.2.1.4 Μαγνήσιο (Mg^{2+}) 234

9.2.2 Ανιόντα 234

9.2.2.1 Χλώριο (Cl^{-}) 234

9.2.2.2 Οξυανθραξικά (HCO_3^-) 234
9.2.2.3 Θειικά (SO_4^{2-}) 235
9.2.2.4 Νιτρικά (NO_3^-) 235
9.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ 235
9.4 ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ 238
9.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ 240
9.6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 243
9.6.1 Τριγραμμικά διαγράμματα Piper 243
9.6.2 Διαγράμματα Schoeller 245
9.7 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ 247

Κεφάλαιο 10ο - Το Κυκλαδικό Υδρογεωλογικό Μοντέλο 250
10.1 ΓΕΝΙΚΑ 251
10.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ FEFLOW 252
10.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 253
10.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 256
10.4.1 Εξίσωση ροής 256
10.4.2 Ταχύτητα Darcy 256
10.4.3 Το υδραυλικό ύψος 257
10.4.4 Η υδραυλική αγωγιμότητα 257
10.4.5 Οι αρχικές συνθήκες (initial conditions) 257
10.4.6 Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) 258
10.4.7 Εξίσωση ροής στις ασυνέχειες (discrete features) 259
10.5 Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FEFLOW 260
10.5.1 Εισαγωγή 260
10.5.2 Οριοθέτηση της περιοχής (Supermesh) 261
10.5.3 Δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh) 262
10.5.4 Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων 264
10.5.5 Εισαγωγή της τοπογραφίας 266
10.5.6 Τάξη του προβλήματος (Problem Class) 267
10.5.7 Δεδομένα ροής (Flow Data) 267
10.5.7.1 Αρχικές συνθήκες (Flow Initials) 267

10.5.7.2 Οριακές συνθήκες (Flow Boundaries) 268

10.5.8 Υδραυλική αγωγιμότητα γεωλογικών σχηματισμών 270

10.5.9 Ασυνέχειες (Discrete Elements) 271

10.5.10 Κατείσδυση ύδατος 271

10.5.11 Πορώδες 272

10.5.12 Χρονικά δεδομένα και δεδομένα ελέγχου (Temporal Properties) 272

Κεφάλαιο 11^{ο} - Αποτελέσματα Προσομοίωσης 273

11.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 2000-2010 274

11.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 2010-2100 276

11.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ 279

Κεφάλαιο 12^{ο} - Συμπεράσματα 283

Βιβλιογραφία 298

Παράρτημα 310

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: *Η παγκόσμια εξάπλωση των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων.*

Εικόνα 1.2: *Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα στην Ελλάδα.*

Εικόνα 1.3: *Σχηματική παράσταση δημιουργίας υδροφόρου ορίζοντα εντός μανδύα αποσάθρωσης, όπου οι δευτερογενείς ασυνέχειες παίζουν καθοριστικό ρόλο.*

Εικόνα 1.4: *Οι τρεις ζώνες του πρότυπου υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων.*

Εικόνα 1.5: *Μεταβολή της υδραυλικής κλίσης σε ορεινές περιοχές.*

Εικόνα 1.6: *Προσέγγιση της αποσαθρωμένης ζώνης των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων.*

Εικόνα 1.7: *Ταξινόμηση των πετρωμάτων με βάση τον τρόπο ροής του νερού μέσα από τη μάζα τους.*

Εικόνα 1.8: *Επίπεδα σχιστότητας σε σχιστόλιθο στην ευρύτερη περιοχή της Μουτσούνας στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 1.9: *Γενετική ταξινόμηση των ρωγμών, τύπου I, II, III και IV.*

Εικόνα 1.10: *Σύστημα διακλάσεων σε μάρμαρα στην ευρύτερη περιοχή της Μουτσούνας στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 1.11: *Γενετική ταξινόμηση κατά* Anderson.

Εικόνα 2.1: *Γεωγραφική τοποθέτηση της νήσου Νάξου στην ευρύτερη περιοχή.*

Εικόνα 2.2: *Το ανάγλυφο της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 2.3: *Φωτογραφίες από τα σημαντικότερα μνημεία της Νάξου.*

Εικόνα 2.4: *Οι προστατευόμενες περιοχές της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 2.5: *Μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά φυτά της Νάξου.*

Εικόνα 2.6: *Μερικοί αντιπρόσωποι της ναξιακής πανίδας.*

Εικόνα 2.7: *Η Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου.*

Εικόνα 2.8: *Χάρτης χρήσεων γης της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 2.9: *Φωτογραφίες από (α) τη λιμνοδεξαμενή των Εγγαρών και (β) το φράγμα της Φανερωμένης.*

Εικόνα 3.1: *Χάρτης κλιματικών περιοχών της Ελλάδας.*

Εικόνα 3.2: *Χάρτης κλιματικής ταξινόμησης της Ελλάδος κατά* Thornwaite.

Εικόνα 3.3: *Υπόμνημα χάρτη κλιματικής ταξινόμησης της Ελλάδος κατά* Thornwaite.

Εικόνα 3.4: *Ο μετεωρολογικός σταθμός της Νάξου.*

Εικόνα 3.5: *Η μέγιστη (μπλε γραμμή), η μέση (πράσινη γραμμή) και η ελάχιστη (κόκκινη γραμμή) μηνιαία θερμοκρασία της Νάξου για την περίοδο 1958-2010.*

Εικόνα 3.6: *Κατανομή της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης της Νάξου για την περίοδο 1895-2010.*

Εικόνα 3.7: *Η μέση μηνιαία βροχόπτωση της Νάξου για την περίοδο 1958-2010.*

Εικόνα 3.8: *Χάρτης υπερετήσιας βροχόπτωσης ανά υδατικό διαμέρισμα.*

Εικόνα 3.9: *Χάρτης ισότιμων καμπύλων μέσης τιμής ημερών βροχής για την περιοχή των Κυκλάδων για την περίοδο 1950-1975.*

Εικόνα 3.10: *Η μέση μηνιαία υγρασία της Νάξου για την περίοδο 1958-2010.*

Εικόνα 3.11: *Η μέση μηνιαία ένταση των ανέμων σε* kt (knots) *στη Νάξο για την περίοδο 1958-2010.*

Εικόνα 3.12: *Διάγραμμα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης περιόδου 1971-2000, σε σχέση με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών.*

Εικόνα 3.13: *Εκτίμηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για τη νήσο Νάξο, λαμβάνοντας υπόψη τη βροχοβαθμίδα.*

Εικόνα 3.14: *Η θέση των μετεωρολογικών σταθμών, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της θερμοβαθμίδας.*

Εικόνα 3.15: *Διάγραμμα μέσης ετήσιας θερμοκρασίας περιόδου 2010-2014 σε σχέση με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών.*

Εικόνα 3.16: *Εκτίμηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας για τη νήσο Νάξο, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοβαθμίδα.*

Εικόνα 3.17: *Διαγραμματική απεικόνιση των κλιματικών παραμέτρων της νήσου Νάξου για τα έτη 2015, 2080, 2090 και 2100.*

Εικόνα 4.1: *Οι τρεις τεκτονομεταμορφικές ζώνες (εξωτερική, ενδιάμεση και εσωτερική) του Ελληνικού τόξου.*

Εικόνα 4.2: *Σχηματική τομή κατά μήκος της ενδιάμεσης τεκτονομεταμορφικής ζώνης.*

Εικόνα 4.3: *Σχηματικό στερεογραφικό διάγραμμα της ενδιάμεσης τεκτονομεταμορφικής ζώνης.*

Εικόνα 4.4: *Οι τρεις τεκτονομεταμορφικές ζώνες όπου, σε αντίθεση με την εικόνα 4.1, απεικονίζεται η Αττικοκυκλαδική Ζώνη, οι πρώην μάζες της Δυτικής Μακεδονίας, της Θεσσαλίας και της πρώην Λυδοκαρικής μάζας.*

Εικόνα 4.5: *Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων Ζωνών.*

Εικόνα 4.6: *Ταξινόμηση κατά* Okrush & Broker, *1990.*

Εικόνα 4.7: *Ταξινόμηση κατά Παπανικολάου. 1:πλειο-τεταρτογενή ηφαιστειακά, 2: μη μεταμορφωμένες Ελληνίδες, 3: χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης ενότητες, 4: Αλλόχθονο της Αττικής, 5: Αυτόχθονο της Αττικής, 6: Αλμυροπόταμος και Κερκετέα, 7: Βόρειες Κυκλάδες, 8:Μακροτάνταλο-Όχη και Φούρνοι, 9: σχιστώδεις γρανίτες, 10: Νότιες Κυκλάδες, 11: προαλπικά Νότιων Κυκλάδων.*

Εικόνα 4.8: *Χάρτης του χώρου της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης, στον οποίο απεικονίζονται οι περιοχές εξάπλωσης των τριών τύπων μεταμόρφωσης.*

Εικόνα 4.9: *Ροδοδιάγραμμα των τεκτονικών στοιχείων της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης, το οποίο προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα 4.1.*

Εικόνα 4.10: *Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της νήσου Νάξου, όπου είναι εμφανείς οι τρεις κύριες ενότητες, η ανώτερη μη μεταμορφωμένη ενότητα, η ενότητα των κυκλαδικών κυανοσχιστολίθων και ο όγκος του γρανοδιορίτη.*

Εικόνα 4.11: *Γεωλογικός χάρτης της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 4.12: *Οι κυριότερες μολασσικές λεκάνες του Ελληνικού Τόξου.*

Εικόνα 4.13: *Οι κυριότερες εμφανίσεις του μη μεταμορφωμένου Κυκλαδικού τεκτονικού καλύμματος στο Αιγαίο.*

Εικόνα 4.14: *Πετρολογικός χάρτης της νήσου Νάξου, ο οποίος εμφανίζει την κατανομή των αργιλικών ορυκτών και τις διάφορες μεταμορφικές ζώνες.*

Εικόνα 4.15: *Σχηματικό στερεοδιάγραμμα της τεκτονικής των κυανοσχιστολιθών των Κυκλάδων, με απεικόνιση των μεγαπτυχών στα επιμέρους νησιά, που αποτελούν α-δομές βάθους εγκάρσια προς το τόξο, μέσα στη μεγαδιατμητική ζώνη του Ολιγόκαινου.*

Εικόνα 4.16: Structural map *κεντρικής και ανατολικής περιοχής της νήσου Νάξου, κλίμακας 1:50.000, όπου φαίνεται η πολύπλοκη τεκτονική δομή της.*

Εικόνα 4.17: *Βορειοανατολική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.*

Εικόνα 4.18: *Βορειοδυτική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.*

Εικόνα 4.19: *Νοτιοανατολική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.*

Εικόνα 4.20: *Νοτιοδυτική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.*

Εικόνα 5.1: *Ορθοανηγμένη δορυφορική εικόνα* Landsat 7 ETM$^+$ *της νήσου Νάξου, σε φυσικό χρώμα (συνδυασμός καναλιών: R=3, G=2, B=1).*

Εικόνα 5.2: *Ορθοανηγμένο μωσαϊκό αεροφωτογραφιών της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 5.3: *Το τελικό προϊόν συγχώνευσης της δορυφορικής εικόνας* Landsat 7 ETM$^+$ *με το ορθοφωτομωσαϊκό των αεροφωτογραφιών της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 5.4: *Τελικός χάρτης φωτογραμμώσεων της νήσου Νάξου, οι οποίες αντιστοιχούν σε πραγματικές ή δυνητικώς πραγματικές ρωγμές και διαρρήξεις.*

Εικόνα 5.5: *Καθορισμός των έξι υποπεριοχών στη νήσο Νάξο, σύμφωνα με τις κύριες λιθολογίες που παρατηρούνται στο νησί.*

Εικόνα 5.6: *Ροδοδιαγράμματα διευθύνσεων των ασυνεχειών.*

Εικόνα 5.7: *Κατανομή των τάξεων του μήκους των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.*

Εικόνα 5.8: *Χάρτης χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 5.9: *Χάρτης βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 6.1: *Το ανάγλυφο της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.2: *Μορφή κυψελοειδούς αποσάθρωσης (tafoni) σε γρανοδιοριτικό πέτρωμα στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 6.3: *Hogback στο κεντρικό τμήμα της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.4: *Χάρτης κατανομής των μορφολογικών κλίσεων (σε μοίρες) της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.5: *Χάρτης κατανομής των επί τοις εκατό μορφολογικών κλίσεων της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.6: *Χάρτης του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου κατά τάξη, σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Strahler.*

Εικόνα 6.7: *Χάρτης των υδρολογικών λεκανών της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.8: *Χάρτης κατανομής της υδρογραφικής πυκνότητας στις υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.9: *Χάρτης κατανομής της υδρογραφικής συχνότητας στις υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 6.10: *Χάρτης του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου, σε σχέση με την κύρια λιθολογία.*

Εικόνα 6.11: *Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των ασυνεχειών στο γρανοδιορίτη και τις μεταλπικές αποθέσεις.*

Εικόνα 6.12: *Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των ασυνεχειών στο γρανίτη.*

Εικόνα 6.13: *Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των ασυνεχειών στα μάρμαρα.*

Εικόνα 6.14: *Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των ασυνεχειών στα μετακροκαλοπαγή.*

Εικόνα 6.15: *Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των ασυνεχειών στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.*

Εικόνα 6.16: *Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των ασυνεχειών στο μιγματίτη.*

Εικόνα 6.17: *Συσχέτιση του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου με το μέσο ασυνεχειών. Στο συγκεκριμένο χάρτη απεικονίζεται η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών.*

Εικόνα 6.18: *Μηχανική και υδραυλική ανισοτροπία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση.*

Εικόνα 7.1: *Διάγραμμα ροής της εκτέλεσης των εργασιών του υδρολογικού μοντέλου.*

Εικόνα 7.2: *Οι κύριες υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 7.3: *Πλήρωση του DEM με το εργαλείο Spatial Analyst.*

Εικόνα 7.4: *Το σύνολο των υδρογραφικών λεκανών της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 7.5: *Χάρτης μέσης κατείσδυσης νερού ανά κύρια υδρολογική λεκάνη στη νήσο Νάξο για την περίοδο 1958-2010.*

Εικόνα 7.6: *Χάρτης μέσης κατείσδυσης νερού ανά κύρια υδρολογική λεκάνη στη νήσο Νάξο για την περίοδο 2010-2100.*

Εικόνα 7.7: *Χάρτης συσχέτισης της μέσης κατείσδυσης (1958-2010) με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών ανά κύρια υδρολογική λεκάνη στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 8.1: *Υδρολιθολογικός χάρτης της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 8.2: *Οι υδρογεωλογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 8.3: *Τα υπόγεια υδατικά συστήματα της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 8.4: *Κατανομή των πηγών της νήσου Νάξου ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.*

Εικόνα 8.5: *Γεωγραφική κατανομή των πηγών της νήσου Νάξου, όπου διακρίνονται πάνω στον τοπογραφικό χάρτη τα κύρια μέτωπα αυτών.*

Εικόνα 8.6: *Διάγραμμα συσχέτισης του μήκους των ασυνεχειών με τη σχετική συχνότητα των πηγών, ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 8.7: *Χάρτης συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με την κύρια λιθολογία της νήσου Νάξου.*

Εικόνα 8.8: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.*

Εικόνα 8.9: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.*

Εικόνα 8.10: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στα μάρμαρα.*

Εικόνα 8.11: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στα μάρμαρα.*

Εικόνα 8.12: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στο μιγματίτη.*

Εικόνα 8.13: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στο μιγματίτη.*

Εικόνα 8.14: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στο γρανοδιορίτη.*

Εικόνα 8.15: *Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στο γρανοδιορίτη.*

Εικόνα 8.16: *Πηγή «Εμπολή» στην περιοχή του Απόλλωνα, όπου το νερό αναβλύζει μέσα από μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και συλλέγεται απευθείας, με σκοπό την εκμετάλλευσή του.*

Εικόνα 8.17: *Πηγή του όρους Ζας, όπου στο σημείο που το νερό αναβλύζει έχει κατασκευαστεί βρύση.*

Εικόνα 8.18: *Πηγή στην περιοχή της Κορωνίδας, όπου το νερό αναβλύζει μέσα από αμφιβολίτες, σε περιοχή όπου η βλάστηση είναι έντονη.*

Εικόνα 8.19: *Πηγή στην περιοχή του Μυρίση, όπου το νερό αναβλύζει μέσα από το μιγματίτη, σε περιοχή όπου παρατηρείται έντονη βλάστηση.*

Εικόνα 8.20: *Χάρτης χωρικής κατανομής των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες στη νήσο Νάξο. Στο συγκεκριμένο χάρτη, η ζώνη επίδρασης έχει οριστεί στα 300 m.*

Εικόνα 8.21: *Ιστόγραμμα κατανομής της σχετικής συχνότητας των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 8.22: *Χάρτης συσχέτισης της χωρικής πυκνότητας των πηγών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στη νήσο Νάξο.*

Εικόνα 8.23: *Διάγραμμα συσχέτισης της παροχής των πηγών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών.*

Εικόνα 8.24: *Διάγραμμα συσχέτισης της παροχής των πηγών σε σχέση με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών.*

Εικόνα 8.25: *Διάγραμμα συσχέτισης της παροχής των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες.*

Εικόνα 8.26: *Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση τις τοπογραφικές κλίσεις, που αποτελούν τον παράγοντα S.*

Εικόνα 8.27: *Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, που αποτελεί τον παράγοντα LD.*

Εικόνα 8.28: *Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση την υδρολιθολογία (HL).*

Εικόνα 8.29: *Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση την υδρογραφική πυκνότητα, η οποία αποτελεί τον παράγοντα DD.*

Εικόνα 8.30: *Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση τις χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης, οι οποίες αποτελούν τον παράγοντα LU.*

Εικόνα 8.31: *Χάρτης ικανότητας κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων, σύμφωνα με τον υπολογιζόμενο δείκτη GPI (Groundwater Potential Index).*

Εικόνα 9.1: *Διάγραμμα ταξινόμησης νερών σύμφωνα με βάση τα επικρατούντα ιόντα.*

Εικόνα 9.2: *Χωρική κατανομή των υδροσημείων (πηγές, γεωτρήσεις και πηγάδια), από τα οποία έγιναν επιτόπιες μετρήσεις τον Αύγουστο του 2013 και πάρθηκαν δείγματα για χημική ανάλυση την ίδια περίοδο.*

Εικόνα 9.3: *Διάγραμμα Piper των δειγμάτων νερού που αναλύθηκαν.*

Εικόνα 9.4: *Μέσες τιμές συγκέντρωσης ιόντων (mg/lt) για κάθε λιθολογική φάση.*

Εικόνα 9.5: *Διάγραμμα Schoeller των δειγμάτων νερού που αναλύθηκαν.*

Εικόνα 9.6: *Διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με το υψόμετρο των υδροσημείων δειγματοληψίας.*

Εικόνα 9.7: *Διάγραμμα συγκέντρωσης νιτρικών των δειγμάτων νερού.*

Εικόνα 10.1: *Πρωτόκολλο μοντελοποίησης υπόγειας ροής.*

Εικόνα 10.2: *Δισδιάστατα στοιχεία του μοντέλου.*

Εικόνα 10.3: *Τρισδιάστατα στοιχεία του μοντέλου.*

Εικόνα 10.4: *Καθορισμός των εξωτερικών ορίων της περιοχής προσομοίωσης, του υδρογραφικού δικτύου, των ασυνεχειών, καθώς και της θέσης των πηγών, των πηγαδιών και των γεωτρήσεων.*

Εικόνα 10.5: *Δίκτυο οριζόντιας διακριτοποίησης της περιοχής μελέτης.*

Εικόνα 10.6: *Δίκτυο οριζόντιας διακριτοποίησης της περιοχής μελέτης, με πύκνωση στις θέσεις των υδροσημείων (πηγές, πηγάδια και γεωτρήσεις) και περιμετρικά του υδρογραφικού δικτύου.*

Εικόνα 10.7: *Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή των κομβικών επιπέδων (slices).*

Εικόνα 10.8: *Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή της τοπογραφίας.*

Εικόνα 10.9: *Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή των τιμών του υδραυλικού φορτίου.*

Εικόνα 10.10: *Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας.*

Εικόνα 11.1: *Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=0 μέρες (Μάιος, 2000).*

Εικόνα 11.2: *Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=3650 μέρες (Μάιος, 2010).*

Εικόνα 11.3: *Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=3651 μέρες (Ιούνιος, 2010).*

Εικόνα 11.4: *Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=36500 μέρες (Μάιος, 2100).*

Εικόνα 11.5: *Οι μέσες ετήσιες τιμές του υδραυλικού φορτίου για τα 100 χρόνια προσομοίωσης.*

Εικόνα 11.6: *Οι μέσες τιμές ταχύτητας κατείσδυσης ανά ημέρα για τα 100 χρόνια προσομοίωσης.*

Εικόνα 11.7: *Οι γραμμές ροής του υπόγειου νερού που προέκυψαν από την προσομοίωση.*

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: *Σύγκριση υδροφόρων στο πορώδες μέσο και στο μέσο ασυνεχειών.*

Πίνακας 1.2: *Μέθοδοι έρευνας του μέσου ασυνεχειών.*

Πίνακας 2.1: *Οι σημαντικές χρονολογίες στην ιστορία της Νάξου.*

Πίνακας 2.2: *Δημογραφικά στοιχεία της νήσου Νάξου.*

Πίνακας 2.3: *Κατανομή χρήσεων γης στη νήσο Νάξο.*

Πίνακας 3.1: *Οι μετεωρολογικοί σταθμοί της νήσου Νάξου, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βροχοβαθμίδας.*

Πίνακας 3.2: *Οι μετεωρολογικοί σταθμοί της νήσου Νάξου, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της θερμοβαθμίδας.*

Πίνακας 3.3: *Σενάρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών.*

Πίνακας 3.4: *Αποτελέσματα προσομοίωσης 6 κλιματικών παραμέτρων για τις Κυκλάδες, σύμφωνα με το Σενάριο Α2.*

Πίνακας 3.5: *Εκτίμηση των μελλοντικών μέσων ετήσιων τιμών των κλιματικών παραμέτρων για τη νήσο Νάξο.*

Πίνακας 3.6: *Εκτίμηση της μεταβολής των παραμέτρων V (όγκος βροχής) και I+R (υδατικό δυναμικό) του γενικευμένου υδρολογικού ισοζυγίου ανά κλιματικό σενάριο και ανά περίπτωση, εκφρασμένες %.*

Πίνακας 4.1: *Τεκτονικά στοιχεία της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης.*

Πίνακας 4.2: *Οι θερμοκρασίες των μεταμορφικών ζωνών γύρω από τον μιγματιτικό δόμο της νήσου Νάξου, από την περιφέρεια προς το δόμο.*

Πίνακας 5.1: *Συνολικό μήκος ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.*

Πίνακας 6.1: *Οι τέσσερις κύριες επιφάνειες ισοπέδωσης στις Κυκλάδες.*

Πίνακας 6.2: *Ταξινόμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler της νήσου Νάξου.*

Πίνακας 6.3: *Μορφομετρικές παράμετροι που μελετήθηκαν και αφορούν το υδρογραφικό δίκτυο και τις λεκάνες απορροής της νήσου Νάξου.*

Πίνακας 6.4: *Χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου σε σχέση με τη λιθολογία της νήσου Νάξου.*

Πίνακας 6.5: *Μήκος κλάδων ανά τάξη και ανά λιθολογικό σχηματισμό.*

Πίνακας 7.1: *Αντιστοιχία κατηγοριών ILOT χρήσεων γης και ArcSWAT.*

Πίνακας 7.2: *Αντιστοίχιση υδρολιθολογίας με το ArcSWAT.*

Πίνακας 7.3: *Οι τρεις κλάσεις κλίσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.*

Πίνακας 7.4: *Αποτελέσματα προσομοίωσης των 6 κλιματικών παραμέτρων για τις Κυκλάδες, σύμφωνα με το Κλιματικό Σενάριο Α2.*

Πίνακας 7.5: *Βροχομετρικά στοιχεία της περιοχής μελέτης.*

Πίνακας 7.6: *Μέσος ετήσιος όγκος νερού που δέχεται κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.*

Πίνακας 7.7: *Τιμές μέσης ετήσιας εξατμισιδιαπνοής για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.*

Πίνακας 7.8: *Τιμές μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής και του συντελεστή απορροής (C) για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.*

Πίνακας 7.9: *Τιμές μέσης ετήσιας κατείσδυσης για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.*

Πίνακας 7.10: *Συνολικές τιμές μέσου ετήσιου όγκου νερού για κάθε παράμετρο του υδρολογικού ισοζυγίου για τη νήσο Νάξο, αλλά και για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη ξεχωριστά, για την περίοδο 1958-2010.*

Πίνακας 7.11: *Υδρολογικό ισοζύγιο της νήσου Νάξου σε ετήσια βάση, για την περίοδο 1958-2010.*

Πίνακας 7.12: *Συνολικές τιμές μέσου ετήσιου όγκου νερού για κάθε παράμετρο του υδρολογικού ισοζυγίου για τη νήσο Νάξο, αλλά και για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη ξεχωριστά, για την περίοδο 2010-2100.*

Πίνακας 7.13: *Υδρολογικό ισοζύγιο της νήσου Νάξου σε ετήσια βάση για την περίοδο 2010-2100.*

Πίνακας 8.1: *Τα υπόγεια υδατικά συστήματα της νήσου Νάξου.*

Πίνακας 8.2: *Κατανομή και σχετική συχνότητα εμφάνισης των πηγών της νήσου Νάξου, ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.*

Πίνακας 8.3: *Μήκος των ασυνεχειών και σχετική συχνότητα των πηγών της νήσου Νάξου, ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.*

Πίνακας 8.4: *Πίνακας σύγκρισης των κριτηρίων κατά ζεύγη μέσω της AHP.*

Πίνακας 8.5: *Κλίμακα αριθμητικών τιμών βαρύτητας κριτηρίων.*

Πίνακας 8.6: *Η βαθμονόμηση των πέντε κριτηρίων που επιλέχθηκαν για τη μελέτη της ικανότητας κατείσδυσης και η εύρεση των συντελεστών βαρύτητας.*

Πίνακας 8.7: *Παράγοντες, δείκτες και συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν στην εύρεση των ζωνών αυξημένης ικανότητας κατείσδυσης.*

Πίνακας 8.8: *Ζώνες χαμηλής, μέσης και υψηλής ικανότητας κατείσδυσης, σύμφωνα με τον υπολογισμό του δείκτη GPI (Groundwater Potential Index).*

Πίνακας 9.1: *Ταξινόμηση υδροχημικών φάσεων.*

Πίνακας 9.2: *Στοιχεία σημείων δειγματοληψίας περιοχής έρευνας.*

Πίνακας 9.3: *Αποτελέσματα επιτόπιων μετρήσεων δειγμάτων νερού.*

Πίνακας 9.4: *Ταξινομήσεις σύμφωνα με την ολική σκληρότητα του νερού.*

Πίνακας 9.5: *Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων για τη σκληρότητα (ολική, ανθρακική και μόνιμη) και το διοξείδιο του πυριτίου.*

Πίνακας 9.6: *Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων για τα κατιόντα.*

Πίνακας 9.7: *Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων για τα ανιόντα.*

Πίνακας 10.1: *Τα υψόμετρα που αντιστοιχούν σε κάθε κομβικό επίπεδο του τρισδιάστατου μοντέλου.*

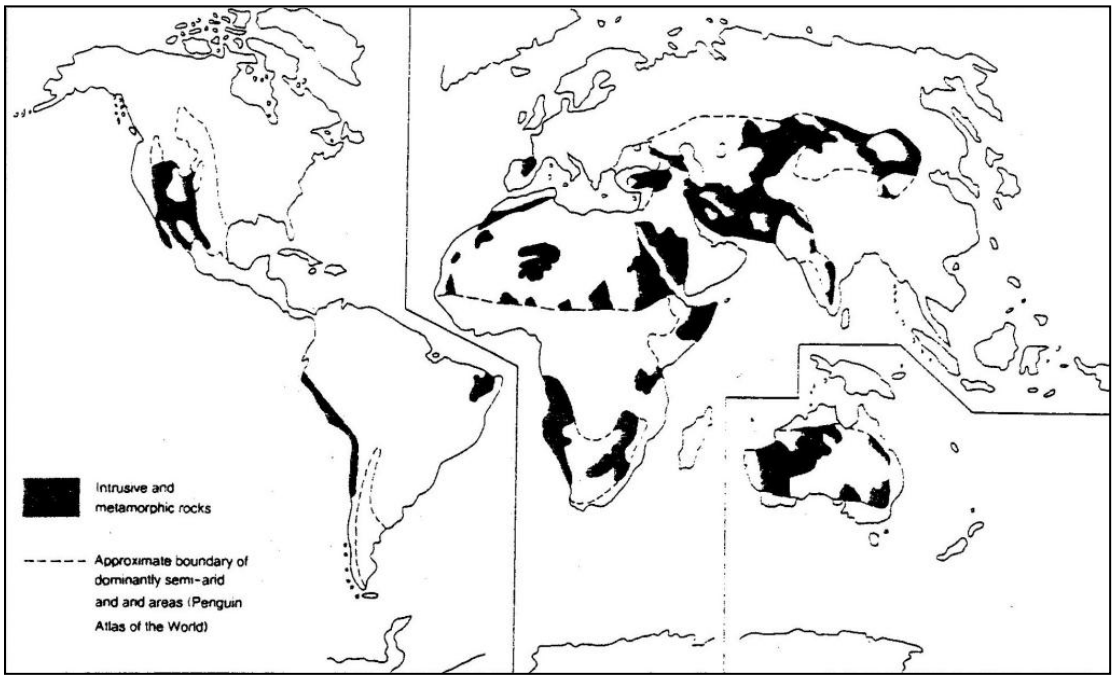
Πίνακας 10.2: *Τα ισοδύναμα υδραυλικά ύψη που αντιστοιχούν στις οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους.*

Κεφάλαιο 1^{ο} - Εισαγωγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΔΙΕΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μέρος της επιφανειακής έκτασης, τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε εθνικό επίπεδο. Η παγκόσμια εξάπλωσή τους λαμβάνει χώρα κυρίως σε ερημικές και ημιερημικές περιοχές (Εικόνα 1.1.).



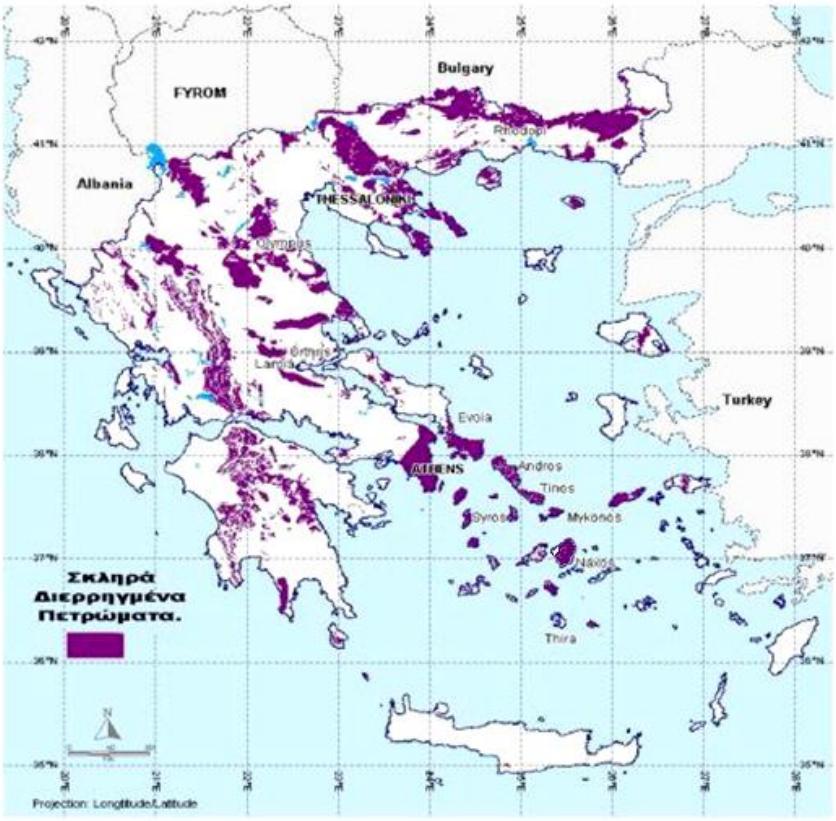
Εικόνα 1.1: Η παγκόσμια εξάπλωση των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων (Lloyd, 1999).

Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα έρχονται σε άμεση σύνδεση με τα κρυσταλλικά πετρώματα (πυριγενή, μεταμορφωμένα και ανθρακικά μη καρστικά) και τα ισχυρώς συγκολλημένα ιζηματογενή πετρώματα, και καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μέρος της επιφανειακής έκτασης, τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε εθνικό επίπεδο (Krasny, 1996, 2002).

Στην Ελλάδα, τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα εμφανίζονται κυρίως στο γεωτεκτονικό χώρο των Εσωτερικών Ελληνίδων, όπου σχετίζονται κυρίως με τα μεταμορφωμένα πετρώματα και τους οφιόλιθους. Όμως, καθώς στα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα έχουν συμπεριληφθεί και τα ισχυρώς συγκολλημένα και πολυπτυχωμένα ιζηματογενή πετρώματα, στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 1.2), έχουν συμπεριληφθεί και λιθολογικές ενότητες, οι οποίες αντιστοιχούν σε γεωτεκτονικές ενότητες των Εξωτερικών Ελληνίδων (Stournaras et al., 2003, Μποτσιαλάς, 2007).

Μαζί με τους υπόλοιπους λιθολογικούς τύπους του γεωλογικού περιβάλλοντος, παίζουν σημαντικό ρόλο, άμεσα και έμμεσα, στην οικονομική ανάπτυξη των χωρών, και κατά συνέπεια, έχουν σημαντική κοινωνική επίδραση, καθώς σχετίζονται με τον ορυκτό πλούτο, παράγουν εξαιρετικά δομικά και άλλα υλικά και τα παραγόμενα εδάφη κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αποσαθρώσεως, είναι ικανής ποιότητας ώστε να φιλοξενήσουν ιδιαιτέρως παραγωγικές καλλιέργειες (Lloyd, 1999).

Όμως, πέρα από τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις, τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα εμπλέκονται στη διαμόρφωση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, καθώς ανεξαρτήτου λιθολογίας, εμφανίζουν μεγάλο εύρος τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα, σε μικρή κλίμακα, δηλαδή σε επίπεδο βραχομάζας, η επικράτηση του δευτερογενούς πορώδους έναντι του πρωτογενούς και οι χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, τα καθιστούν χαμηλά σε ικανότητα μεταφοράς και αποθήκευσης νερού, σε σχέση με άλλους τύπους πετρωμάτων (π.χ. καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι). Αντίθετα σε μεγάλη κλίμακα, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας εξαρτώνται από το εάν οι ασυνέχειες εμφανίζουν υλικό πλήρωσης ή όχι. Στις περιπτώσεις όπου οι ασυνέχειες δεν εμφανίζουν υλικό πλήρωσης, η περατότητα είναι μεγάλη, ενώ όταν παρατηρούνται πληρωμένες, η περατότητα είναι μικρή.



Εικόνα 1.2: Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα στην Ελλάδα (Stournaras et al., 2003).

Ανεξάρτητα όμως του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, οι ανάγκες για νερό παραμένουν, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι χαμηλή και οι υδατικοί πόροι περιορισμένοι, όπως είναι στα νησιά των Κυκλάδων. Για το λόγο αυτό, η περιγραφή, η μελέτη και η ανάλυση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική και η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στην εκτίμηση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών.

1.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΔΙΕΡΡΗΓΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Με γνώμονα τη στροφή τη επιστημονικής κοινότητας στη μελέτη των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, με κύριο σκοπό τη διερεύνηση της υδροφορίας τους, καθορίστηκαν βασικές αρχές και θεωρήσεις πάνω στις οποίες στηρίχθηκε ο ορισμός του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών.

Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα, με την υδρογεωλογική έννοια του όρου, εννοούνται τα κρυσταλλικά (πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα), καθώς και τα ισχυρώς συγκολημμένα ή/και πτυχωμένα ιζηματογενή πετρώματα. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των πετρωμάτων γενικά εξαρτάται από τη λιθολογία (ανάπτυξη πρωτογενούς πορώδους, ύπαρξη υδατοδιαλυτών συστατικών, κ.τ.λ.) και την τεκτονική τους κατάσταση (ποσοστό διακλάσεων, ρήγματα, κ.τ.λ.), ενώ το νερό επιδρά στο μέσο με μια δευτερογενή διαδικασία διάλυσης υλικού και διεύρυνσης των διακλάσεων, συμβάλλοντας με τη σειρά του στη διαμόρφωση ευνοϊκών συνθηκών για τη ροή του.

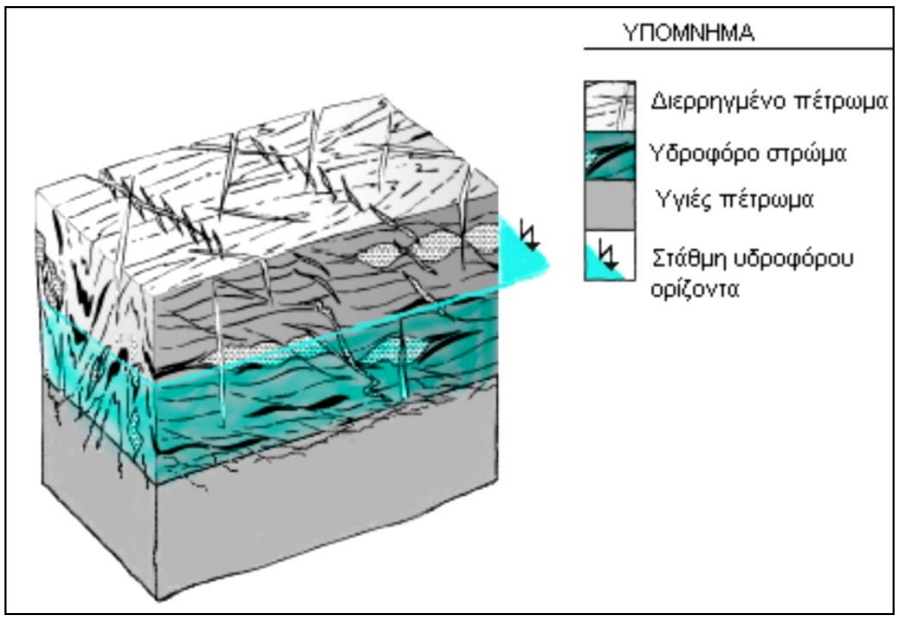
Όμως, το υδρογεωλογικό περιβάλλον των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται με τη γεωλογία, την υδρολιθολογία, το είδος και το βαθμό τεκτονισμού, τη γεωμορφολογία και την ανθρώπινη δραστηριότητα. Τις περισσότερες φορές οι παράγοντες αυτοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και ασφαλή συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο μέσα από τη σύνθετη ανάλυση όσο το δυνατόν περισσότερων από αυτών. Επίσης επισημαίνεται ότι το υδρογεωλογικό περιβάλλον είναι ανεξάρτητο της λιθολογίας, καθώς οι δευτερογενείς ασυνέχειες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση υδροφοριών τοπικής έκτασης και μικρού βάθους (Εικόνα 1.3), ενώ η υδραυλική κλίση άλλες φορές βρίσκεται σε γενική συμφωνία με την τοπογραφική κλίση, και άλλες όχι (Krasny, 1996, Μποτσιαλάς, 2007).

Η εξαίρεση της λιθολογίας ως κύριου παράγοντα που διαμορφώνει την υπόγεια ροή, δίνει τη δυνατότητα του ορισμού ενός πρότυπου υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, με σκοπό την κατανόηση των υδρογεωλογικών διαδικασιών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές περιοχές. Ο ορισμός του πρότυπου υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων περιλαμβάνει τρεις κατακόρυφες ζώνες (Εικόνα 1.4), την ανώτερη ή αποσαθρωμένη ζώνη, την ενδιάμεση ή διερρηγμένη ζώνη και την κατώτερη ή συμπαγή ζώνη, όπου κάθε μία από αυτές χαρακτηρίζεται από διακριτές υδρογεωλογικές συνθήκες (Krasny, 1996, 2002).

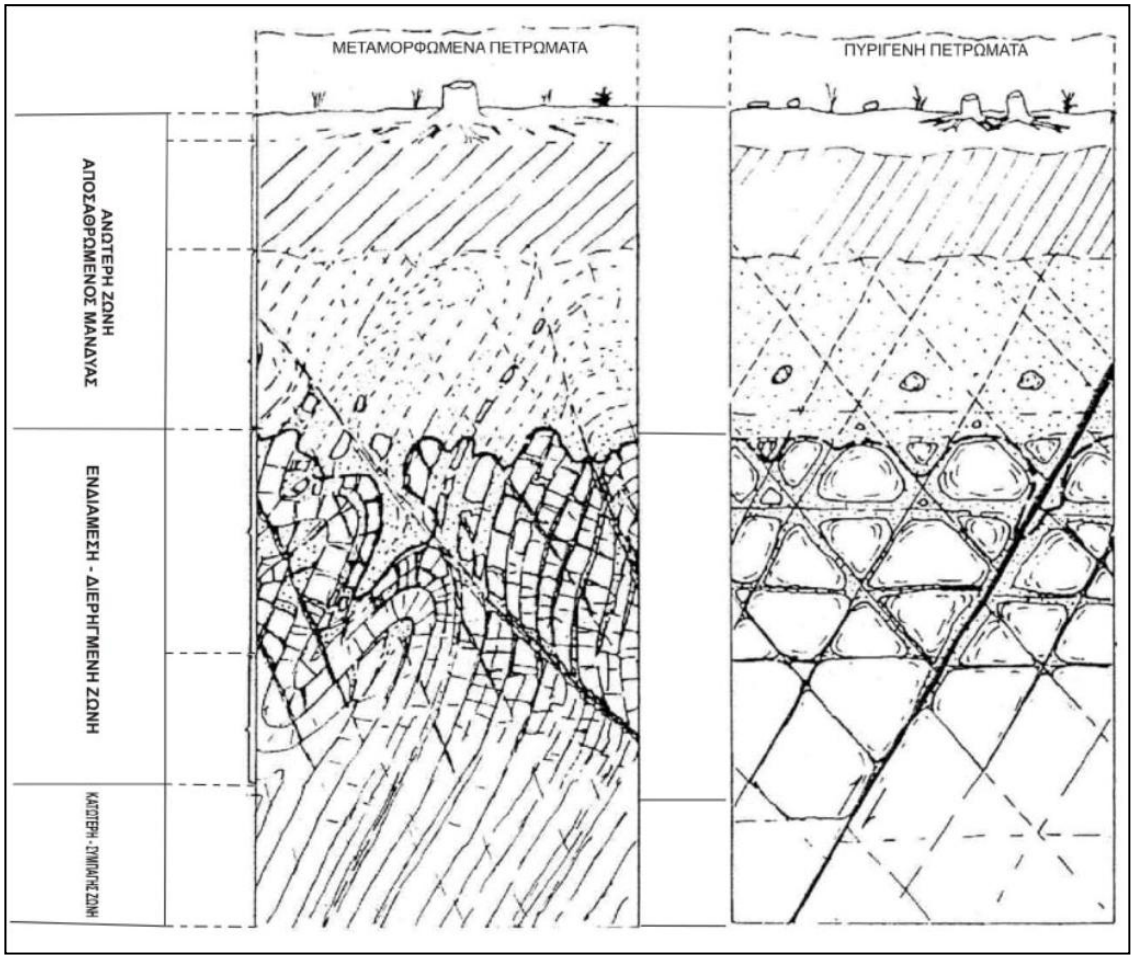
Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι το συνολικό υδρογεωλογικό περιβάλλον των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, καθώς σε κάθε ζώνη επικρατούν διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες, με κύριο όμως χαρακτηριστικό την επικράτηση του δευτερογενούς πορώδους.

Όμως, παρά τις διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες σε κάθε ζώνη, οι υδροφόροι ορίζοντες που αναπτύσσονται σε σκληρά διερρηγμένα πετρώματα, εμφανίζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία τους διαφοροποιούν από αυτούς που αναπτύσσονται στο πορώδες μέσο (Πίνακας 1.1). Πιο συγκεκριμένα, κύρια χαρακτηριστικά των υδροφόρων αυτών είναι η εμφάνιση κυρίως δευτερογενούς πορώδους, η ανισοτροπία και η ανομοιογένεια. Η ροή είναι τυρβώδης και ταχεία, η οποία δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με εφαρμογή του νόμου Darcy. Επίσης όσον αφορά τον εμπλουτισμό, είναι διάσπαρτος, αλλά μπορούν να προσδιοριστούν χωρικά περιοχές, όπου ο εμπλουτισμός είναι μεγαλύτερος, ενώ η διακύμανση του υδραυλικού φορτίου και της ποιότητας των υπόγειων νερών χαρακτηρίζεται ως ελάχιστη και μέση αντίστοιχα.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, όσον αφορά την επίδραση των ρωγμών και των ρηγμάτων στην υπόγεια ροή, σε ορεινές περιοχές, με μεγάλη μεταβολή της τοπογραφικής κλίσης, με μικρό πάχος αποσαθρωμένου μανδύα και έντονο βαθμό διάρρηξης, εμφανίζουν υψηλή κατείσδυση στα υψηλότερα υψόμετρα, παρόλο που η υδαταγωγιμότητα των πετρωμάτων αυτών είναι χαμηλή. Η έντονα διερρηγμένη ζώνη και η υψηλή υδραυλική κλίση έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταφορά προς τα κατάντη μεγάλων ποσοτήτων νερού (Εικόνα 1.5) και με τη μείωση του υψομέτρου, μειώνεται αντίστοιχα η υδραυλική κλίση (Krasny, 1996).



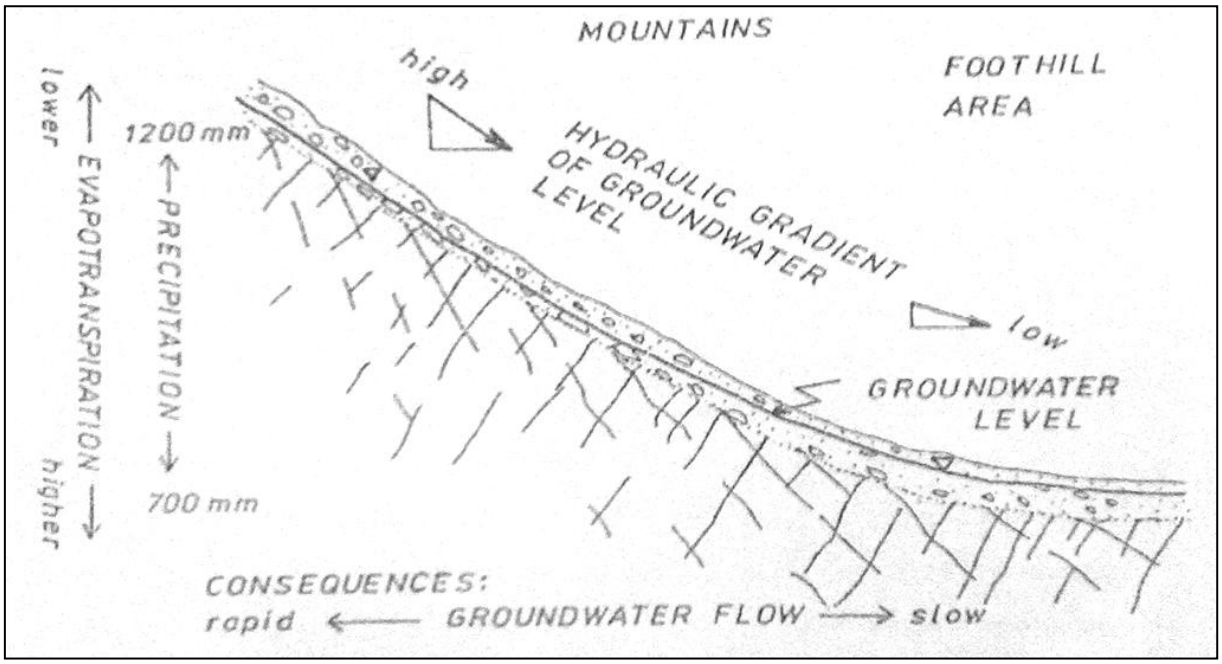
Εικόνα 1.3: Σχηματική παράσταση δημιουργίας υδροφόρου ορίζοντα εντός μανδύα αποσάθρωσης, όπου οι δευτερογενείς ασυνέχειες παίζουν καθοριστικό ρόλο (τροποποιημένη εικόνα από Famin et al., 2000).



Εικόνα 1.4: Οι τρεις ζώνες του πρότυπου υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων (Deere & Patton, 1971).

Πίνακας 1.1: Σύγκριση υδροφόρων στο πορώδες μέσο και στο μέσο ασυνεχειών (Singhal, 2008, Anderson & Woessner, 2002).

Χαρακτηριστικά Υδροφόρου Ορίζοντα	**Τύπος Υδροφόρου Ορίζοντα**	
	Πορώδες Μέσο	***Μέσο Ασυνεχειών***
Ενεργό πορώδες	Κυρίως πρωτογενές	Κυρίως δευτερογενές (ρωγμές, διακλάσεις, κ.τ.λ.)
Ισοτροπία	Κυρίως ισότροπο	Κυρίως ανισότροπο
Ομοιογένεια	Περισσότερο ομοιογενές	Λιγότερο ομοιογενές
Ροή	Στρωτή ροή	Ταχεία και τυρβώδης ροή
Πρόβλεψη ροής	Εφαρμογή του νόμου Darcy είναι δυνατή	Δεν είναι δυνατή η εφαρμογή του νόμου Darcy. Η εφαρμογή του κυβικού νόμου είναι δυνατή, όπου ισχύει ότι η ροή είναι ανάλογη του κύβου του ανοίγματος των ασυνεχειών.
Εμπλουτισμός	Διάσπαρτος	Κυρίως διάσπαρτος, αλλά με εμφάνιση μερικών κύριων σημείων εμπλουτισμού
Προσωρινή διακύμανση φορτίου	Ελάχιστη διακύμανση	Μέση διακύμανση
Διακύμανση ποιότητας νερού	Ελάχιστη διακύμανση	Μεγάλη σχετικά διακύμανση



Εικόνα 1.5: Μεταβολή της υδραυλικής κλίσης σε ορεινές περιοχές (Krasny, 1996).

1.2.1 Η ανώτερη ή αποσαθρωμένη ζώνη

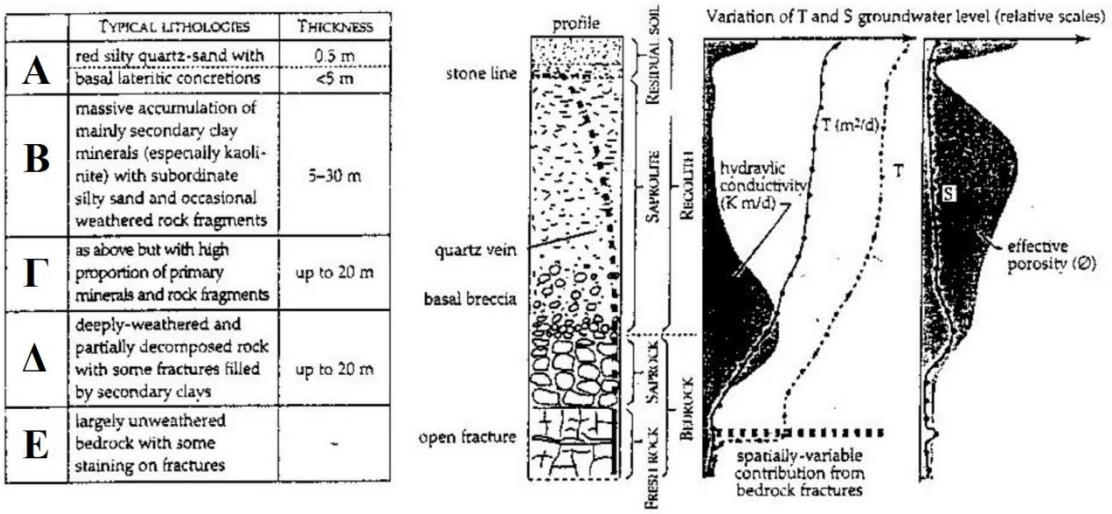
Η ανώτερη ή αποσαθρωμένη ζώνη αντιστοιχεί στον αποσαθρωμένο μανδύα του πετρώματος αλλά και σε νεότερες αποθέσεις του Τεταρτογενούς. Στη ζώνη αυτή κυριαρχεί το πρωτογενές πορώδες και το πάχος της, κάτω από ορισμένες συνθήκες, μπορεί να φτάσει μέχρι και μερικές δεκάδες μέτρα. Η ύπαρξη και η δομή της ζώνης αυτής παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στη διακίνηση, όσο και στην αποθήκευση του υπόγειου νερού. Έτσι, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ο αποσαθρωμένος μανδύας ελέγχει την ποιότητα και την ποσότητα του νερού που κατεισδύει στη διερρηγμένη ζώνη, σε άλλες περιπτώσεις σημαντικές ποσότητες νερού αποθηκεύονται εντός του πρωτογενούς πορώδους του μανδύα. Οι κύριοι παράγοντες, οι οποίοι ελέγχουν το πάχος και την περατότητα του αποσαθρωμένου μανδύα, είναι (Larsson, 1984):

- Η επιφανειακή εξάπλωση του μητρικού πετρώματος.
- Ο βαθμός διάρρηξης του μητρικού πετρώματος. Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, η πυκνότητά τους και η χωροταξική κατανομή των συστημάτων τους στη βραχομάζα, ελέγχουν την έκταση και το βάθος του μανδύα.
- Η τοπογραφική κλίση και η γενική μορφολογική δομή της περιοχής. Σε περιοχές όπου η τοπογραφική κλίση είναι μικρή (<10%), επικρατούν μανδύες μεγάλου πάχους.
- Η περατότητα του μητρικού πετρώματος.
- Η ορυκτολογική σύσταση. Συγκεκριμένα, τα λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα είναι λιγότερο επιδεκτικά στην αποσάθρωση σε σχέση με τα αδροκρυσταλλικά. Έτσι, πετρώματα όπως οι γρανίτες και οι γρανοδιορίτες παρουσιάζουν μεγάλη επιδεκτικότητα στις διαδικασίες της αποσάθρωσης.
- Το μέγεθος των κόκκων του πετρώματος, δηλαδή η λιθολογία.
- Οι κλιματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, μεγάλου πάχους αποσαθρωμένοι μανδύες αναπτύσσονται σε ζεστές και υγρές περιοχές, όπου η ετήσια βροχόπτωση ξεπερνά τα 1000 mm. Αντίστοιχα, μικρού πάχους μανδύες αναπτύσσονται σε ημίξηρες περιοχές.
- Η χημική σύνθεση και ποσότητα του κατεισδύοντος νερού που επιδρά ενεργά στην αποσάθρωση.
- Η θέση του υδροφόρου ορίζοντα.
- Η ποσότητα και κατανομή ενεργών στο σύστημα αερίων, όπως είναι το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα.

– Το είδος των διαδικασιών αποσάθρωσης (μηχανική, χημική ή βιολογική). Συνήθως οι διαδικασίες αυτές δρουν ταυτοχρόνως, αν και έχει παρατηρηθεί ότι η μηχανική αποσάθρωση επικρατεί σε ψυχρά και ξηρά κλίματα, ενώ η χημική αποσάθρωση επικρατεί σε θερμά και υγρά φαινόμενα.

Τέλος, παρά την ποικιλία παραγόντων και διαδικασιών που οδηγούν στην αποδόμηση του πετρώματος, παρατηρούνται πέντε ζώνες στον αποσαθρωμένο μανδύα των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, οι οποίες σύμφωνα με τους Chilton και Forester (1995) είναι οι εξής (Εικόνα 1.6):

- Η ζώνη Α όπου παρατηρούνται αμμώδεις ή αργιλώδεις άμμοι, σε εναλλασσόμενα μεταξύ τους ποσοστά, και το πάχος της δεν ξεπερνά τα 5 m.
- Η ζώνη Β, όπου παρατηρείται μαζική συγκέντρωση δευτερευόντων ορυκτών, κυρίως αργιλικών. Στη ζώνη αυτή μπορεί να εμφανίζονται και μερικά πρωτεύοντα ορυκτά του μητρικού πετρώματος, τα οποία έχουν διατηρηθεί παρά τις διαδικασίες της αποσάθρωσης, όπως ο χαλαζίας. Το πάχος της ζώνης αυτής μπορεί να φτάσει μέχρι τα 30 m. Τέλος, στη ζώνη αυτή είναι δυνατόν να εμφανίζονται και κάποια απομονωμένα τεμάχη του αρχικού πετρώματος.
- Η ζώνη Γ, όπου παρατηρείται μαζική συγκέντρωση δευτερευόντων ορυκτών, όπως ο καολινίτης. Η διαφορά με την προηγούμενη ζώνη έγκειται στη μεγαλύτερη συγκέντρωση πρωτευόντων ορυκτών. Το πάχος της ζώνης αυτής μπορεί να φτάσει μέχρι τα 20 m.
- Η ζώνη Δ, η οποία πρόκειται για τη μεταβατική ζώνη από τον αποσαθρωμένο μανδύα στη διερρηγμένη ζώνη. Η επίδραση της αποσάθρωσης στο τμήμα αυτό είναι λιγότερο εμφανής και κάποιοι από τους αρχικούς ορυκτολογικούς χαρακτήρες του πετρώματος έχουν διατηρηθεί. Επιπλέον, κάποιες από τις ασυνέχειες του σχηματισμού εμφανίζονται στη ζώνη αυτή, των οποίων τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν την περατότητα του σχηματισμού. Παρατηρείται δε ότι σε μεγάλο ποσοστό των ασυνεχειών απαντώνται αργιλικά ορυκτά ως υλικό πληρώσεως.
- Η ζώνη Ε, η οποία πρόκειται για τη διερρηγμένη ζώνη.



Εικόνα 1.6: Προσέγγιση της αποσαθρωμένης ζώνης των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων (Chilton et al., 1995, Caine et al., 1995).

Από υδρογεωλογικής απόψεως, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του αποσαθρωμένου μανδύα εξαρτώνται άμεσα από το βαθμό και το είδος της αποσάθρωσης. Στην εικόνα 1.6 παρουσιάζεται επίσης η σχετική μεταβολή των σημαντικότερων υδραυλικών παραμέτρων στην αποσαθρωμένη ζώνη, αναφορικά με το βάθος. Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάζονται, οι ζώνες Γ και Δ είναι οι πιο σημαντικές ζώνες, καθώς η υδραυλική αγωγιμότητα και ο συντελεστής εναποθήκευσης εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές.

Επιπροσθέτως, η έκταση και το πάχος του αποσαθρωμένου μανδύα παίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς σε περιοχές όπου παρατηρείται μεγάλης έκτασης και πάχους αποσαθρωμένος μανδύας, είναι δυνατόν να αναπτύσσονται σημαντικές υδροφορίες. Αντιθέτως, μικρού πάχους μανδύες δεν είναι δυνατόν να αναπτύσσουν υδροφόρους ορίζοντες, ενώ η κύρια λειτουργία τους είναι η διακίνηση νερού στην υποκείμενη διερρηγμένη ζώνη. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι μεταξύ αυτών των δύο αυτών ακραίων περιπτώσεων, λαμβάνουν χώρα ενδιάμεσες περιπτώσεις αναλόγως της σχέσεως που αναπτύσσεται μεταξύ περατότητας, πορώδους, πάχους και έκτασης του αποσαθρωμένου μανδύα (Μποτσιαλάς, 2007).

1.2.2 <u>Η ενδιάμεση ή διερρηγμένη ζώνη</u>

Η ενδιάμεση ή διερρηγμένη ζώνη αντιστοιχεί στη βραχομάζα, η οποία υπόκειται της αποσαθρωμένης ζώνης. Στη ζώνη αυτή κυριαρχεί το δευτερογενές πορώδες, εκφρασμένο μέσω των διαρρήξεων, των διακλάσεων και των πρωτογενών ασυνεχειών που αναπτύσσονται εντός της μάζας του πετρώματος. Στον συγκεκριμένο ορίζοντα, οι ασυνέχειες μαζί με το υλικό του πετρώματος δημιουργούν ένα σύνολο, του οποίου τόσο η υδραυλική όσο και η μηχανική

συμπεριφορά, εκατέρωθεν των ασυνεχειών, είναι τροποποιημένη και ανισότροπη. Χαρακτηριστικές παράμετροι όπως είναι ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών, το άνοιγμα τους, το μήκος τους, η τραχύτητα, το υλικό πληρώσεως, η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, η πυκνότητα των ασυνεχειών και ο προσανατολισμός, καθορίζουν την συνολική υδραυλική συμπεριφορά του πετρώματος. Το σύνηθες πάχος αυτής της ζώνης φτάνει τα μερικά δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα.

Η διερρηγμένη ζώνη κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στον έλεγχο της υδραυλικής συμπεριφοράς των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, καθώς οι παντός τύπου ασυνέχειες αποτελούν τις σημαντικότερες γεωλογικές δομές από υδρογεωλογικής απόψεως, καθώς καθορίζουν εάν εντός της διερρηγμένης ζώνης μπορεί να αποθηκευτεί και να διακινηθεί νερό.

Τα χαρακτηριστικά που ορίζουν αν μια ασυνέχεια ή ένα σύστημα ασυνεχειών είναι υδρογεωλογικά σημαντικό είναι τα ακόλουθα (Sharp, 1993):

- Το πεδίο των τάσεων. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του βάθους και των ασκούμενων τάσεων, αφού αυξανόμενου του βάθους, οι ορθές τάσεις τείνουν να κλείνουν τις ασυνέχειες.
- Η θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αναλογικά με το βάθος, λαμβάνει χώρα θερμική διαστολή του πετρώματος, η οποία οδηγεί με τη σειρά της στην μείωση του ανοίγματος των ασυνεχειών, με αντίστοιχη μείωση της περατότητας.
- Η τραχύτητα των ασυνεχειών.
- Η γεωμετρία των ασυνεχειών στο χώρο.
- Το άνοιγμα των ασυνεχειών.
- Η παραλληλία ή όχι των τοιχωμάτων των ασυνεχειών. Η παραλληλία οδηγεί σε έντονη ανισοτροπία της βραχομάζας, ενώ αντίθετα ο μεγάλος βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών τείνει να μειώσει την ανισοτροπία. Επιπλέον, ασυνέχειες μεγάλου μήκους, καθώς και η μεγάλη πυκνότητα των ασυνεχειών, οδηγούν σε αντίστοιχη αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

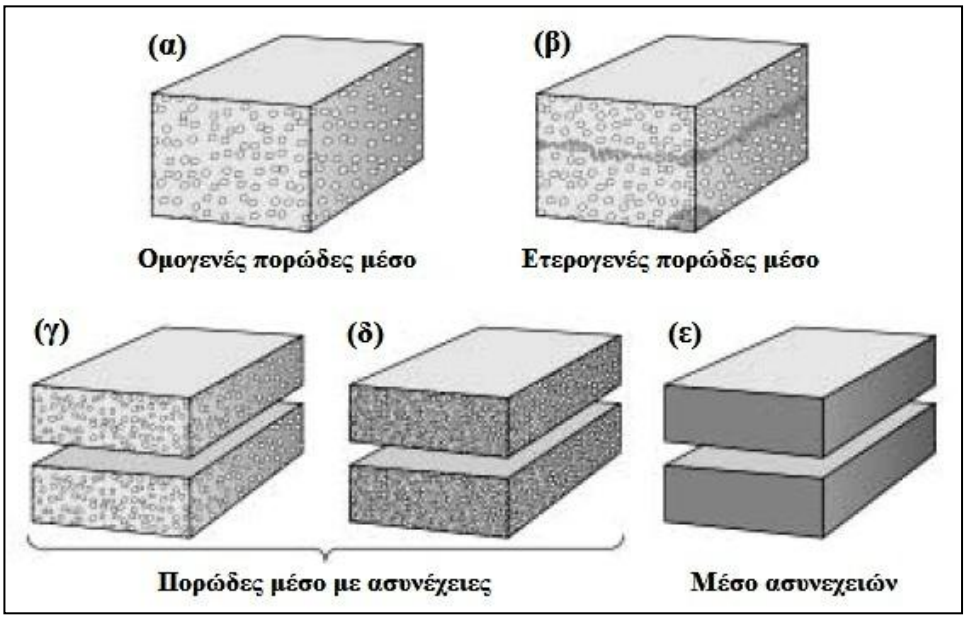
Η λιθολογία, αν και ελέγχει παράγοντες όπως την αποσάθρωση και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, δεν λαμβάνεται υπόψη στους καθοριστικούς παράγοντες που ελέγχουν την υδραυλική συμπεριφορά των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, καθώς η επίδρασή της υπερκαλύπτεται από τους παραπάνω παράγοντες. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι μια ολοκληρωμένη μελέτη του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων πρέπει να περιγράφει λεπτομερώς τη δομή της βραχομάζας, καθώς και το πρότυπο (ποιοτικά και ποσοτικά) των ασυνεχειών που λαμβάνει χώρα στην περιοχή μελέτης.

1.2.3 Η κατώτερη ή συμπαγής ζώνη

Η κατώτερη ή συμπαγής ζώνη αντιστοιχεί στο άρρηκτο πέτρωμα, όπου λόγω του μεγάλου βάθους, οι πρωτογενείς ασυνέχειες είναι αυτές οι οποίες επικρατούν, εάν υπάρχουν, με τις δευτερογενείς να εκφράζονται μέσω απομονωμένων ρηγμάτων ή ρηξιγενών επιφανειών μεγάλου βάθους. Το πάχος της ζώνης αυτής μπορεί να φτάσει μέχρι και μερικές εκατοντάδες ή και χιλιάδες μέτρα.

1.3 ΤΟ ΜΕΣΟ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ: ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Γενικά, όλα τα πετρώματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τρόπο ροής του νερού μέσα στη μάζα τους (Cook, 2003). Η ταξινόμηση αυτή γίνεται σύμφωνα με δύο ακραία μέλη, το μέσο ασυνεχειών και το πορώδες μέσο (Εικόνα 1.7). Το μέσο ασυνεχειών διακρίνεται για τον ασυνεχή του χαρακτήρα λόγω της παρουσίας δικτύου ασυνεχειών, το οποίο τέμνει τη βραχομάζα και παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση υδροφόρων συστημάτων μέσα σε αυτή. Σε αντιδιαστολή το πορώδες μέσο εμφανίζει συνεχή χαρακτήρα και η διαμόρφωση υδροφόρων συστημάτων εξαρτάται άμεσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων του πετρώματος.



Εικόνα 1.7: Ταξινόμηση των πετρωμάτων με βάση τον τρόπο ροής του νερού μέσα από τη μάζα τους, (α) ομογενές πορώδες μέσο, (β) ετερογενές πορώδες μέσο, (γ) πορώδες μέσο με ασυνέχειες και μεγάλη περατότητα στην κύρια μάζα, (δ) πορώδες μέσο με ασυνέχειες και απειροελάχιστη περατότητα στην κύρια μάζα και (ε) μέσο ασυνεχειών (Cook, 2003).

Όσον αφορά τη ροή, στα ομογενή πορώδη μέσα, το νερό ρέει στα κενά μεταξύ των κόκκων, ενώ στα ετερογενή μέσα ασυνεχειών, η διακύμανση του μεγέθους των κόκκων οδηγεί στη δημιουργία προτιμητέων προσανατολισμών ροής. Στα πορώδη μέσα ασυνεχειών, το νερό ρέει και αποθηκεύεται στους αγωγούς ροής, αλλά και στην κύρια μάζα του πετρώματος, η οποία μπορεί να έχει είτε απειροελάχιστη περατότητα, είτε να συμβάλλει σημαντικά στη ροή του νερού. Αντίθετα, στα μέσα ασυνεχειών, το υπόγειο νερό ρέει κυρίως σε αγωγούς ροής, ενώ η κύρια μάζα του πετρώματος είναι σχετικά αδιαπέρατη και δεν εμφανίζει υπολογίσιμο και μετρήσιμο πορώδες.

Ωστόσο, η παραπάνω ταξινόμηση δεν είναι σαφής, καθώς τα πορώδη μέσα στην πραγματικότητα είναι ασυνεχή σε κλίμακα κόκκων, ενώ πολλά πετρώματα είναι τόσο έντονα διερρηγμένα προς όλες τις κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να προσομοιάζονται με πορώδη μέσα. Έτσι, η συνέχεια ή η ασυνέχεια του μέσου εξαρτάται από την κλίμακα θεωρήσεως και στην πράξη, ένα μέσο θεωρείται πορώδες (συνεχές) όταν στο πεδίο της θεωρούμενης ροής, δεν διακρίνονται εντελώς διακεκριμένες διευθύνσεις ροής. Αντιθέτως, ένα μέσο θεωρείται ως μέσο ασυνεχειών (ασυνεχές), όταν τέτοιες διευθύνσεις διακρίνονται προσδιορισμένες και αμετακίνητες, λόγω παρουσίας ασυνεχειών (Στουρνάρας, 1998, Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011).

Ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι, με δεδομένο πως στη φύση τα πετρώματα εμφανίζονται τοπικά να έχουν χαρακτήρα που κυμαίνεται μεταξύ των ακραίων μελών που περιγράφηκαν παραπάνω, είναι σχεδόν αδύνατο να προσδιοριστεί με ακρίβεια η κίνηση του υπόγειου νερού. Ωστόσο, μοντέλα ροής δίνουν μια ιδανική βάση για περαιτέρω υπολογισμούς, που βοηθούν σημαντικά στην κατανόηση της υπόγειας ροής του νερού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι κατανοητό ότι στο μέσο ασυνεχειών, η υδραυλική σημασία των ασυνεχειών είναι καθοριστική στη διαμόρφωση ενός πλαισίου υδραυλικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων στο σύνολό τους. Οι ασυνέχειες ενός πετρώματος αποτελούν όλες τις γεωλογικές επιφάνειες κατά μήκος των οποίων τα υλικά του φλοιού της γης έχουν χάσει τη συνοχή τους, αναφορικά με κάποια φυσική ή χημική ιδιότητά του. Οι ασυνέχειες των πετρωμάτων παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλούς κλάδους της γεωλογίας (τεκτονική γεωλογία, τεχνική γεωλογία, υδρογεωλογία, κ.τ.λ.), για αυτό και η ταξινόμηση τους εξαρτάται από το πεδίο έρευνας και εφαρμογής. Όμως, από γενετικής απόψεως, μπορούν να ταξινομηθούν γενικά σε δύο κατηγορίες (Στουρνάρας, 1996):

- Στις πρωτογενείς ασυνέχειες, οι οποίες δημιουργούνται ταυτόχρονα με τη δημιουργία του πετρώματος. Διακρίνονται σε πραγματικές, όπως π.χ. αυτές που εμφανίζονται

κατά την ψύξη του μάγματος στην επιφάνεια, και σε δυνητικές, όπως η στρώση, η φύλλωση και η σχιστότητα, οι οποίες συνιστούν εν δυνάμει επιφάνειες αδυναμίας και μπορούν να εξελιχθούν σε πραγματικές ασυνέχειες με τη δράση άλλων παραγόντων.

– Στις δευτερογενείς ασυνέχειες, οι οποίες έπονται της δημιουργίας των πετρωμάτων και είναι αποτέλεσμα εφαρμογής κάθε λογής τάσεων που ασκούνται σε αυτά. Τέτοιου είδους ασυνέχειες είναι οι διαρρήξεις, οι διακλάσεις και τα ρήγματα. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται επίσης και ειδικές περιπτώσεις, όπως ασυνέχειες εφελκυσμού λόγω αποσυμπίεσης των φυσικών ή τεχνητών πρανών.

Πιο ειδικά, οι ασυνέχειες ταξινομούνται σύμφωνα με τις παρακάτω γενετικές κατηγορίες (Singhal & Gupta, 1999):

- **Επίπεδα στρώσης**

  Η στρώση αποτελεί το κύριο σύστημα πρωτογενών ασυνεχειών στα ιζηματογενή πετρώματα και παίζει καθοριστικό ρόλο στη διακίνηση και στην αποθήκευση του υπόγειου ύδατος, αφού καθορίζει το βαθμό ανισοτροπίας του πετρώματος. Η επίδραση των πτυχών στη στρώση είναι επίσης καθοριστική στην τελική διαμόρφωση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, καθώς, αφενός μεταβάλλουν την κλίση και τη διεύθυνση του επιπέδου της στρώσης, αφετέρου, λόγω των εφελκυστικών τάσεων που ασκούνται εκατέρωθεν του άξονα της πτυχής, αναπτύσσονται διαρρήξεις και διακλάσεις σε περίπτωση αντικλίνου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη υδροφόρων οριζόντων εντός του καταπονημένου πετρώματος.

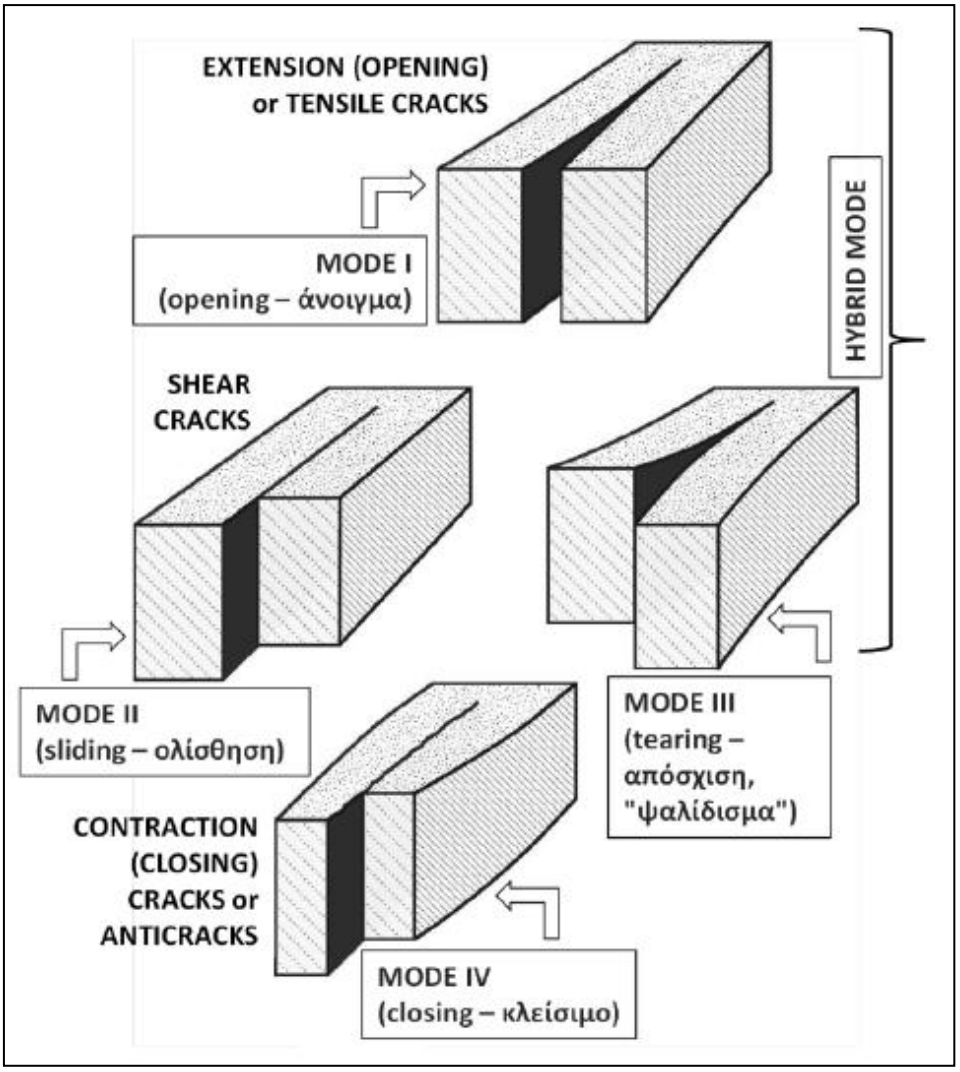
- **Επίπεδα φύλλωσης**

  Η φύλλωση είναι αποτέλεσμα της παράλληλης διάταξης των ορυκτών του πετρώματος σε παράλληλη διεύθυνση με την ασκούμενη σε αυτό τάση. Ειδικά στις περιπτώσεις των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, όπου πια αναφερόμαστε σε σχισμό ή σχιστότητα (Εικόνα 1.8), η γραμμική διάταξη των ορυκτών λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ανακρυστάλλωσης από τη δράση δυναμομεταμορφικών διεργασιών. Τελικό αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση λιγότερο ή περισσότερο έντονης ανισοτροπίας, παράλληλα ή κάθετα στη γραμμική αυτή διάταξη. Από υδρογεωλογικής απόψεως, η φύλλωση στην περίπτωση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων έχει δράση ανάλογη με αυτή της στρώσης στα ιζηματογενή (Στουρνάρας, 2005).

Εικόνα 1.8: Επίπεδα σχιστότητας σε σχιστόλιθο στην ευρύτερη περιοχή της Μουτσούνας στη νήσο Νάξο.

- **Ρωγμές και διακλάσεις**

  Το συνηθέστερο είδος ασυνεχειών είναι οι ρωγμές ή διαρρήξεις, δηλαδή επιφανειών κατά μήκος των οποίων τα πετρώματα έχουν σπάσει. Οι ρωγμές διακρίνονται γενετικά ανάλογα με τη σχετική κίνηση των τεμαχών τους εκατέρωθεν της επιφάνειας διάρρηξης και διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι (Εικόνα 1.9), α) οι εκτατικές ρωγμές (ή ρωγμές τύπου Ι), όπου η σχετική κίνηση έχει λάβει χώρα κάθετα στα τοιχώματά τους και β) οι διατμητικές ρωγμές, όπου αναγνωρίζονται δύο τύποι, οι ρωγμές τύπου ΙΙ, όπου η ολίσθηση έγινε κάθετα στο περατωτικό όριο της ρωγμής και οι ρωγμές τύπου ΙΙΙ, όπου η ολίσθηση έγινε παράλληλα προς το όριο αυτό και δ) οι κλειστές ρωγμές (ή ρωγμές) τύπου IV, οι οποίες συνήθως περιγράφουν κλειστές διαρρήξεις, όπως για παράδειγμα οι στυλόλιθοι. Επίσης διακρίνονται ρωγμές με συνιστώσες μετατόπισης τόσο κάθετα, όσο και παράλληλα προς την επιφάνεια διάρρηξης, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως πλάγιες εκτατικές ρωγμές ή ρωγμές μεικτού τύπου, ενώ ως διακλάσεις (Εικόνα 1.10) χαρακτηρίζονται ρωγμές οι οποίες δείχνουν μόνο μικρή μετατόπιση κάθετα στην επιφάνειά τους και μηδενική ή μη αξιοσημείωτη μετατόπιση των τεμαχών τους παράλληλα προς αυτήν (Παπανικολάου κ.α., 2005).



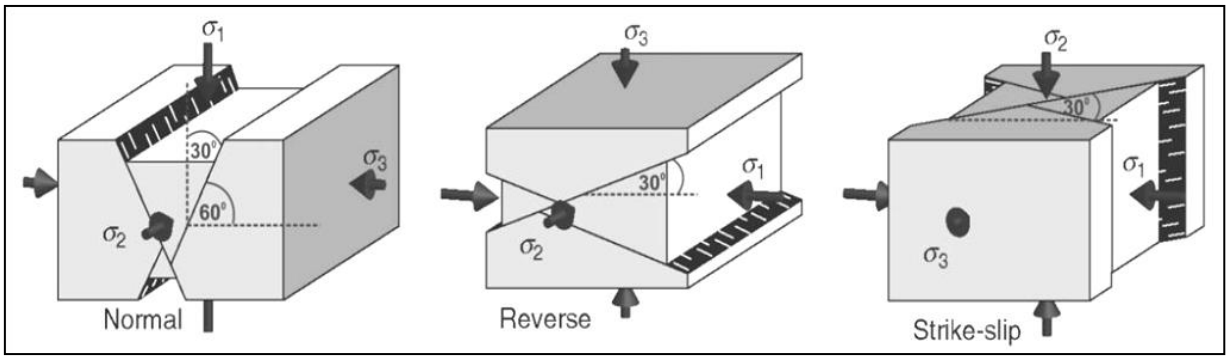
Εικόνα 1.9: Γενετική ταξινόμηση των ρωγμών, τύπου I, II, III και IV (Παπανικολάου κ.α., 2005).

Εικόνα 1.10: Σύστημα διακλάσεων σε μάρμαρα στην ευρύτερη περιοχή της Μουτσούνας στη νήσο Νάξο.

- **Ρήγματα και ζώνες διάτμησης**

  Τα ρήγματα αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα τεκτονικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια της γης. Αντιπροσωπεύουν επιφάνειες ή στενές ζώνες κατά μήκος των οποίων και παράλληλα προς αυτές, το ένα τέμαχος έχει κινηθεί σε σχέση με το άλλο. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα ρήγματα αντιπροσωπεύουν εύθραυστες διατμητικές διαρρήξεις ή ζώνες πολύ κοντινών μεταξύ τους διατμητικών διαρρήξεων (Εικόνα). Σε ορισμένες περιπτώσεις η σχετική κίνηση των τεμαχών λαμβάνει χώρα χωρίς να χαθεί η συνέχεια του πετρώματος κατά μήκος της διατμητικής ζώνης (Παπανικολάου κ.α., 2005).

  Τα ρήγματα ταξινομούνται κατά πολλούς τρόπους, όμως η πιο συνηθισμένη ταξινόμηση αποτελεί η γενετική, όπου λαμβάνεται υπόψη το πεδίο των ασκούμενων τάσεων (Εικόνα 1.11). Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται τρεις μεγάλες κατηγορίες ρηγμάτων, α) τα κανονικά, τα οποία είναι κεκλιμένα ρήγματα με ολίσθηση κατά κλίση, όπου το υπερκείμενο τέμαχος κινήθηκε προς τα κάτω σε σχέση με το υποκείμενο, β) τα επωθητικά, όπου, αντίθετα με τα κανονικά, το υπερκείμενο τέμαχος κινήθηκε προς τα πάνω, και αν παρουσιάζουν κλίση άνω των 45ο καλούνται ανάστροφα, και γ) τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, τα οποία πρόκειται για κατακόρυφα ρήγματα, τα οποία παρουσιάζουν ολίσθηση κατά παράταξη και διακρίνονται σε δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα (Anderson, 1951, Παπανικολάου κ.α., 2005).



Εικόνα 1.11: Γενετική ταξινόμηση κατά Anderson, (α) κανονικό ρήγμα με τη μέγιστη συμπιεστική, κύρια τάση σ_1 κατακόρυφη, (β) επωθητικό ρήγμα με την ελάχιστη, συμπιεστική, κύρια τάση σ_3 κατακόρυφη και (γ) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης με την ενδιάμεση, συμπιεστική, κύρια τάση σ_2 κατακόρυφη (Παπανικολάου κ.α., 2005).

- **Άλλες γεωλογικές ασυνέχειες**

  Εκτός από τους κύριους τύπους ασυνεχειών που περιγράφηκαν παραπάνω, υπάρχουν και κάποια ήδη γεωλογικών επαφών, οι οποίες κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορούν να δράσουν ως ασυνέχειες ικανές να επηρεάσουν την υπόγεια ροή. Παράδειγμα μιας τέτοιας επαφής είναι οι επαφές διεισδύσεως, όπου η λειτουργία και η επίδρασή της στο υδρογεωλογικό περιβάλλον σχετίζεται άμεσα με το γεγονός ότι τα ανερχόμενα πλουτώνια σώματα κρυσταλλώνονται κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την απουσία πρωτογενούς πορώδους και την ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους, λόγω ψύξης. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι υδρογεωλογικοί χαρακτήρες του φιλοξενούντος πετρώματος να είναι σε κάποιες περιπτώσεις τελείως διαφορετικοί από αυτούς του ανερχόμενου πετρώματος. Στην περίπτωση αυτή, η επαφή αυτή λειτουργεί όχι μόνο ως γεωλογικό όριο, αλλά και ως υδρογεωλογικό όριο (Στουρνάρας, 2005).

Η μελέτη και η περιγραφή του μέσου ασυνεχειών είναι απαραίτητη για τον πλήρη προσδιορισμό του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, που σχετίζεται με αυτό, και πραγματοποιείται με διάφορες έρευνες, οι οποίες ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις δισδιάστατες και τις τρισδιάστατες (Jouanna, 1993). Οι δισδιάστατες μέθοδοι έρευνας βασίζονται στη μελέτη της βραχομάζας, τόσο επιφανειακά, μέσω γεωλογικής χαρτογράφησης και μεθόδων τηλεπισκόπισης, όσο και σε βάθος, μέσω γεωτρήσεων, και δίνουν μια πρώτη προσέγγιση των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων της. Οι τρισδιάστατες μέθοδοι έρευνας αποσκοπούν στη συλλογή πληροφοριών σχετικά και με την εσωτερική δομή της βραχομάζας, μέσω γεωφυσικών και αντλητικών δοκιμών και υδροχημικών μεθόδων (Πίνακας 1.2).

Πίνακας 1.2: Μέθοδοι έρευνας του μέσου ασυνεχειών (Singhal & Gupta, 1999).

Μέθοδοι έρευνας μέσου ασυνεχειών	
Δισδιάστατη έρευνα	Γεωλογική χαρτογράφηση Φωτογεωλογική χαρτογράφηση
Τρισδιάστατη έρευνα	Γεωτρητικές μελέτες Αντλητικές δοκιμές Υδροχημικές μελέτες Γεωφυσικές μελέτες (σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές, ηλεκτρικές, βαρυτικές, χρήση γεωραντάρ)

Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία μελέτης και ανάλυσης των ασυνεχειών, καθώς και η κύρια σημασία τους όσον αφορά την υδραυλική συμπεριφορά της βραχομάζας, είναι τα εξής (Στουρνάρας, 1996):

- Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, η οποία αφορά τη μέτρηση της διευθύνσεως, της κλίσης και της φοράς μέγιστης κλίσης αυτών και ταυτίζεται με τον προσανατολισμό της υπόγειας ροής.
- Η ομαδοποίηση των ασυνεχειών, η οποία αφορά στατιστική συγκρότηση οικογενειών με παρεμφερή στοιχεία προσανατολισμού, το φάσμα των οποίων καθορίζεται από τις κατά περίπτωση στατιστικές επιλογές. Η στατιστική επεξεργασία των οικογενειών συμπληρώνεται από ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως η χωρική πυκνότητα, το μέσο μήκος και η μέση απόσταση ανάμεσα σε διαδοχικές ασυνέχειες. Η μελέτη αυτή είναι σημαντική για τον καθορισμό πιθανής ισοτροπίας σε διατομές διευθύνσεων ροής, αλλά και στην αναλυτικότερη έκφραση των προσανατολισμών της υπόγειας ροής.
- Η έκταση των ασυνεχειών εκφρασμένη σε μήκος (δισδιάστατη θεώρηση) ή σε επιφάνεια (τρισδιάστατη θεώρηση), καθώς οι ασυνέχειες συμμετέχουν στη διαμόρφωση της περατότητας του μέσου σε περίπτωση που τέμνονται με άλλες ασυνέχειες αγωγούς, γεγονός που σημαίνει ότι η ροή σε κάθε ασυνέχεια εξαρτάται από τη ροή μέσα στις άλλες.
- Ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών, ο οποίος συνδέεται όχι μόνο με τον αριθμό των ασυνεχειών και των οικογενειών τους, αλλά με τη διασύνδεση που υπάρχει ανάμεσα στις οικογένειες και δημιουργεί την έννοια του δικτύου. Το δίκτυο αυτό δημιουργεί συνθήκες κυκλοφορίας και συνθήκες μειώσεως της πραγματικής πυκνότητας της βραχομάζας, γεγονός που δημιουργεί συνθήκες ομαλής και ενιαίας ροής.
- Η σχετική ηλικία των ασυνεχειών, καθώς προσφέρει έμμεσες ενδείξεις για την επέκταση σε βάθος των ασυνεχειών ή την επέκταση σε γειτονικούς σχηματισμούς και βοηθά στον καθορισμό ορίων της υπόγειας ροής.
- Η διαβάθμιση δικτύου των ασυνεχειών, μέσω του οποίου οι ασυνέχειες διακρίνονται σε απλές, υδραυλικές και υδρογεωλογικές με στόχο τη διάκριση πεδίων θεωρητικών και πραγματικών ροών.
- Η απόσταση ανάμεσα στις ασυνέχειες, η οποία αποτελεί ένδειξη βαθμού περατότητας με ανάλογο βαθμό διασυνδέσεως.

- Η συχνότητα και η πυκνότητα των ασυνεχειών, με στόχο των καθορισμό επικρατουσών διευθύνσεων της ροής. Επίσης η συχνότητα και η πυκνότητα αποτελούν ένδειξη ποσοτικής έκφρασης της περατότητας.
- Οι διαστάσεις των ασυνεχειών, με στόχο τον προσδιορισμό του όγκου ροής.
- Η μελέτη των ασυνεχειών σε σχέση με το βάθος, καθώς γενικά οι ασυνέχειες με την αύξηση του βάθους μειώνουν τόσο τον αριθμό τους, όσο και τα χαρακτηριστικά τους. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός της εξασθένησης της υπόγειας ροής.
- Το φαινόμενο άνοιγμα των ασυνεχειών, δηλαδή οι διαστάσεις του ίχνους της ασυνέχειας στην επιφάνεια, ώστε να αποφευχθεί τυχόν υπερεκτίμηση των συνθηκών ροής.
- Η φαινόμενη τραχύτητα, η οποία πρόκειται για την εικόνα τραχύτητας της ασυνέχειας στην επιφάνεια του εδάφους και βοηθά στον καθορισμό των φαινόμενων συνθηκών ροής.
- Ο όγκος των ασυνεχειών, ο οποίος δεν είναι εύκολα προσεγγίσιμος, με αποτέλεσμα τη δυσκολία εκτίμησης των συνθηκών ροής.
- Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά την περατότητα, καθώς μειώνεται δραστικά εάν πρόκειται για αργιλικό υλικό ή μειώνεται από δραστικός μέχρι μηδενισμού εάν πρόκειται για κρυσταλλικό υλικό.
- Η σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους των ασυνεχειών, όπου για μια δεδομένη οικογένεια φαίνεται ότι ισχύει η σχέση n.a.e.=1, με n τον αριθμό των ασυνεχειών, a τη μέση διάσταση των ασυνεχειών και e τη μέση απόσταση των ασυνεχειών. Η σχέση αυτή είναι σημαντική για τη προσέγγιση στη μορφή της υδροφορίας και τις συνθήκες ροής.
- Η επίδραση της κατανομής των τάσεων, όπου υποστηρίζεται ότι οι διακλάσεις που είναι παράλληλες με τη διεύθυνση των μέγιστων τάσεων είναι και οι πιο ανοιχτές. Έτσι, η επίδραση της κατανομής των τάσεων είναι σημαντική στη διαμόρφωση συνθηκών ροής.
- Το ισοδύναμο υδραυλικό άνοιγμα πρόκειται για παράμετρο πειραματική, όπου προσδιορίζεται από δοκιμή με νερό σε ασυνέχειες γεωτρήσεων και που σχετίζεται και περιέχει συγχρόνως το ελεύθερο άνοιγμα των ασυνεχειών, τη συνέχειά τους, το βαθμό διαχωρισμού, την τραχύτητα, κ.τ.λ. Με τον τρόπο αυτό, η παράμετρος αυτή είναι επίσης σημαντική στη διαμόρφωση των συνθηκών ροής.

Στην παρούσα έρευνα, η μελέτη του μέσου ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης είναι καθοριστική, καθώς όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά διαμορφώνουν ένα ιδιαίτερο υδρογεωλογικό περιβάλλον, το οποίο επηρεάζει την υπόγεια ροή του νερού. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, καθορίστηκε και μελετήθηκε εκτενώς το μέσο ασυνεχειών στην περιοχή έρευνας μέσω εργασιών υπαίθρου, μεθόδων τηλεπισκόπισης και στατιστικής (δισδιάστατη έρευνα), ενώ πραγματοποιήθηκε και προσέγγιση στη τρίτη διάσταση με τη βοήθεια ειδικών λογισμικών, καθώς στόχος είναι η προσομοίωση της υπόγειας ροής των υδάτων στο μέσο ασυνεχειών. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, αλλά και τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

1.4 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην παρούσα διατριβή, κύριος στόχος είναι η διερεύνηση και προσομοίωση της υδροφορίας ετερογενούς μέσου ασυνεχειών, μέσω της τεκτονικής και μικροτεκτονικής προσέγγισης της υπόγειας υδροφορίας στη Νήσο Νάξο. Η έρευνα στηρίζεται κυρίως στην ανάλυση, την ερμηνεία και την εκτίμηση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, τα οποία καταλαμβάνουν το 90% της συνολικής έκτασης της νήσου. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, ακολουθήθηκε μια σειρά μεθοδολογιών και εργασιών, οι οποίες περιλαμβάνουν συλλογή δεδομένων και επεξεργασία τους με τεχνικές τηλεπισκόπισης, ανάλυση δεδομένων με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής, εξαγωγή συμπερασμάτων με την εφαρμογή μεθόδων στατιστικής και χρήση ειδικών λογισμικών για την τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής έρευνας και της προσομοίωσης της υπόγειας ροής του νερού. Πιο συγκεκριμένα έγιναν οι παρακάτω εργασίες:

- Ανάλυση δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών για την εξαγωγή και χωρική αποτύπωση των τεκτονικών στοιχείων της περιοχής μελέτης με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS 10.x. Η ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψε από τη συγκεκριμένη εργασία, έγινε μέσω εργασιών υπαίθρου, και κατασκευάστηκε χάρτης φωτογραμμώσεων, ο οποίος περιλαμβάνει τις θραυσιγενείς δομές της περιοχής μελέτης.
- Περιγραφή και ανάλυση του μέσου ασυνεχειών του μεταμορφωμένου συστήματος της περιοχής μελέτης, όπου παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του, όπως ο τύπος των ασυνεχειών, ο προσανατολισμός, οι διαστάσεις των ασυνεχειών, η χωρική

πυκνότητα και ο βαθμός διασύνδεσης. Στην περίπτωση αυτή έγινε ταυτόχρονη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και δεδομένων από την εργασία υπαίθρου.

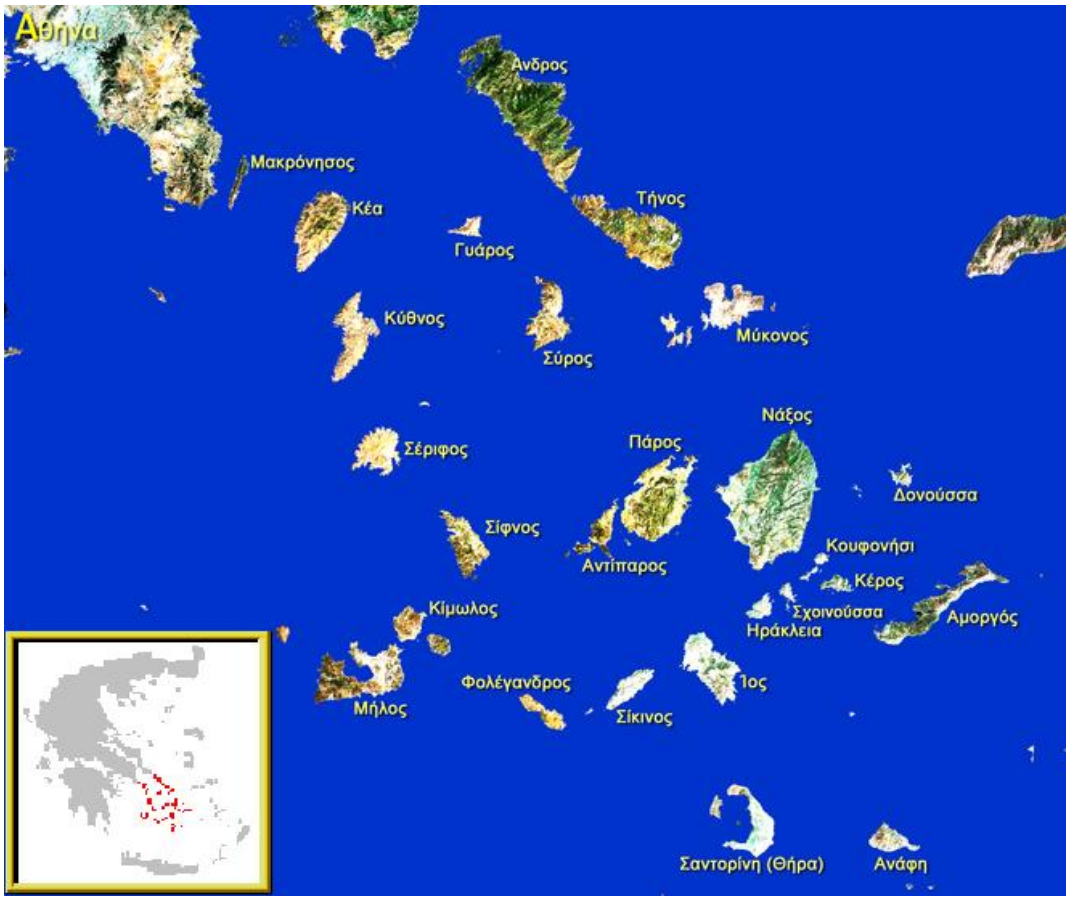
- Προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης για την περίοδο 1958-2010, ώστε να υπολογιστεί προσεγγιστικά η ποσότητα του νερού που κατεισδύει και να συσχετιστεί με το μέσο ασυνεχειών. Για την εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SWAT (Soil and Water Assessment Tool) του Πανεπιστημίου A&M του Τέξας, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως επέκταση του ArcGIS και διατίθεται δωρεάν μέσω της ιστοσελίδας http://swatmodel.tamu.edu/ . Η μελέτη αυτή επεκτάθηκε και χρησιμοποιήθηκαν εκτιμώμενα κλιματικά δεδομένα για την περίοδο 2010-2100, για τη μελέτη της επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή έρευνας και την εισαγωγή των παραμέτρων που προκύπτουν στο μοντέλο υπόγειας ροής.
- Συσχέτιση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης με το μέσο ασυνεχειών. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι πηγαίες εκφορτίσεις και με τη βοήθεια μεθόδων στατιστικής, πραγματοποιήθηκε γεωμετρική και χωρική συσχέτιση των παραμέτρων των ασυνεχειών με την κατανομή των πηγών.
- Περιγραφή και ανάλυση των υδροχημικών συνθηκών της περιοχής μελέτης με στόχο τη συσχέτιση της ποιότητας του υπόγειου νερού με το μέσο ασυνεχειών της περιοχής μελέτης.
- Περιγραφή και ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την ροή του υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης, με στόχο τον καθορισμό και τον υπολογισμό των παραγόντων που εισάγονται στο μοντέλο υπόγειας ροής. Καθώς οι παράγοντες που μελετήθηκαν αφορούν τη νήσο Νάξο, το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί αποκλειστικά σε περιοχές όμοιας λιθολογίας, με ίδιους παράγοντες επιρροής της υπόγειας ροής. Έτσι, το υπό δημιουργία μοντέλο, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα νησιά των Κυκλάδων, το οποίο και ονομάστηκε ως «Κυκλαδικό Υδρογεωλογικό Μοντέλο».
- Χρήση του λογισμικού FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system), το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για την προσομοίωση της υπόγειας ροής των υδάτων σε μέσο ασυνεχειών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τη δημιουργία του μοντέλου υπόγειας ροής στο λογισμικό αυτό είναι απαραίτητη η εισαγωγή πολλών παραμέτρων σχετικών με τις ασυνέχειες και των υδραυλικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.

Κεφάλαιο 2^{ο} - Νάξος: Η Περιοχή Μελέτης

2. ΝΑΞΟΣ: Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

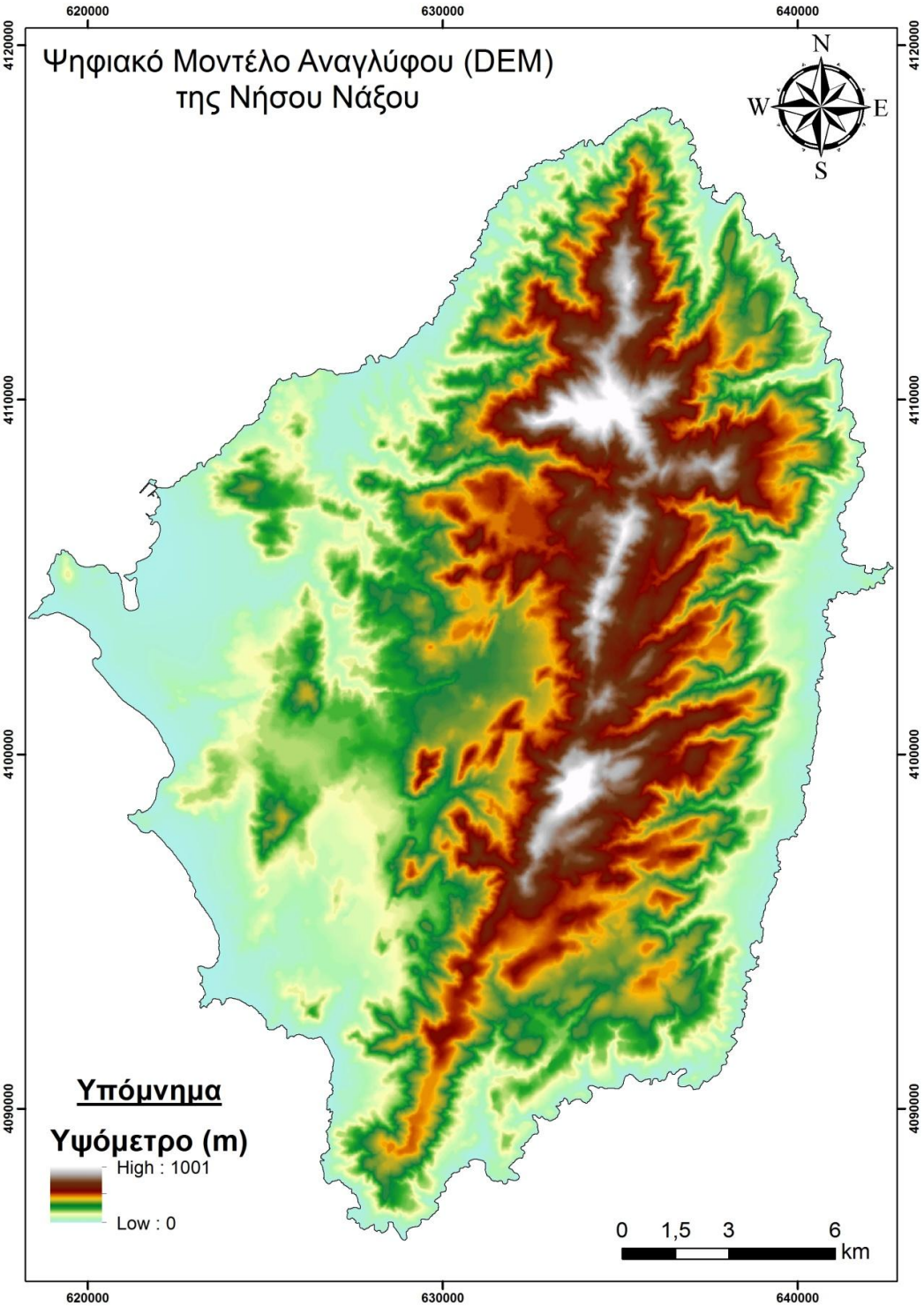
Η Νάξος (ή Αξιά) είναι το μεγαλύτερο νησί των Κυκλάδων και έχει συνολική έκταση περίπου 429 km^2. Ανήκει στις ανατολικές Κυκλάδες, ενώ συγχρόνως κατέχει κεντρική θέση στο Αιγαίο Πέλαγος, έχοντας βόρεια τη Μύκονο, ανατολικά τη Δονούσα, νότια και νοτιοανατολικά την Ίο και την Αμοργό αντίστοιχα και δυτικά την Πάρο σε αρκετά μικρή απόσταση (Εικόνα 2.1). Απέχει 108 ναυτικά μίλια από τον Πειραιά και πρωτεύουσά της είναι η κωμόπολη Νάξος (ή Χώρα).



Εικόνα 2.1: Γεωγραφική τοποθέτηση της νήσου Νάξου στην ευρύτερη περιοχή.

Το σχήμα της είναι επίμηκες, με μέγιστο άξονα μήκους 32,77 km και μέγιστο άξονα πλάτους 23,86 km (Ευελπίδου, 2001). Το ανάγλυφό της είναι ορεινό, με μια ορεινή ράχη σχεδόν ενιαία, γυμνή και βραχώδη, να την κατατέμνει από το βόρειο άκρο της μέχρι το νότιο. Το μέγιστο υψόμετρο του νησιού παρατηρείται σχεδόν στο κέντρο της ράχης αυτής, στο όρος Ζευς (ή Ζα), και ισούται με 1001 m (Εικόνα 2.2).

Οι ακτές της Νάξου φτάνουν σε μήκος τα 148 km και χαρακτηρίζονται ως απότομες στα νότια και υπήνεμες στα δυτικά, με πολλούς κόλπους και αμμουδερές παραλίες. Πλήρως ανεπτυγμένες κολπώσεις και ασφαλείς φυσικοί λιμένες δεν παρουσιάζονται στο νησί, με αποτέλεσμα οι κάτοικοι να ασχολούνται περισσότερο με γεωργικές και κτηνοτροφικές εργασίες και πολύ λιγότερο με αλιευτικές.



Εικόνα 2.2: Το ανάγλυφο της νήσου Νάξου.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η σπουδαιότητα της Νάξου υπήρξε στη μακρά ιστορική διάρκεια όχι απλά πρωταρχική, αλλά διαμορφωτική στην ιστορική πορεία, όχι μόνο στον Κυκλαδικό, αλλά και στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο. Ήταν πάντα γνωστή για τη μεγάλη ποσότητα των εξαγομένων μαρμάρων της, για τη σμύριδα και την παραγωγή αλατιού, ενώ ο κατεξοχήν συνδεδεμένος με τη Νάξο θεός ήταν ο Διόνυσος, ο οποίος ενσάρκωνε τις αγαθοποιούς δυνάμεις της φύσεως. Μάλιστα, σύμφωνα με τη μυθολογία, ο Διόνυσος γεννήθηκε και μεγάλωσε στη Νάξο, όπου παντρεύτηκε την Αριάδνη μετά την εγκατάλειψή της από το Θησέα.

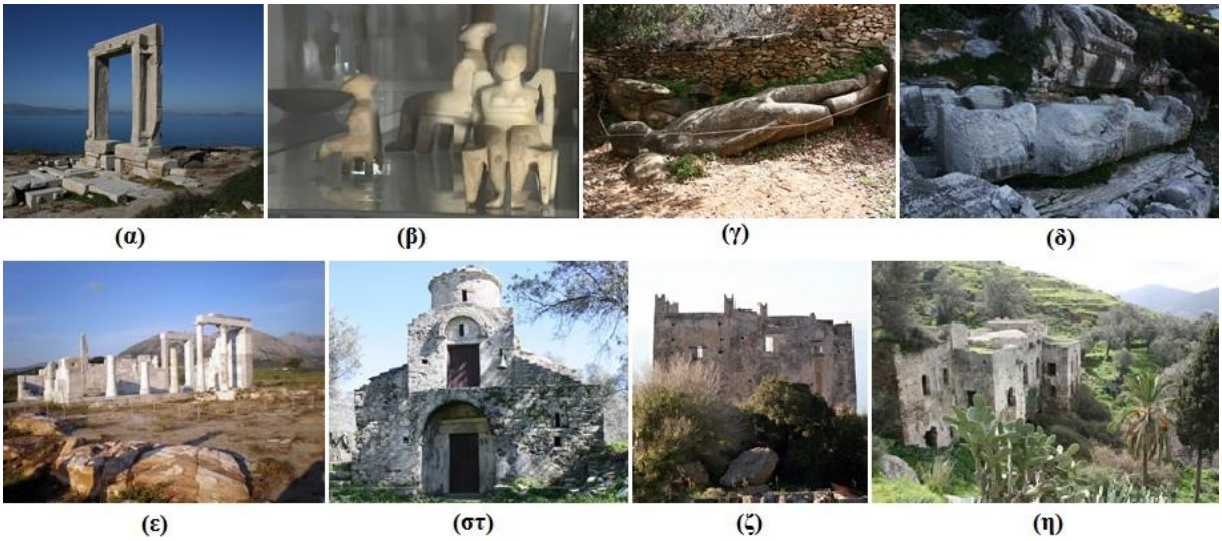
Η Νάξος κατοικείται από την 4η χιλιετία π.Χ. μέχρι και σήμερα αδιάκοπα. Πρώτοι κάτοικοι της Νάξου θεωρούνται οι Θράκες, οι οποίοι σύμφωνα με την παράδοση, κυριάρχησαν στο νησί διακόσια χρόνια. Τους διαδέχθηκαν οι Κάρες, οι οποίοι ήρθαν από τη Μικρά Ασία, έχοντας επικεφαλή το Νάξο, ο οποίος επέβαλε το όνομά του στο νησί.

Στη Νάξο αναπτύχθηκε έντονα η γλυπτική και η αρχιτεκτονική, ενώ στα γλωσσικά ιδιώματα του νησιού, επιβιώνουν και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα στοιχεία από την εποχή του Ομήρου. Οι σημαντικές χρονολογίες στην ιστορία του νησιού με μια συνοπτική περιγραφή τους, παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Οι σημαντικές χρονολογίες στην ιστορία της Νάξου.

Χρονολογία	**Περιγραφή**
4η χιλιετία π.Χ.	Νεολιθικοί οικισμοί
3η χιλιετία π.Χ.	Κυκλαδική εποχή. Η Νάξος είναι ένα από τα σημαντικότερα κέντρα του Κυκλαδικού πολιτισμού, που σήμερα θεωρείται ως ο παλαιότερος πολιτισμός της Ευρώπης. Δημιουργήματα αυτού του πολιτισμού είναι τα Κυκλαδικά ειδώλια.
2η χιλιετία π.Χ.	Μυκηναϊκή εποχή. Η Νάξος αποτελεί γέφυρα για την εξάπλωση των Μυκηναίων προς την Ανατολή.
8ος – 6ος αιώνας π.Χ.	Μια πλούσια κοινωνία κυριαρχεί. Συμμετέχει στον αποικισμό της Νάξου της Σικελίας (734 π.Χ.). Επιβλητικά και φημισμένα αφιερώματα των Ναξίων, όπως η Σφίγγα στους Δελφούς και οι Λέοντες στη Δήλο, μαρτυρούν την ανάπτυξη της Νάξου και την άνθηση μεγάλη άνθηση της γλυπτικής στο νησί.
480 π.Χ.	Οι Νάξιοι βρίσκονται στο πλευρό των Αθηναίων εναντίον των Περσών, στη ναυμαχία της Σαλαμίνας.
41 π.Χ.	Η Νάξος αποτελεί Ρωμαϊκή Επαρχία.
4ος αιώνας μ.Χ. – 1207	Βυζαντινή Εποχή
1207 – 1566	Λατινοκρατία
1566 – 1821	Τουρκοκρατία
6 Μαΐου 1821	Κήρυξη της Επανάστασης στη Νάξο.
3 Φεβρουαρίου 1830	Η Νάξος, μαζί με τις υπόλοιπες Κυκλάδες, περιλαμβάνεται στο νεοσύστατο ελληνικό κράτος.

Από τη νεολιθική εποχή μέχρι και σήμερα, κάθε νέος πολιτισμός άφησε το στίγμα του στο νησί. Αποτέλεσμα αυτού είναι τα δεκάδες μνημεία που βρίσκονται διάσπαρτα σε όλο το νησί και που διατηρούν τον κάθε πολιτισμό ζωντανό μέχρι και σήμερα (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Φωτογραφίες από τα σημαντικότερα μνημεία της Νάξου, (α) η Πορτάρα, (β) Κυκλαδικά ειδώλια, (γ) ο Κούρος των Εγγαρών, (δ) ο Κούρος του Απόλλωνα, (ε) ο ναός της θεάς Δήμητρας στο Σαγκρί, (στ) βυζαντινή εκκλησία στην Τραγαία, (ζ) ο Πύργος της Αγιάς και (η) θέρετρο των Ιησουϊτών μοναχών στην περιοχή Καλαμίτσια.

2.3 ΧΛΩΡΙΔΑ - ΠΑΝΙΔΑ

Η περιβαλλοντική αξία της Νάξου έχει αναγνωριστεί διεθνώς, και τμήματα του νησιού έχουν συμπεριληφθεί στο ευρωπαϊκό δίκτυο προστατευόμενων περιοχών Natura 2000, ενώ έχουν θεσπιστεί επίσης επτά καταφύγια άγριας ζωής (Εικόνα 2.4).

Όσον αφορά τη χλωρίδα, στη Νάξο συναντώνται πλήρεις βοτανικές οικογένειες (Labiatae, Compositae, Liliacae, Euphorbiaceae, Asteraceae, κτλ.) με αντοχή στις ξηροθερμικές συνθήκες και τον ανταγωνισμό. Επίσης συναντώνται ποικιλίες κηπευτικών, αμπελιών και οπορωφόρων σπάνιας αξίας (Εικόνα 2.5).

Όσον αφορά την πανίδα, στη Νάξο συναντώνται θαλάσσια και χερσαία θηλαστικά, τρωκτικά, νυχτερίδες, αμφίβια, ερπετά και ασπόνδυλα (Εικόνα 2.6).

Από τα θαλάσσια θηλαστικά που απαντώνται στις ελληνικές θάλασσες, εμφανίζονται συχνά στα νερά της Νάξου το ζωνοδέλφινο (Stenella coeruleoalba) και το ρινοδέλφινο (Tursiops truncatus), όταν ακολουθούν μεγάλα κοπάδια ψαριών και μαλακίων στη θαλάσσια ζώνη των ανατολικών Κυκλάδων. Επίσης, στην ανατολική πλευρά του νησιού, οι εμφανίσεις της

μεσογειακής φώκιας (Monachus Monachus) και της μεσογειακής χελώνας (Caretta Caretta) δεν είναι σπάνιες.

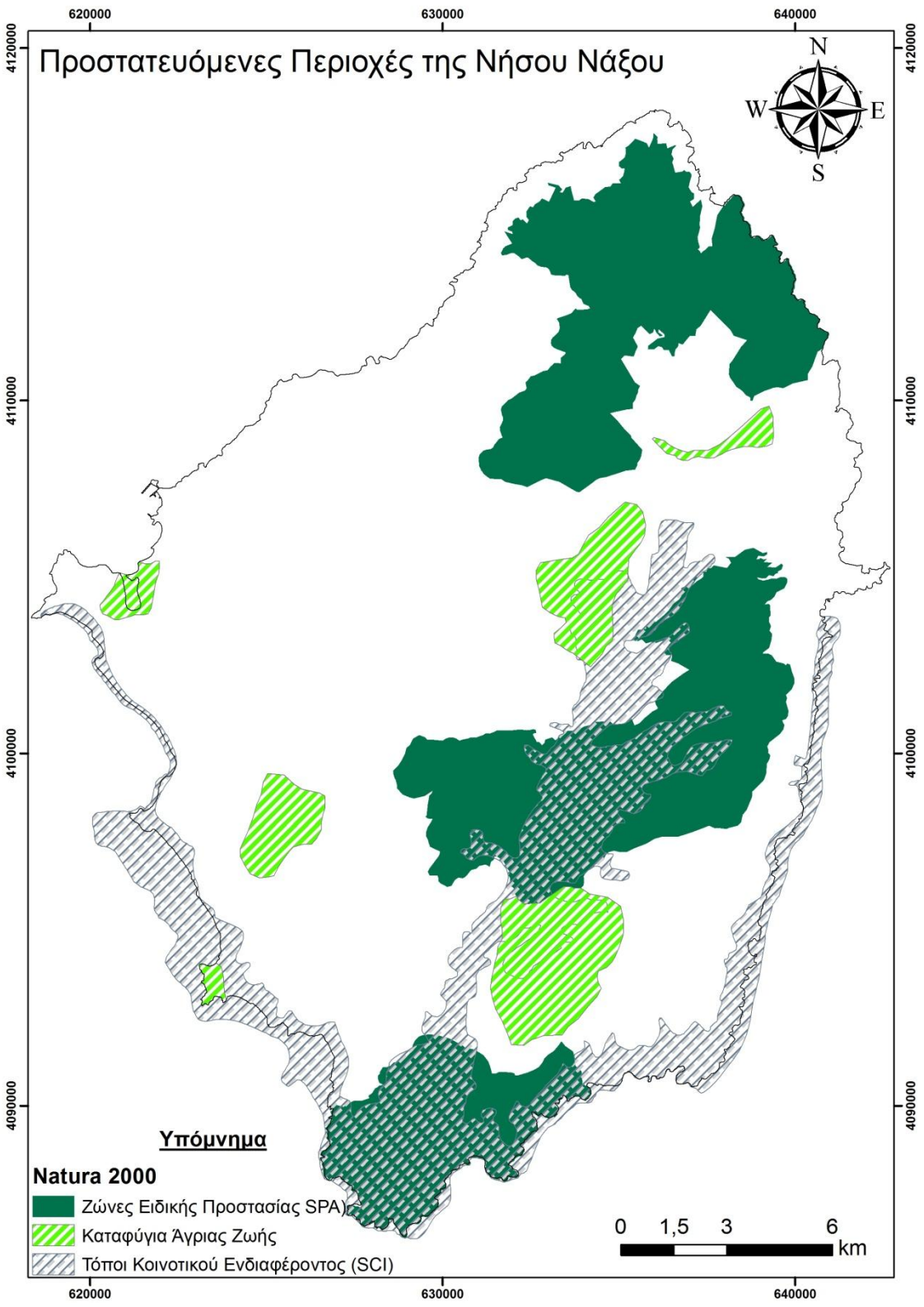
Από τα χερσαία θηλαστικά, ο λαγός (Lepus europaeus), το αγριοκούνελο (Oryctolagus cuniculous), ο σκαντζόχοιρος (Erinaceus europaeus) και το κουνάβι (Martes foina) αποτελούν τα πιο γνωστά και αναγνωρίσιμα άγρια είδη.

Τα τρωκτικά και οι νυχτερίδες που υπάρχουν στο νησί δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς, όπως επίσης και σχεδόν όλα τα ασπόνδυλα (έντομα, αράχνες, σαλιγκάρια, σκουλήκια κ.ά.). Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει όμως με τα αμφίβια και τα ερπετά. Ο πρασινόφρυνος (Bufo viridis) και ο λιμνοβάτραχος (Rana ridibunda), τα δυο αμφίβια της Νάξου, επιβιώνουν συχνά στον ίδιο βιότοπο με την ποταμοχελώνα (Mauremys caspica), τη μοναδική χερσαία χελώνα που ζει σε όλους σχεδόν τους φυσικούς υγροτόπους του νησιού.

Στις σαύρες αναγνωρίζονται το σαμιαμίδι (Hemidactylus turcicus), ο κυρτοδάκτυλος (Cyrtopodion kotschyi), η πρασινόσαυρα (Lacerta trilineata), η αιγαιόσαυρα (Podarcis erhardii) και το κροκοδειλάκι ή κασιδιάρης (Agama stelio). Τα φίδια που έχουν αξιόλογο αριθμό πληθυσμών στο νησί είναι η οχιά (Vipera ammodytes), το νερόφιδο (Natrix natrix), ο τυφλίτης (Eryx jaculus) και ο τυφλίνος (Typhlops vermicularis).

Τέλος, στη Νάξο έχουμε την εμφάνιση πολλών εκατοντάδων ειδών πουλιών, από όρνια (Gyps fulvus) μέχρι κατσουλιέρηδες (Galerida cristata), πολλά από τα οποία είναι σπάνια ή απειλούμενα με εξαφάνιση. Ημερόβια και νυκτόβια αρπακτικά, όπως γύπες, αετοί, γεράκια, κουκουβάγιες και μπούφοι, υδρόβια, όπως ερωδιοί, χήνες και πάπιες, παρυδάτια, όπως σφυριχτές, σκαλίδρες και τρύγγες, θαλασσοπούλια, όπως γλάροι, πέρδικες, σουσουράδες, χελιδόνια, κοτσύφια, τσίχλες, κορακοειδή και τσιχλόνια, μένουν μόνιμα ή επισκέπτονται τακτικότατα το νησί.

Όμως, τα προβλήματα και οι απειλές που αντιμετωπίζει καθημερινά η ναξιακή φύση δεν είναι λίγα. Πολλοί από τους μικρούς υγροτόπους του νησιού συρρικνώνονται και υποβαθμίζονται από τις αποθέσεις μπαζών και απορριμμάτων. Σε αρκετές παραλίες πραγματοποιούνται παράνομες αμμοληψίες, ενώ στους λόφους και στα βουνά συχνά εκδηλώνονται πυρκαγιές. Ακόμη, εκχερσώσεις, διανοίξεις δρόμων αμφιβόλου χρησιμότητας και φαινόμενα αυθαίρετης δόμησης, υπερβόσκησης, παράνομου κυνηγιού και αλιείας διευρύνουν τα προβλήματα.



Εικόνα 2.4: Οι προστατευόμενες περιοχές της νήσου Νάξου (πηγή Ε.Υ.ΓΕ.Π., http://geodata.gov.gr).

(α) (β) (γ)

Εικόνα 2.5: Μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά φυτά της Νάξου, (α) το θυμάρι, (β) η ρίγανη και (γ) η ασπαρτιά (πηγή www.naxos.gr).

(α) (β) (γ)

Εικόνα 2.6: Μερικοί αντιπρόσωποι της ναξιακής πανίδας, (α) η νυφίτσα, (β) η σαύρα και (γ) ο μελισσοφάγος (πηγή www.naxos.gr).

2.4 ΔΗΜΟΓΡΑΦΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τη Νέα Αρχιτεκτονική της Αυτοδιοίκησης και της Αποκεντρωμένης Διοίκησης, δηλαδή το πρόγραμμα «Καλλικράτης», το οποίο εφαρμόστηκε πλήρως από την 1η Ιανουαρίου 2011, η Νάξος, μαζί με τη Δονούσα, τη Σχοινούσα, τα Κουφονήσια και την Ηράκλεια, ανήκουν στο Δήμο Νάξου και Μικρών Κυκλάδων της Περιφερειακής Ενότητας Νάξου, η οποία ανήκει με τη σειρά της στην Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου (Εικόνα 2.7).

Από τα στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ για την τελευταία απογραφή του πληθυσμού της χώρας, η οποία διεξάχθηκε το Μάιο του 2011, ο συνολικός πραγματικός πληθυσμός του δήμου Νάξου ανέρχεται σε 19.440 άτομα, από τα οποία τα 9.770 είναι άντρες και τα 9.670 είναι γυναίκες. Ταυτόχρονα η πυκνότητα του μόνιμου πληθυσμού του δήμου ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ισούται με 39,2. Αυτό σημαίνει θεωρητικά ότι σε κάθε τετραγωνικό χιλιόμετρο του νησιού ζουν περίπου 39 μόνιμοι κάτοικοι.

Εικόνα 2.7: Η Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου (πηγή el.wikipedia.org).

Σύμφωνα με τα πληθυσμιακά στοιχεία από το 1951 μέχρι το 2011 (Πίνακας 2.2), προκύπτει ότι μέχρι και το 1981, ο συνολικός πραγματικός πληθυσμός του νησιού μειωνόταν σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, για την περίοδο 1951-1981, παρατηρήθηκε 20% μείωση του πραγματικού πληθυσμού, ενώ την ίδια χρονική περίοδο τα χωριά Σίφωνες, Ακάδημοι, Καλόξυλος, Κεραμείον, Χείμαρρος και Τσικαλαρείο εγκαταλείφθηκαν εντελώς και έπαψαν να υφίστανται.

Ακόμη, στο διάστημα αυτό ο πληθυσμός της πρωτεύουσας του νησιού αυξήθηκε από 2.547 άτομα το 1951 σε 4.442 το 1991, αύξηση κατά 74,4% σε σχέση με τη μείωση κατά 35,2% του αγροτικού πληθυσμού στο ίδιο διάστημα και 20,2% του συνολικού αριθμού κατοίκων του νησιού. Ο πληθυσμός της πρωτεύουσας αποτελούσε το 13,7% του συνολικού πληθυσμού του νησιού το 1951, αλλά έφτασε το 1991 στο 29,9% (Πλάκα, 2006).

Άξιο παρατήρησης αποτελεί και το γεγονός ότι ενώ κατά το διάστημα 1961-1971 εμφανίζουν μείωση όλες οι κοινότητες ανεξαιρέτως, ο Δήμος Νάξου παρουσιάζει αύξηση. Σύμφωνα ωστόσο, με την απογραφή του 1991, παρατηρείται αναστροφή της μειωτικής πορείας του μεγέθους του πληθυσμού εκτός του Δήμου Νάξου και σε 11 κοινότητες, ενώ μείωση παρατηρείται σε 10. Τη μεγαλύτερη αύξηση μεταξύ των ετών 1981-1991, ακόμα και από αυτή του Δήμου Νάξου, εμφανίζει η Κόρωνος (31,7%), ενώ τη μεγαλύτερη μείωση εμφανίζει η Κορωνίδα (-17,3%). Ωστόσο, παρά την εμφανιζόμενη αύξηση του πληθυσμού ορισμένων Κοινοτήτων την περίοδο 1981-1991, ουσιαστικά παρουσιάζεται πλήρης ανατροπή της

πυραμίδας των ηλικιών και σημαντικότατη μείωση των νέων και παιδιών. Ο αριθμός των μαθητών στις Κοινότητες της ορεινής Νάξου παρουσίασε μείωση κατά 80%, με αποτέλεσμα την περίοδο 1981-97 σταμάτησαν να λειτουργούν τα Δημοτικά Σχολεία κάποιων ορεινών κυρίως Κοινοτήτων (Πλάκα, 2006).

Αντίθετα από το 1991 μέχρι και το 2011 ο πραγματικός πληθυσμός του νησιού αυξήθηκε σημαντικά, με τη σημαντικότερη αύξηση να παρατηρείται το 2001. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση του πληθυσμού του νησιού για το 2011 δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς, καθώς το σύνολο πληθυσμού που αναγράφεται, αναφέρεται στο Δήμο Νάξου και Μικρών Κυκλάδων.

Πίνακας 2.2: Δημογραφικά στοιχεία της νήσου Νάξου (πηγή ΕΛ.ΣΤΑΤ).

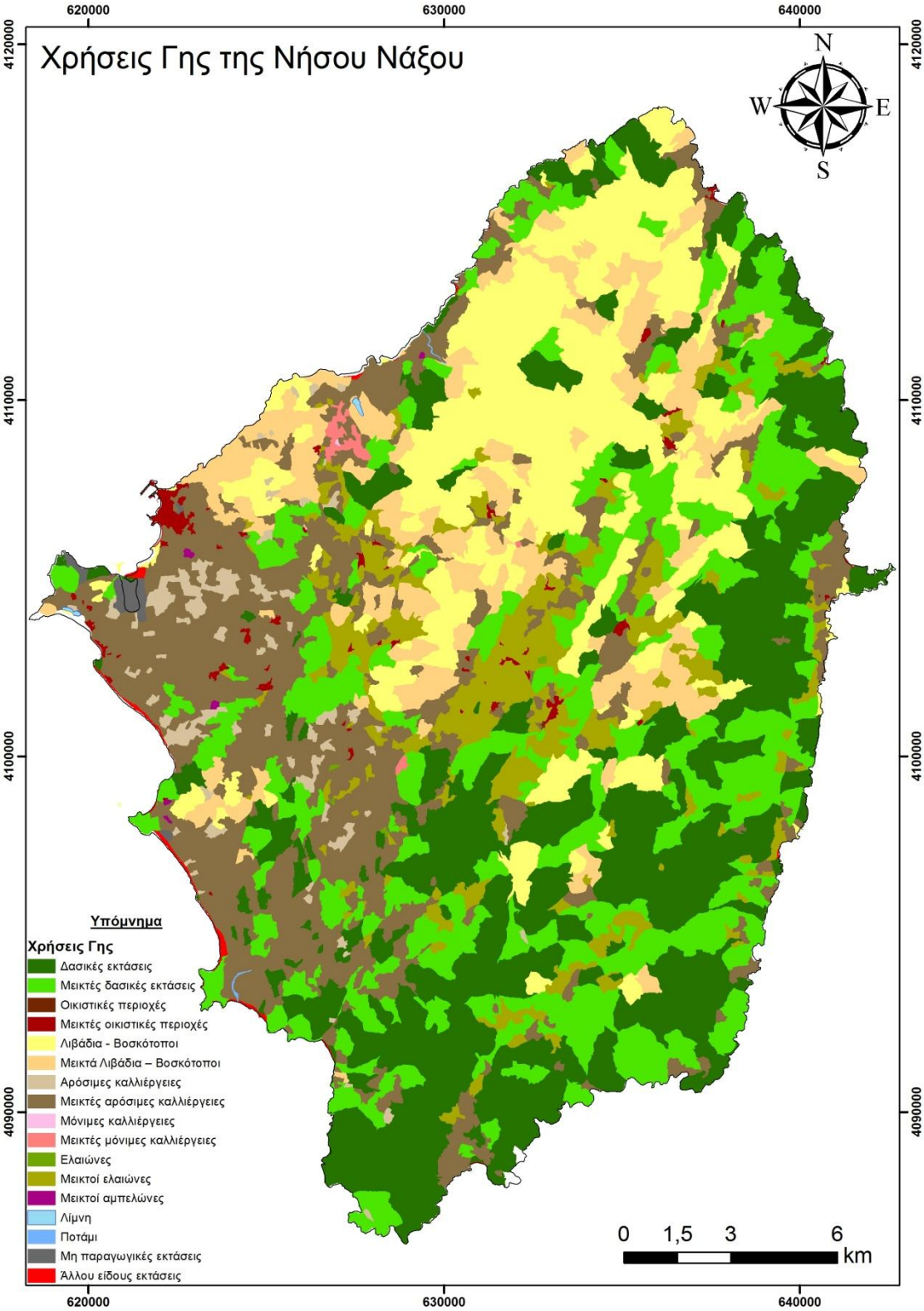
Έτος Απογραφής	Σύνολο Πληθυσμού
1951	18.593
1961	16.703
1971	14.201
1981	14.037
1991	14,838
2001	18.188
2011	19.440

Συγχρόνως, σύμφωνα με στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ, διακυμάνσεις υπήρχαν και στον εποχικό πληθυσμό του νησιού, ο οποίος αντικατοπτρίζει κυρίως την τουριστική προσέλευση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Έτσι, μέχρι και το 1991, παρατηρήθηκε αύξηση του εποχικού πληθυσμού στο νησί, ενώ από το 1998 μέχρι και το 2004, υπήρξε έντονη μείωσή του.

2.5 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

Η κατανομή των χρήσεων γης εξαρτάται άμεσα από τη μορφολογία του νησιού. Περίπου το 25% της συνολικής έκτασης του νησιού είναι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οι οποίες βρίσκονται στην πλειοψηφία τους στα δυτικά πεδινά τμήματα. Το υπόλοιπο της έκτασης καλύπτεται από δασικές και θαμνώδεις εκτάσεις, ενώ οι βοσκότοποι είναι διάσπαρτοι και μη οργανωμένοι (Πλάκα, 2006). Επιπλέον, οι χρήσεις γης επηρεάζουν άμεσα την κατείσδυση, για αυτό ο σαφής καθορισμός τους είναι καθοριστικός για το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του προγράμματος ILOTING για την κάλυψη γης του Υπουργείου Γεωργίας, οι χρήσεις γης στη νήσο Νάξο είναι εμφανείς στο χάρτη της Εικόνας 2.8 και αναλύονται ως προς την έκτασή τους στον Πίνακα 2.3.



Εικόνα 2.8: Χάρτης χρήσεων γης της νήσου Νάξου (πηγή: Υπουργείο Γεωργίας).

Πίνακας 2.3: Κατανομή χρήσεων γης στη νήσο Νάξο.

ILOTS	Περιγραφή	Έκταση (km^2)	Ποσοστό έκτασης (%)
10	Δασικές εκτάσεις	108,64	25,36
11	Μεικτές δασικές εκτάσεις	85,57	19,97
20	Οικιστικές περιοχές	0,22	0,05
21	Μεικτές οικιστικές περιοχές	2,59	0,6
30	Λιβάδια – βοσκότοποι	68,94	16
31	Μεικτά λιβάδια - βοσκότοποι	38,53	9
40	Αρόσιμες καλλιέργειες	6,29	1,47
41	Μεικτές αρόσιμες καλλιέργειες	83,02	19,37
50	Μόνιμες καλλιέργειες	0,02	0,01
51	Μεικτές μόνιμες καλλιέργειες	0,99	0,23
52	Ελαιώνες	0,2	0,05
53	Μεικτοί ελαιώνες	30,86	7,2
55	Μεικτοί αμπελώνες	0,19	0,04
60	Λίμνη	0,12	0,03
61	Ποτάμι	0,1	0,02
70	Μη παραγωγικές εκτάσεις	1,21	0,28
90	Άλλου είδους εκτάσεις	0,99	0,23

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.3, το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης της Νάξου καταλαμβάνουν οι δασικές εκτάσεις, οι μεικτές δασικές εκτάσεις και οι μεικτές αρόσιμες καλλιέργειες. Οι μη παραγωγικές εκτάσεις αναφέρονται στον υδροβιότοπο της Νάξου που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το αεροδρόμιο του νησιού, ενώ οι άλλου είδους εκτάσεις αναφέρονται σε περιοχές όπου λαμβάνει μέρος βιομηχανική ή τουριστική δραστηριότητα.

Εκτάσεις με βιομηχανική δραστηριότητα αποτελούν τα λατομεία μαρμάρου που λειτουργούν στην Απείρανθο, στο Φιλότι, στον Κινίδαρο, στις Σανιδάδες και στην Κόρωνο, καθώς και τα ορυχεία της σμύριδας στο βορειοανατολικό τμήμα της Νάξου, στην περιφέρεια των οικισμών Κορώνου και Απειράνθου.

Από την άλλη πλευρά, εκτάσεις με έντονη τουριστική δραστηριότητα εμφανίζονται ιδιαίτερα στην παράκτια ζώνη της Νάξου και κυρίως στα νοτιοδυτικά, όπου βρίσκονται και οι δημοφιλέστερες παραλίες του νησιού, εξαιτίας του μεγάλου πλάτους τους και του μεγάλου πάχους της άμμου. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις στο περιβάλλον της Νάξου είναι σχετικά περιορισμένες, συγκρινόμενες με άλλα αντίστοιχου τουρισμού νησιά.

2.6 Οι Υδατικοι Ποροι της Νησου Ναξου

Γενικά, η έννοια των υδατικών πόρων προκύπτει από τη σχέση ανάμεσα στις υδατικές απαιτήσεις, για τις διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, εκφρασμένες με τον όρο υδατικές ανάγκες και στην ύπαρξη ή ανεύρεση, μέσα στο φυσικό περιβάλλον, ροής και αποθεμάτων, σχετικώς εύκολων για εκμετάλλευση, για την ικανοποίηση των αναγκών. Με μια άλλη έννοια, οι υδατικοί πόροι μπορούν να χαρακτηριστούν ως ένα δυναμικό υδατικής προσφοράς από το περιβάλλον. Οι υδατικοί πόροι μπορούν να υποδιαιρεθούν στις εξής κατηγορίες (Στουρνάρας κ.α., 2011):

- Σε σχέση με τη θεώρησή τους ως ροή ή ως απόθεμα σε ανανεώσιμους ή δυναμικούς (ροή) ή σε μη ανανεώσιμους (απόθεμα).
- Σε σχέση με τη φυσική κατάσταση στο περιβάλλον σε επιφανειακούς ή υπόγειους.
- Σε σχέση με την πρακτική δυνατότητα αξιοποιήσεως ή αναρρυθμίσεώς τους σε φυσικούς ή δυνητικούς ή σε ερευνήσιμους.

Στη Νάξο, οι υδατικοί πόροι είναι περιορισμένοι, με αποτέλεσμα η εξασφάλιση νερού για τις υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες του νησιού να είναι δύσκολη. Το γεγονός αυτό συνέβαινε ανέκαθεν, αν και έχει παρατηρηθεί ότι λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους και του ορεινού όγκου του νησιού, η κατάστασή της όσον αφορά το νερό είναι καλύτερη από τα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων.

Δεδομένου ότι η Νάξος έχει έκταση περίπου 430 km^2 και μέση ετήσια βροχόπτωση 350 mm, η συνολική ποσότητα που δέχεται σε νερό βροχής είναι περίπου 150,5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Όμως τα επιφανειακά νερά είναι διαθέσιμα μόνο λίγες μέρες μετά τις έντονες βροχοπτώσεις του χειμώνα και οι ανάγκες σε νερό εξασφαλίζονται κυρίως από τα υπόγεια νερά. Τα υπόγεια όμως αποθέματα νερού είναι περιορισμένα, λόγω φυσικών αιτιών, και έχουν περιορισθεί περισσότερο τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω των ανθρωπογενών επεμβάσεων στο εύθραυστο οικοσύστημα του νησιού. Συγχρόνως, ενώ η ποσότητα του νερού από τις βροχοπτώσεις συνεχώς παραμένει σταθερή, η ανάπτυξη της Νάξου απαιτεί όλο και περισσότερες ποσότητες νερού, λόγω της αύξησης του μόνιμου πληθυσμού, αλλά κυρίως λόγω της ραγδαίας αύξησης του εποχικού πληθυσμού κατά την καλοκαιρινή περίοδο, όπου αυξάνεται η ζήτηση νερού για την ύδρευση και την άρδευση του νησιού (Κοντοπίδης, 2003, Προμπονά, 2006, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Έτσι, οι αιτίες περιορισμού των υπόγειων αποθεμάτων του νησιού, μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς. Στις φυσικές αιτίες περιορισμού των υπόγειων αποθεμάτων νερού περιλαμβάνονται:

- Η χαμηλή ετήσια βροχόπτωση.
- Η μικρή υδροχωρητικότητα των πετρωμάτων και το μικρό μέγεθος του νησιού που περιορίζουν το μέγεθος των υδροφόρων οριζόντων.
- Ο ορεινός χαρακτήρας της νήσου (μεγάλες μορφολογικές κλίσεις), στον οποίο οφείλεται η επικράτηση της επιφανειακής απορροής έναντι της κατείσδυσης.
- Το είδος των βροχοπτώσεων (καταιγίδες συνήθως) και η χαμηλή φυτοκάλυψη που διευκολύνουν επίσης τη γρήγορη επιφανειακή απορροή προς τη θάλασσα.
- Οι υψηλές θερμοκρασίες, η μεγάλη ηλιοφάνεια και οι δυνατοί βόρειοι άνεμοι που επικρατούν και επιταχύνουν την εξατμισιδιαπνοή.
- Οι ανοιχτές προσχωσιγενείς κοιλάδες και οι υδροφόροι ορίζοντές τους προς τη θάλασσα.

Συγχρόνως, στις ανθρωπογενείς αιτίες περιλαμβάνονται:

- Η υπερυλοτόμηση των δασικών εκτάσεων και η υπερβόσκηση, οι οποίες έχουν ελαττώσει δραματικά τη φυτοκάλυψη του νησιού.
- Η εγκατάλειψη των αναβαθμίδων καλλιέργειας στα ορεινά και στα ημιορεινά του νησιού.
- Η εγκατάλειψη παραδοσιακών τρόπων συλλογής βρόχινου ύδατος (ομβροδεξαμενές).
- Η αύξηση των αναγκών σε ύδρευση (λόγω της ανόδου του βιοτικού και καταναλωτικού επιπέδου και της αύξησης του μόνιμου και εποχικού πληθυσμού) και σε άρδευση (λόγω της εντατικοποίησης των καλλιεργειών και ιδιαίτερα του πατατόσπορου και των κτηνοτροφικών σιτηρών).
- Οι απώλειες μέσω των δικτύων ύδρευσης (πάνω από 30%).
- Η ρύπανση των υδροφόρων οριζόντων στις κατοικημένες περιοχές, λόγω της καθυστερημένης εγκατάστασης συστημάτων αποχέτευσης ή της κακής συντήρησής τους, και στις γεωργοκτηνοτροφικές περιοχές.
- Η μείωση της στάθμης ή και εξάντληση των υπόγειων υδροφόρων αποθεμάτων, εξαιτίας μη προγραμματισμένων σωστά ή παράνομων γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη.
- Η υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων με αποτέλεσμα την υφαλμύρινσή τους.

- Η απουσία πολιτικής πρόβλεψης και πρόβλεψης των επιπτώσεων από την αυξανόμενη ζήτηση ύδατος.
- Η απουσία ολοκληρωμένου σχεδιασμού ανά περιφέρεια που οφείλεται στην ελλιπή υλοποίηση του νομοθετικού πλαισίου.
- Ο έντονος κατακερματισμός των προσπαθειών επίλυσης του προβλήματος και τελικά το μεγάλο κόστος των απαιτούμενων συνολικά παρεμβάσεων.

Έτσι από το 1980 και μετά ξεκίνησε μια σειρά ενεργειών για την αντιμετώπιση του προβλήματος των υπόγειων αποθεμάτων, στις οποίες περιλαμβάνονται η κατασκευή φραγμάτων ανάσχεσης της χειμαρρικής ροής στην Απείρανθο, η διάνοιξη πολυάριθμων γεωτρήσεων και η διενέργεια ερευνητικών γεωτρήσεων και χημικών αναλύσεων από το Ι.Γ.Μ.Ε. και το Υπουργείο Γεωργίας, η κατασκευή της λιμνοδεξαμενής των Εγγαρών, η κατασκευή του φράγματος της Φανερωμένης και η μελέτη κατασκευής του φράγματος του Παρατρέχου στην περιοχή Τσικαλαριό. Η λιμνοδεξαμενή των Εγγαρών έχει χωρητικότητα 600.000 m^3 και αρδεύονται 2.000 στρέμματα, ενώ από τη κατασκευή του φράγματος στη Φανερωμένη, δημιουργήθηκε λίμνη κατάκλυσης με χωρητικότητα 1.450.000 m^3 από την οποία αρδεύονται 2.000 στρέμματα και υδρεύονται αρκετοί οικισμοί (Εικόνα 2.9). Η τρίτη λιμνοδεξαμενή που σχεδιάζεται στο Τσικαλαριό αναμένεται να έχει χωρητικότητα 3.000.000 m^3 και θα αρδεύονται περίπου 2.200 στρέμματα, ενώ το νερό της θα χρησιμοποιηθεί και για ύδρευση.

(α) (β)

Εικόνα 2.9: Φωτογραφίες από (α) τη λιμνοδεξαμενή των Εγγαρών και (β) το φράγμα της Φανερωμένης.

Κεφάλαιο 3^{ο} - Κλίμα

3. ΚΛΙΜΑ

3.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

Η Ελλάδα, σε όλες τις κλιματικές ταξινομήσεις, καταχωρείται στο μεσογειακό τύπο κλίματος και πιο συγκεκριμένα, εντάσσεται στις μέτριες εύκρατες έως υποτροπικές ζώνες του τύπου αυτού (Μάρκου-Ιακωβάκου, 1979). Τα κύρια χαρακτηριστικά του θέρους και του χειμώνα είναι τόσο σαφή και καθορισμένα στη Μεσόγειο, ώστε ο όρος "μεσογειακό κλίμα" χρησιμοποιείται ευρέως για τον καθορισμό αυτού του τύπου κλίματος, σε οποιοδήποτε σημείο στη γη (Νικολάκης, 1985). Γενικά, τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του καιρού στη Μεσόγειο είναι οι ήπιοι, βροχεροί με ισχυρούς ανέμους χειμώνες και τα θερμά, ξηρά και χωρίς ισχυρούς ανέμους καλοκαίρια. Η εναλλαγή μεταξύ σειρών ημερών με χαρακτηριστικά θέρους και σειρών ημερών με χαρακτηριστικά χειμώνα είναι συχνή, ενώ στις βορειότερες περιοχές ο χειμώνας συχνά καθίσταται δριμύς με συχνές ψυχρές εισβολές. Η άνοιξη είναι κλιματικά μια μεταβατική ασταθής περίοδος με συχνή εναλλαγή ημερών με χαρακτηριστικά χειμώνα και ημερών με χαρακτηριστικά θέρους, ενώ το φθινόπωρο είναι συνήθως μικρής χρονικής διάρκειας και η δε μετάβαση στο χειμώνα γίνεται συνήθως σταθερά και μόνιμα (Ζαμπάκας, 1981). Ειδικότερα για την περίπτωση της Ελλάδας, η ψυχρή και βροχερή περίοδος διαρκεί από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάρτιο και η θερμή και άνομβρη περίοδος από τον Απρίλιο μέχρι και τον Σεπτέμβριο.

Βασικός παράγοντας που καθορίζει τη μετάβαση από το θερμό και ξηρό θέρος στον ψυχρότερο και υγρό χειμώνα είναι οι θέσεις του υποτροπικού και του πολικού αεροχείμαρρου. Κατά το θέρος ο υποτροπικός αεροχείμαρρος βρίσκεται βορειότερα των 40° γεωγραφικό πλάτος. Αποτέλεσμα είναι η μετατόπιση βορειότερα (νοτιότερα για την περίπτωση του νοτίου ημισφαιρίου) των μόνιμων θαλάσσιων αντικυκλώνων του Ειρηνικού και του Ατλαντικού Ωκεανού και η απουσία υφέσεων από τη ζώνη στην οποία επικρατεί το Μεσογειακό κλίμα. Ειδικά για την περίπτωση της Ελλάδας, κατά το θέρος, λόγω της επικράτησης των ετησίων ανέμων μεταφέρονται ηπειρωτικές πολικές αέριες μάζες (cP) οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρή περιεκτικότητα σε υδρατμούς. Αντίθετα, κατά το χειμώνα, λόγω της προς τον ισημερινό μετατόπισης του πολικού αεροχείμαρρου, οι περιοχές αυτές βρίσκονται υπό την επίδραση της δυτικής κυκλοφορίας και επηρεάζονται συχνά από υφέσεις ενώ σπανιότερες είναι οι εισβολές τροποποιημένων πολικών αερίων μαζών (Καραλής, 1969).

Όσον αφορά τη θερμοκρασία αέρος αυτή αυξάνεται κατά το θέρος καθώς κινούμαστε από τα παράλια προς τα ηπειρωτικά. Αιτία της παραπάνω διανομής της θερμοκρασίας στα

Μεσογειακά κλίματα είναι η πνοή των θαλασσίων αυρών που μεταφέροντας κατά τη διάρκεια της ημέρας δροσερότερες θαλάσσιες αέριες μάζες στα παράλια μετριάζουν τις μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στα παράλια συγκριτικά με την ενδοχώρα κατά το θέρος οφείλονται και στα ψυχρά θαλάσσια ρεύματα που διέρχονται κατά μήκος των ακτών. Ειδικότερα στα παράλια της Μεσογείου οι θερινές θερμοκρασίες είναι λίγο υψηλότερες λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών των υδάτων της Μεσογείου καθώς και την απουσία ψυχρών θαλασσίων ρευμάτων. Η αντίστροφη εικόνα επικρατεί κατά το χειμώνα εποχή κατά την οποία οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες στα ηπειρωτικά σε σχέση με τα παράλια. Αυτό οφείλεται στο ότι τα παράλια δέχονται εντονότερα την επίδραση θαλασσίων αερίων μαζών που λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του ύδατος κατά το χειμώνα είναι θερμότερες των αντίστοιχων ηπειρωτικών. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος είναι μεγαλύτερο στην ενδοχώρα σε σύγκριση με τις παράλιες περιοχές (Καψωμενάκης, 2009).

Το μέσο ετήσιο ύψος του υετού στα Μεσογειακά κλίματα κυμαίνεται μεταξύ 350 mm και 900 mm ανάλογα με το είδος του κλίματος που επικρατεί. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι ο υετός αυξάνεται καθώς κινούμαστε από νότο, όπου τα ύψη είναι παραπλήσια των υψών υετού που κατακρημνίζεται στις ημιερημικές περιοχές. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ύψη του υετού που κατακρημνίζονται στις ορεινές περιοχές κατά κανόνα είναι πολύ μεγαλύτερα, χωρίς ωστόσο να αποτρέπεται η θερινή ξηρασία. Στην Ελλάδα για παράδειγμα, η βροχόπτωση σε πολλές ορεινές περιοχές ξεπερνά ακόμα και τα 2000 mm. Βασική αιτία εκδήλωσης των χειμερινών βροχοπτώσεων είναι η διέλευση υφέσεων οι οποίες μεταφέρουν στις περιοχές αυτές υγρές θαλάσσιες αέριες μάζες. Αντίθετα με το χειμώνα κατά το θέρος στις περιοχές που επικρατεί το Μεσογειακό Κλίμα το ύψος του υετού παίρνει πολύ μικρές τιμές. Οι θερινές βροχοπτώσεις κατά κανόνα εκδηλώνονται με τη μορφή θερμικών καταιγίδων μεγάλης ραγδαιότητας αλλά μικρής χρονικής διάρκειας (Καψωμενάκης, 2009).

Ανάλογα με την συχνότητα με την οποία επιδρούν οι διάφορες αέριες μάζες στις περιοχές που επικρατεί ο Μεσογειακός τύπος κλίματος, την απόσταση των περιοχών από τη θάλασσα καθώς και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εμφανίζονται διαφορές μεταξύ των Μεσογειακών κλιμάτων. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορες υποδιαιρέσεις του Μεσογειακού Κλίματος. Σύμφωνα με την επικρατέστερη αυτών, διακρίνονται τέσσερεις υποδιαιρέσεις του Μεσογειακού Κλίματος. Το Ωκεάνιο ή Πορτογαλικό, το Ελληνικό ή Ηπειρωτικό, το Συριακό και το Μεσογειακό Κλίμα των Ετησίων Ανέμων. Από τις συγκεκριμένες κλιματικές υποδιαιρέσεις του Μεσογειακού Κλίματος το Ωκεάνιο ή

Πορτογαλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από ηπίους χειμώνες σχετικά δροσερά καλοκαίρια και επομένως μικρό ετήσιο θερμοκρασιακό αλλά και ημερήσιο εύρος καθώς και σχετικά περιορισμένη θερινή ξηρασία, μοιάζει με το κλίμα που επικρατεί στα Ιόνια νησιά αλλά και στις εγγύς προς το Ιόνιο περιοχές της Δυτικής Ελλάδας. Συγκρινόμενο με το Ωκεάνιο ή Πορτογαλικό το Ελληνικό ή Ηπειρωτικό Μεσογειακό Κλίμα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο ετήσιο και ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος και εντονότερη ξηρασία κατά το θέρος. Η συγκεκριμένη κλιματική υποδιαίρεση του Μεσογειακού Κλίματος μεταξύ άλλων περιοχών απαντάται στην Ανατολική Ελλάδα και μια στενή λωρίδα της Θράκης. Τέλος το Μεσογειακό Κλίμα των Ετησίων Ανέμων, το οποίο χαρακτηρίζεται από τους ισχυρούς περιοδικούς ανέμους που πνέουν από τον Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο μεταφέροντας δροσερές και ξηρές αέριες και μετριάζουν το θερινό καύσωνα, επικρατεί κυρίως στα νησιά του Αιγαίου καθώς και σε κάποιες παράλιες περιοχές στις οποίες οι ένταση των ετησίων ανέμων αγγίζει (κατά τη διάρκεια της ημέρας) τα όρια της θύελλας (Repapis et al., 1977, Καψωμενάκης, 2009).

3.2 ΤΟ ΚΛΙΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Το φυσικό κλίμα της Ελλάδας διαμορφώνεται από τη γεωγραφική θέση, την ηλιακή ακτινοβολία, τη γενική κυκλοφορία, τους τύπους των αέριων μαζών που επικρατούν κατά τις διάφορες εποχές του έτους, και τους τοπικούς ανέμους.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το γεωγραφικό παράγοντα η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από εντονότατο οριζόντιο και κατακόρυφο διαμελισμό. Εν γένει είναι χώρα ορεινή και η σημαντικότερη οροσειρά που την διατρέχει από ΒΒΔ προς ΝΝΑ είναι η οροσειρά της Πίνδου η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως προέκταση των Δειναρικών Άλπεων και συμβάλει όπως θα αναπτυχθεί αναλυτικά παρακάτω στις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες που επικρατούν μεταξύ της δυτικής και τις ανατολικής Ελλάδας. Βασική επίδραση στο κλίμα ιδιαίτερα των νήσων του νοτίου Αιγαίου παίζουν και τα ορεινά της Κρήτης που φτάνουν σε ύψος μέχρι 2500 m αλλά και η οροσειρά της Ροδόπης στο κλίμα κυρίως της Θράκης. Μεταξύ των ορέων σχηματίζονται κοιλάδες βασικότερη των οποίων είναι η κοιλάδα του Αξιού η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος περιοχών της Κεντρικής Μακεδονίας με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα την πόλη της Θεσσαλονίκης. Οι θάλασσες της Ελλάδας είναι διάσπαρτες νήσων κυρίως στο Αιγαίο Πέλαγος οι περισσότερες των οποίων είναι μικρές σε έκταση.

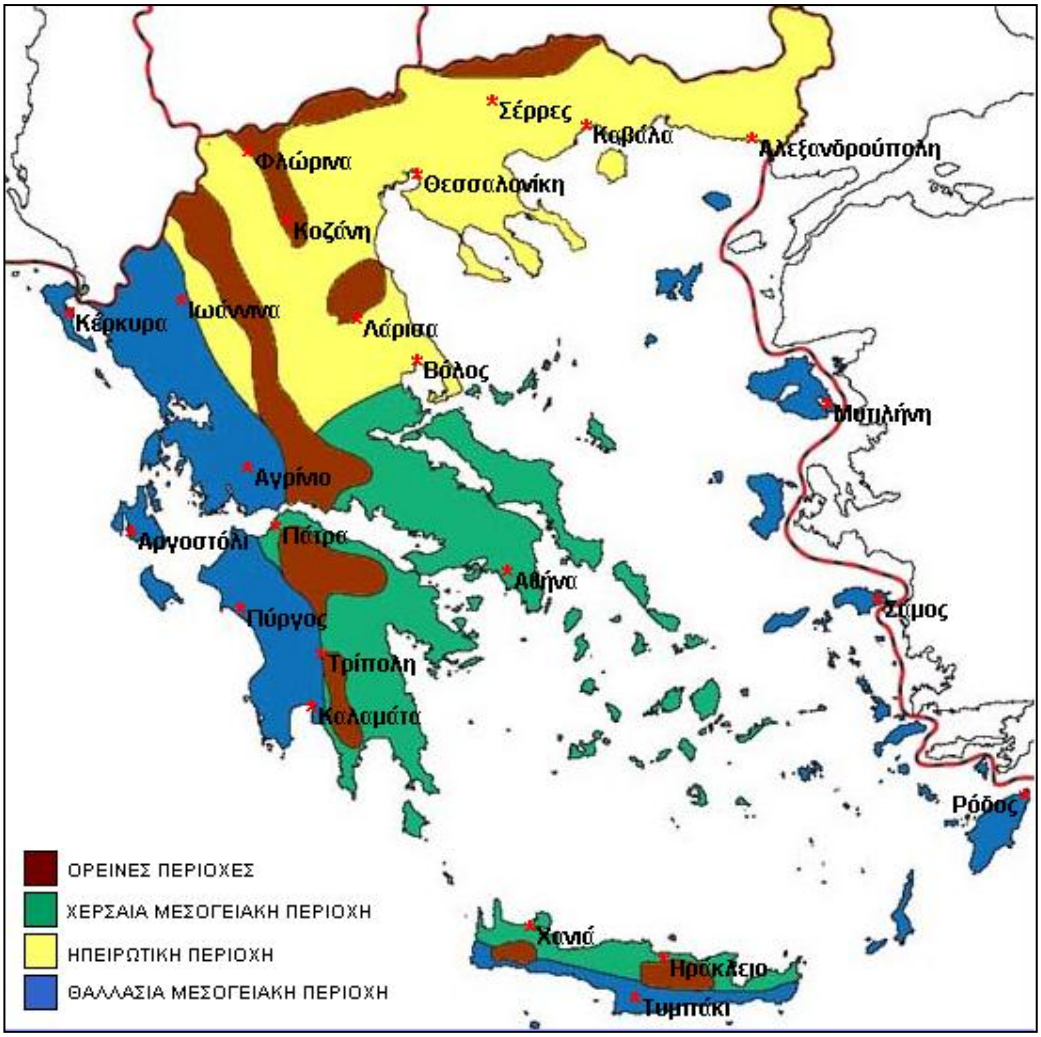
Λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό παράγοντα, διαμορφώνονται σε γενικές γραμμές τέσσερις κλιματικοί τύποι στον ελλαδικό χώρο (Εικόνα 3.1), οι οποίοι αποδίδονται κυρίως στη διαφοροποίηση των κλιματικών χαρακτηριστικών με την αλλαγή του γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Οι κλιματικοί αυτοί είναι (Μαριολόπουλος, 1938, 1982, Νικολάκης, 2002, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011):

- Ο θαλάσσιος μεσογειακός τύπος, με ευχάριστα χαρακτηριστικά εύκρατου κλίματος, στα δυτικά παράλια της Ελλάδος και στα Ιόνια Νησιά.
- Ο χερσαίος μεσογειακός τύπος, που περιλαμβάνει τη ΝΑ Ελλάδα, μέρος της Στερεάς, τμήματα της ανατολικής Πελοποννήσου, τα νησιά και τα παράλια του κεντρικού Αιγαίου και της Κρήτης, με ξηρότερα καλοκαίρια και ψυχρότερους χειμώνες από τα αντίστοιχα πλάτη του Ιονίου.
- Ο ηπειρωτικός τύπος, στο μεγαλύτερο τμήμα της Θράκης, της Μακεδονίας και της Ηπείρου και σε μέρος της Θεσσαλίας, ο οποίος παρουσιάζει χαρακτηριστικά ηπειρωτικού κλίματος των βορειότερων βαλκανικών περιοχών.
- Ο ορεινός τύπος, που περιλαμβάνει τους ορεινούς όγκους που διασχίζουν την Ελλάδα. Στους ορεινούς αυτούς όγκους υπάρχουν δασώδεις περιοχές με κλίμα δάσους, καθώς και μικρές περιοχές μεγάλου υψομέτρου με αλπικό κλίμα κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, τα νησιά του Β. Αιγαίου παρουσιάζουν μεταβατικό τύπο ηπειρωτικού κλίματος προς χερσαίο και τα Δωδεκάνησα παρουσιάζουν εύκρατο θαλάσσιο τύπο.

Επιπλέον, όσον αφορά τους υπόλοιπους παράγοντες διαμόρφωσης του κλίματος, η ηλιακή ακτινοβολία είναι η πιο σημαντική, καθώς καθορίζει το ενεργειακό ισοζύγιο. Η ετήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στον ελληνικό χώρο είναι 140 kcal/cm^{-2} περίπου, ενώ η ετήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται από νότο (160 kcal/cm^{-2}) προς βορρά (120 έως 140 kcal/cm^{-2}). Ανεξάρτητα όμως του γεωγραφικού πλάτους, η ολική ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως το υψόμετρο, η μέση νεφοκάλυψη, ο υετός, η υγρασία και γενικότερα οι παράγοντες που επηρεάζουν το οπτικό βάθος της ατμόσφαιρας.

Τέλος, τονίζεται ότι η εντονότερη κυκλοφοριακή δράση το χειμώνα σε σύγκριση με το καλοκαίρι οφείλεται στο γεγονός ότι η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία κατά γεωγραφικό πλάτος παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές κατά το χειμώνα.



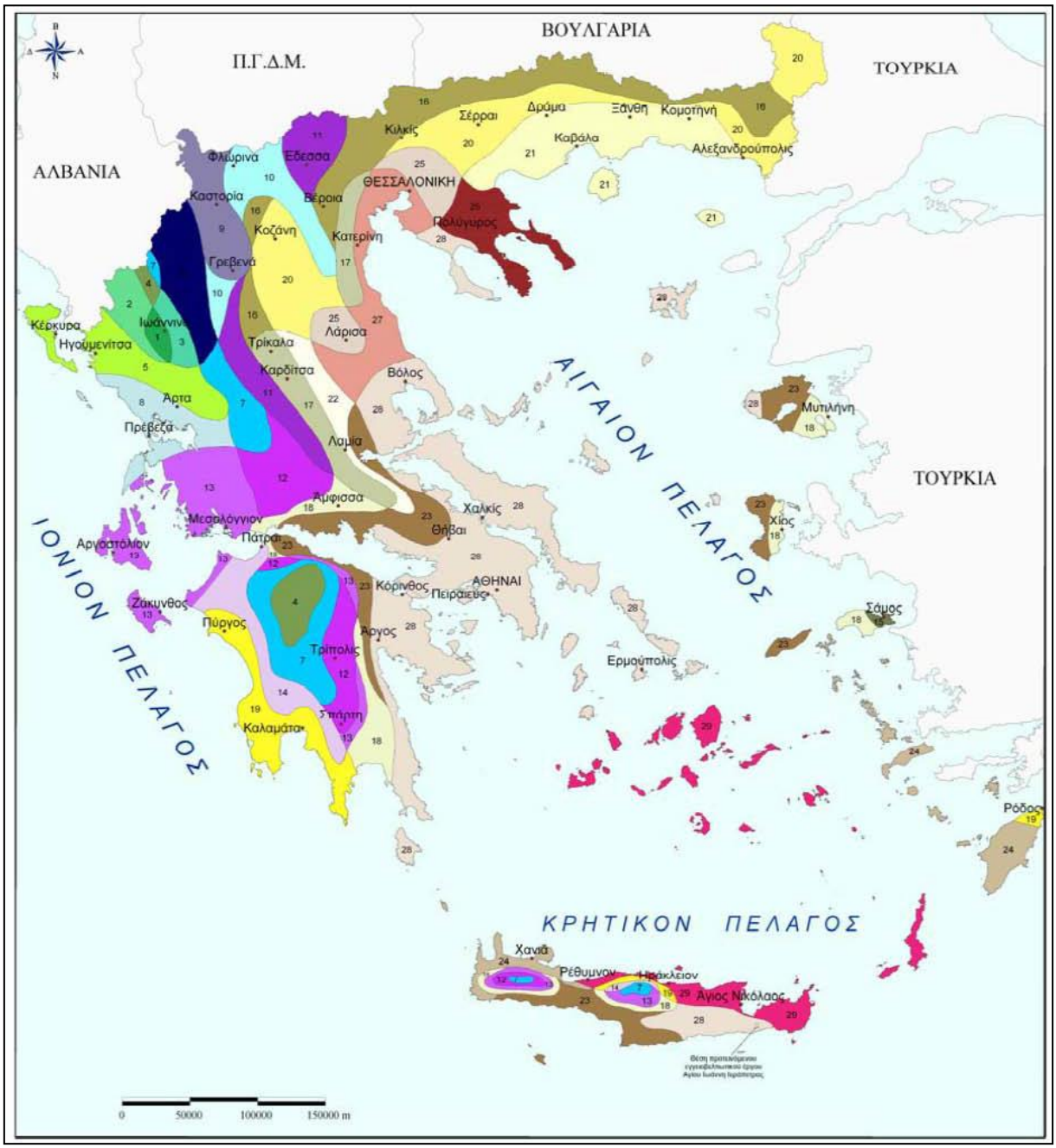
Εικόνα 3.1: Χάρτης κλιματικών περιοχών της Ελλάδας (πηγή: http://geogr.eduportal.gr/maps.htm).

3.3 Το Κλιμα της Νησου Ναξου

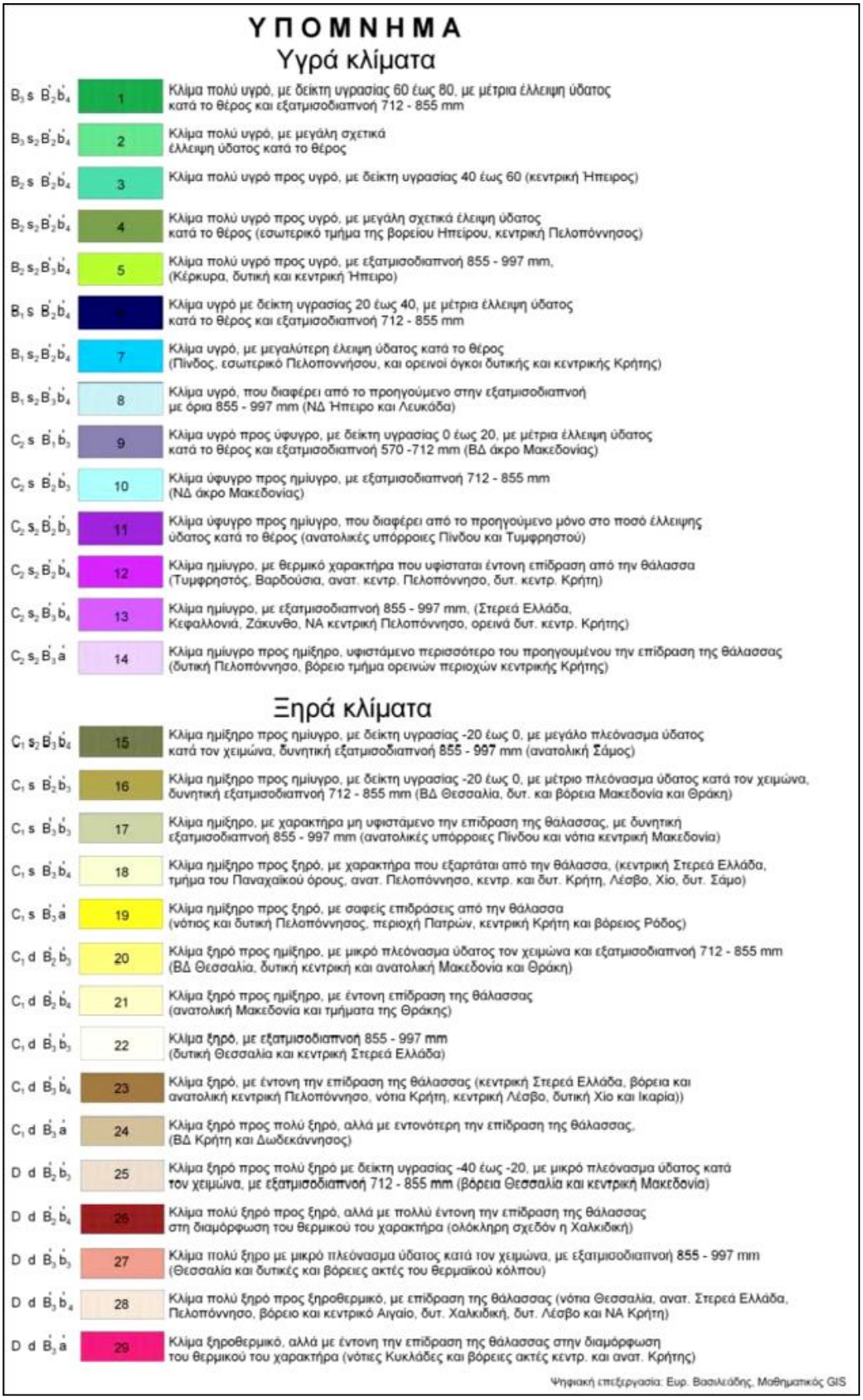
Το κλίμα της περιοχής έρευνας αν και κατατάσσεται στο μεσογειακό τύπο κλίματος, σύμφωνα με την κατάταξη του κλίματος κατά Thornwaite, το κλίμα της είναι ξηρό, και πιο συγκεκριμένα ξηροθερμικό, με έντονη επίδραση της θάλασσας στη διαμόρφωση του θερμικού χαρακτήρα (Εικόνες 3.2 & 3.3). Όμως, το Αιγαίο Πέλαγος, λόγω της γεωγραφικής του θέσης, του πλήθους των νησιών του, των πολυάριθμων ακρωτηρίων, των κόλπων και των πολλών ορεινών συγκροτημάτων, καθώς και άλλων φυσικογεωγραφικών παραγόντων, παρουσιάζει ιδιάζουσες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες σε τέτοιο βαθμό ώστε να θεσπιστεί για το Αιγαίο Πέλαγος ένας ξεχωριστός τύπος κλίματος με τον όρο κλίμα του Αιγαίου (εύκρατο προς θαλάσσιο) ή κλίμα των Ετησίων (Κατσούλης, 1970, Λεωνιδοπούλου, 2008).

Πιο συγκεκριμένα, στις Κυκλάδες η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται στους 19ο C, ενώ το έτος από μετεωρολογικής και κλιματικής άποψης διαιρείται σε δύο εποχές, την ψυχρή και

τη θερμή. Η ψυχρή εποχή διαρκεί από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο, ενώ η θερμή από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο (Λεωνιδοπούλου, 2008).



Εικόνα 3.2: Χάρτης κλιματικής ταξινόμησης της Ελλάδος κατά Thornwaite (Καρράς, 1973, Μανάκος κ.α., 2007).



Εικόνα 3.3: Υπόμνημα χάρτη κλιματικής ταξινόμησης της Ελλάδος κατά Thornwaite (Καρράς, 1973, Μανάκος κ.α., 2007).

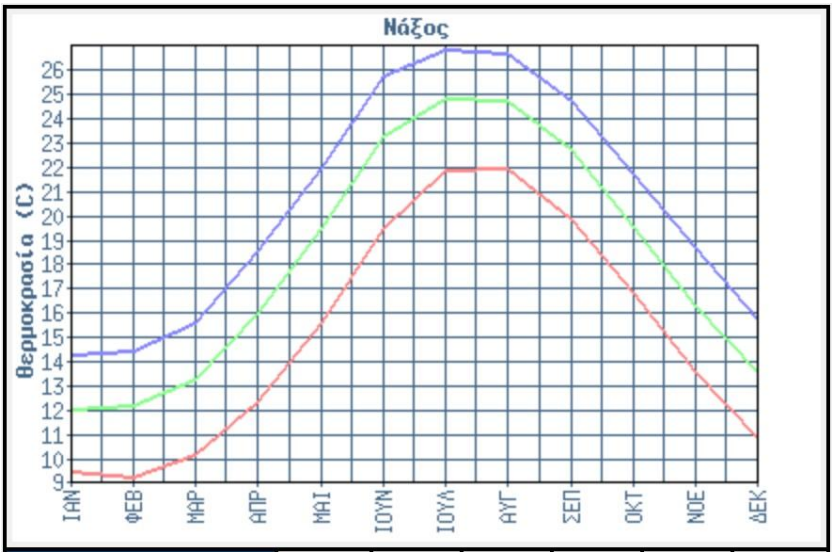
Για τη μελέτη των γενικών κλιματολογικών χαρακτηριστικών της Νάξου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό της κωμόπολης Νάξου (Χώρα), ο οποίος βρίσκεται κοντά στο δημαρχείο του νησιού (Εικόνα 3.4). Ο συγκεκριμένος σταθμός είναι από τους πιο παλιούς στην Ελλάδα, κατασκευάστηκε το 1951 και η καταγραφή των κλιματολογικών δεδομένων ξεκίνησε το 1955. Βρίσκεται σε ύψος 6,8 m και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από το σταθμό αυτό για τη συγκεκριμένη μελέτη, διατέθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και αφορούν την περίοδο 1958-2010.

Εικόνα 3.4: Ο μετεωρολογικός σταθμός της Νάξου.

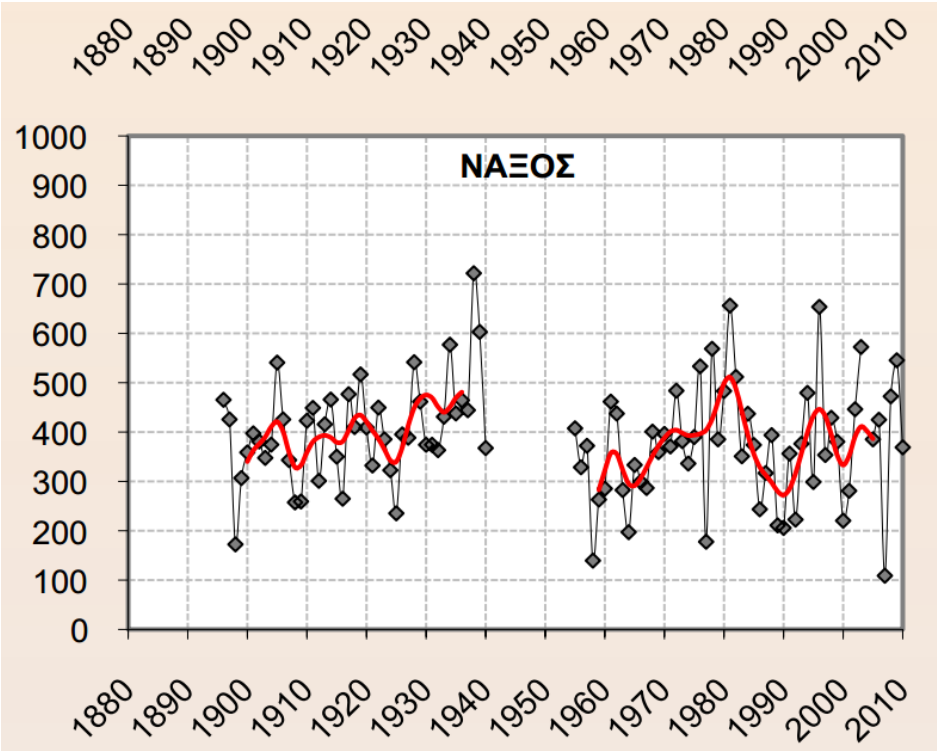
Αναλυτικότερα το κλίμα της Νάξου έχει τα εξής χαρακτηριστικά (Πλακά, 2006):

- Ομαλές θερμοκρασίες και χαμηλό θερμομετρικό εύρος. Στα πεδινά, η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 17,9 ^{o}C και το θερμομετρικό εύρος 12 ^{o}C, ενώ στα ορεινά υπάρχει διαφορά 5 ^{o}C περίπου προς το ψυχρότερο. Ο χειμώνας είναι ήπιος και η θερμοκρασία σπάνια κατεβαίνει κάτω από τους 10 ^{o}C. Στις ορεινές περιοχές βέβαια οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες και κάποιες φορές παρουσιάζονται έντονες χιονοπτώσεις. Το καλοκαίρι οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες από άλλες περιοχές της Ελλάδας και μικρότερες από 26 ^{o}C (Εικόνα 3.5).
- Χαμηλές βροχοπτώσεις. Οι μήνες που σημειώνουν τα μεγαλύτερα ύψη βροχής είναι ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος, ενώ από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο, οι βροχοπτώσεις είναι σχεδόν ανύπαρκτες (Εικόνες 3.6 & 3.7). Όπως και στις υπόλοιπες Κυκλάδες, η μέση ετήσια βροχόπτωση τις τελευταίες δεκαετίες στα πεδινά είναι 380 mm, ενώ στα ορεινά (και με βάση τις μετρήσεις των τελευταίων 10 ετών) φθάνει τα 800 mm. Το υπερετήσιο ύψος βροχής στο νησί κυμαίνεται μεταξύ 400 mm και 600 mm (Εικόνα

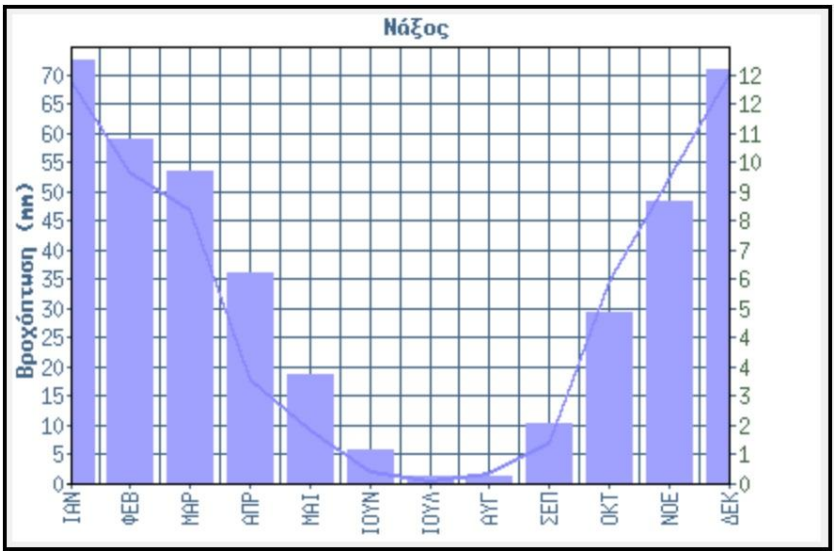
3.8). Το γεγονός ότι το νησί παρουσιάζει ελάχιστες βροχοπτώσεις γίνεται εμφανές από το μέσο όρο των ημερών βροχής που παρουσιάζει (Εικόνα 3.9), όπου από το 1950 έως το 1975, η Νάξος είχε κατά μέσο όρο 82,4 μέρες βροχής (Theoharatos & Tselepidaki, 1989).



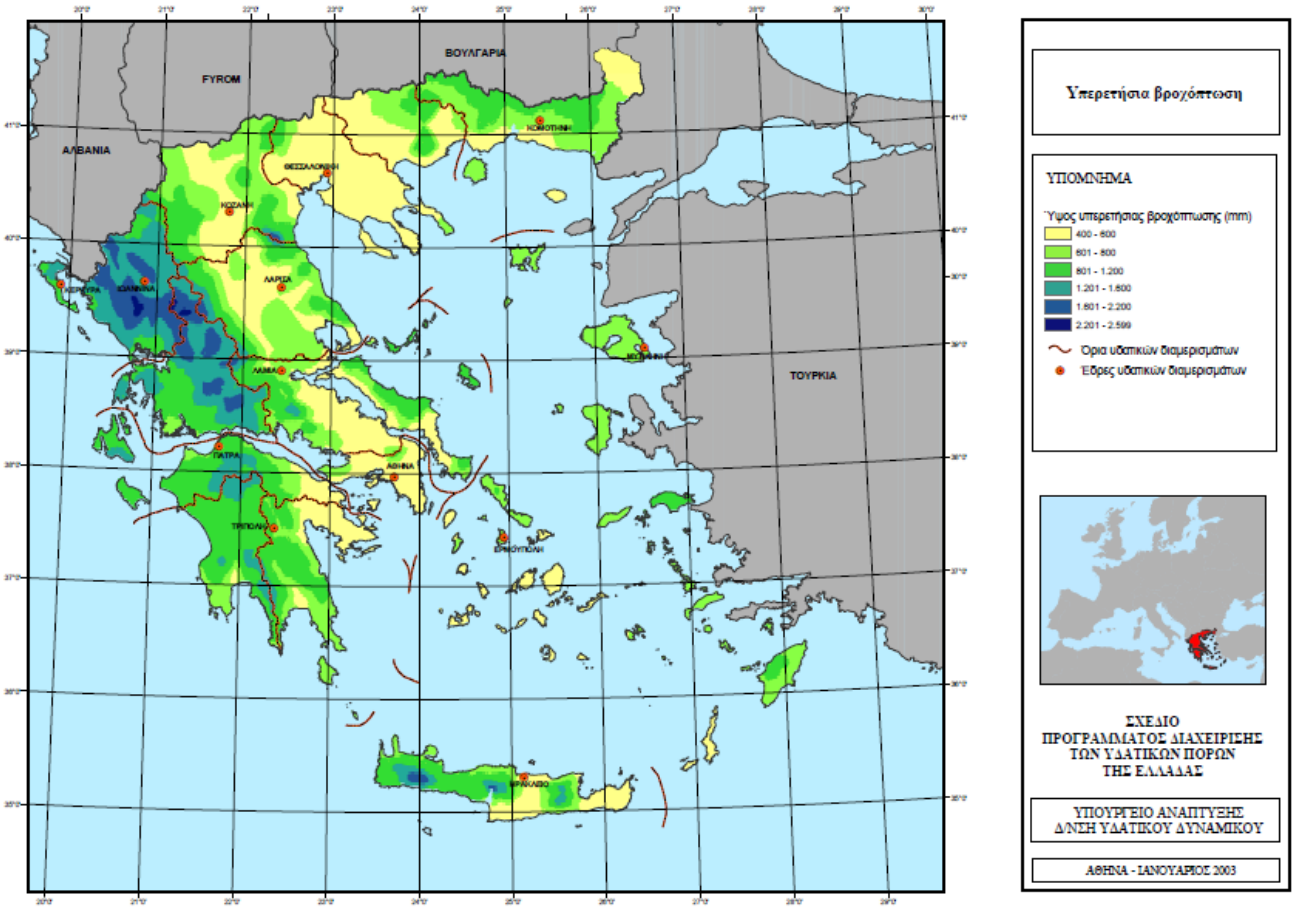
Εικόνα 3.5: Η μέγιστη (μπλε γραμμή), η μέση (πράσινη γραμμή) και η ελάχιστη (κόκκινη γραμμή) μηνιαία θερμοκρασία της Νάξου για την περίοδο 1958-2010 (πηγή: Ε.Μ.Υ.).



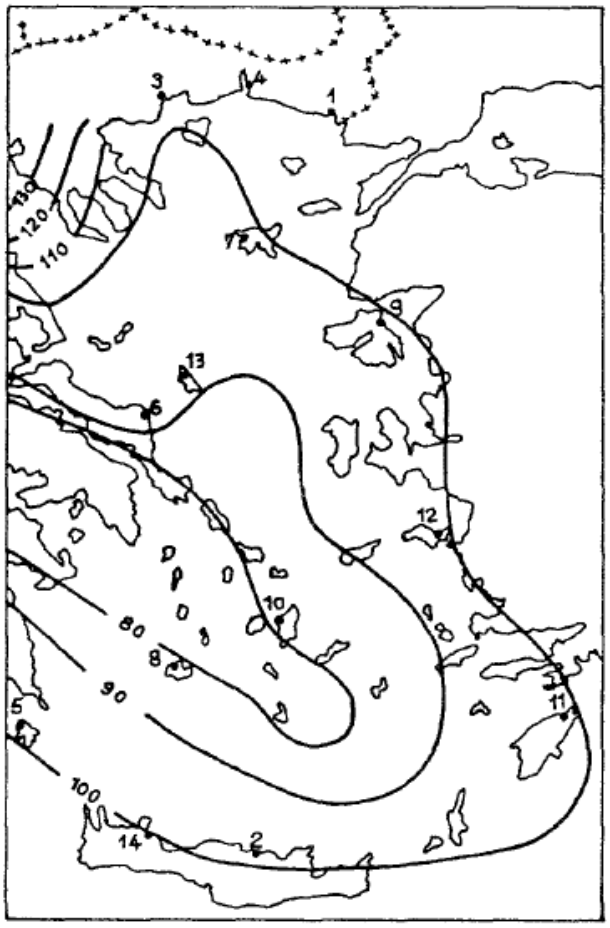
Εικόνα 3.6: Κατανομή της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης της Νάξου για την περίοδο 1895-2010 (Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011).



Εικόνα 3.7: Η μέση μηνιαία βροχόπτωση της Νάξου για την περίοδο 1958-2010 (πηγή: Ε.Μ.Υ.).

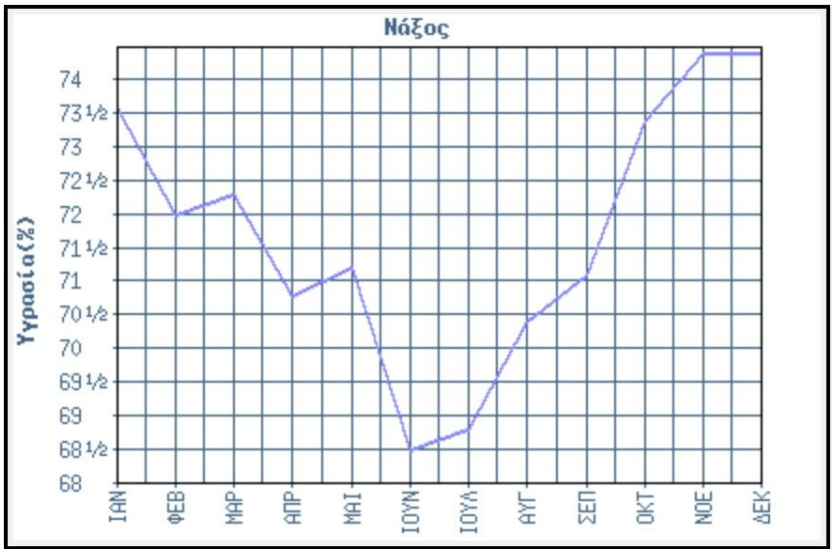


Εικόνα 3.8: Χάρτης υπερετήσιας βροχόπτωσης ανά υδατικό διαμέρισμα (ΥΠ.ΑΝ., 2003).

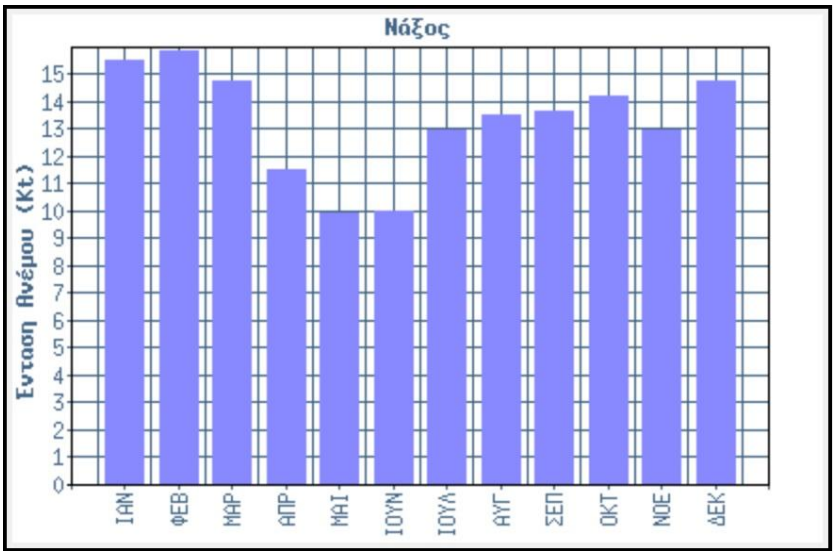


Εικόνα 3.9: Χάρτης ισότιμων καμπύλων μέσης τιμής ημερών βροχής για την περιοχή των Κυκλάδων για την περίοδο 1950-1975 (Theoharatos & Tselepidaki, 1989).

- Ξηρό κλίμα. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία στα πεδινά είναι 70% (65%-75%), ενώ στα ορεινά φτάνει και το 85% (Εικόνα 3.10).
- Ισχυρούς ανέμους. Οι άνεμοι που πνέουν στη Νάξο είναι κυρίως βόρειοι και βορειοανατολικοί με ένταση 4 μποφόρ, ενώ άνεμοι πάνω από 4 μποφόρ έχουν συχνότητα ανάμεσα σε 40% και 55% (Εικόνα 3.11).
- Εντονότατη εξάτμιση ιδίως κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, μικρής σχετικά υγρασίας αέρα, μέτριας υγρασίας εδάφους, μεγάλης ηλιοφάνειας και παρουσίας ισχυρών ανέμων.



Εικόνα 3.10: Η μέση μηνιαία υγρασία της Νάξου για την περίοδο 1958-2010 (πηγή: Ε.Μ.Υ.).



Εικόνα 3.11: Η μέση μηνιαία ένταση των ανέμων σε kt (knots) *στη Νάξο για την περίοδο 1958-2010 (πηγή: Ε.Μ.Υ.).*

3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ - ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ

Η βροχοβαθμίδα αποτελεί ένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου, το οποίο αποτελεί και σημαντικό παράγοντα του μοντέλου εκτίμησης της ποσότητας και της ροής των υπόγειων υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, η βροχοβαθμίδα βοηθά στην εκτίμηση του όγκου νερού που πέφτει στην περιοχή με τη μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (Καρύμπαλης & Παυλόπουλος, 2002). Η εκτίμηση της βροχοβαθμίδας

θεωρείται γενικά σημαντική και απαιτείται να χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή των ισοϋψών καμπυλών σε ισοϋέτιες σε περίπτωση που απουσιάζουν άλλα δεδομένα.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η εκτίμηση της βροχοβαθμίδας, για να οδηγεί σε σωστά αποτελέσματα ως προς τη σχέση βροχής-υψομέτρου, πρέπει να χρησιμοποιούνται δεδομένα βροχοπτώσεων 20ετίας από διαφορετικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Στην περίπτωση της νήσου Νάξου, η βροχοβαθμίδα εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα βροχοπτώσεων της περιόδου 1971-2000 από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς (Πίνακας 3.1). Καθώς η χρονοσειρά των δεδομένων βροχόπτωσης ήταν ελλιπής για μερικές χρονιές, έγινε η συμπλήρωσή τους. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπλήρωση των μετεωρολογικών παρατηρήσεων είναι η εποχιακή συσχέτιση, με κύριο κριτήριο την τιμή του συντελεστή συσχέτισης.

Η εκτίμηση της μεταβολής της βροχόπτωσης σε σχέση με το υψόμετρο γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέση ετήσια βροχόπτωση για την περίοδο έρευνας από κάθε μετεωρολογικό σταθμό. Στη συνέχεια απεικονίζεται γραφικά η σχέση ύψους και μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (Εικόνα 3.12). Ο κάθετος άξονας του διαγράμματος (άξονας y) αντιστοιχεί στο ύψος βροχής που σημειώνεται σε mm, ενώ στον οριζόντιο άξονα (άξονας x) απεικονίζεται το υψόμετρο που βρίσκονται οι βροχομετρικοί σταθμοί σε m.

Η εξίσωση που αντιστοιχεί στο κάθε διάγραμμα είναι της μορφής P=ah+b (Βουδούρης & Αντωνάκος, 2002). Όπου P είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση (σε mm), h το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας (σε m), ενώ οι χαρακτήρες a και b αντιστοιχούν σε αριθμητικούς τελεστές. Ο αριθμητικός τελεστής a εκφράζει την βροχοβαθμίδα, δηλαδή την μεταβολή του ύψους βροχής με την αύξηση του υψομέτρου, ενώ ο b αντιστοιχεί στο ύψος βροχής σε ύψος 0 m, δηλαδή στην ακτογραμμή.

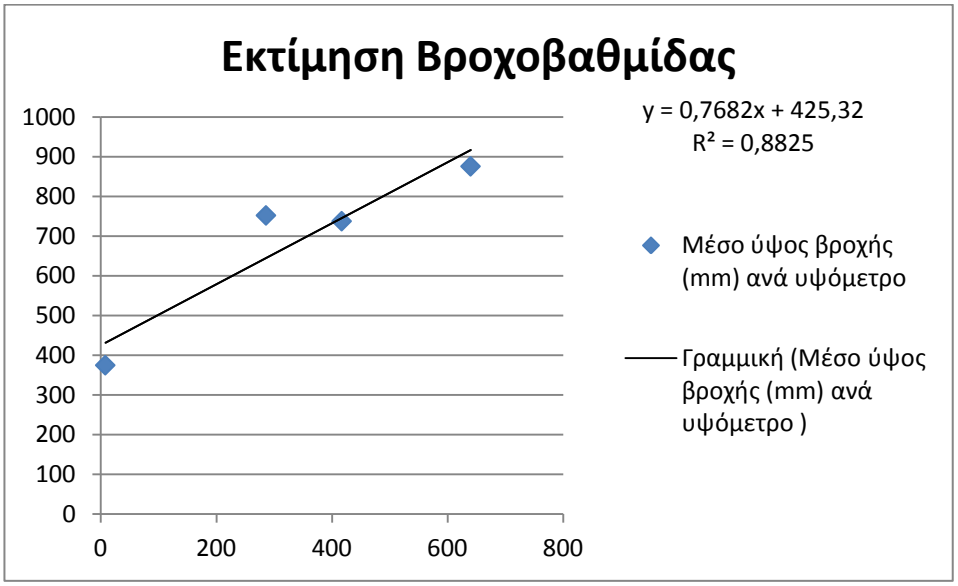
Στα διαγράμματα, η βροχοβαθμίδα αντιστοιχεί με την κλίση της ευθείας που περιγράφεται από τη σχέση P=a*h+b, δηλαδή με την εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει η εξίσωση P=a*h+b με τον άξονα x που είναι ο άξονας των υψομέτρων. Συνεπώς, η παραπάνω εξίσωση έχει σαν ανεξάρτητη μεταβλητή το υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών (h) και σαν εξαρτημένη το μέσο μηνιαίο και μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (P) αντίστοιχα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η βροχοβαθμίδα γενικά είναι θετική, δηλαδή όσο αυξάνεται το υψόμετρο αυξάνεται η βροχόπτωση κατά τη διάρκεια όλων των μηνών του έτους. Αυτό που αλλάζει είναι ο ρυθμός αύξησης της βροχόπτωσης που στα διαγράμματα απεικονίζεται με την κλίση της ευθείας P=a*h+b, την τιμή δηλαδή της βροχοβαθμίδας.

Η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση της ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο είναι η P=0,7682*h+425,32. Εδώ η βροχοβαθμίδα ισούται με 0,7682, δηλαδή η βροχόπτωση αυξάνεται κατά 76,82 mm ανά 100 m υψομέτρου. Επιπλέον, η μέση ετήσια βροχόπτωση στο επίπεδο της θάλασσας (h=0) είναι ίση με 425,32 mm βροχής. Η μέση ετήσια βροχόπτωση για όλη την έκταση του νησιού παρουσιάζεται στο χάρτη της εικόνας 3.13.

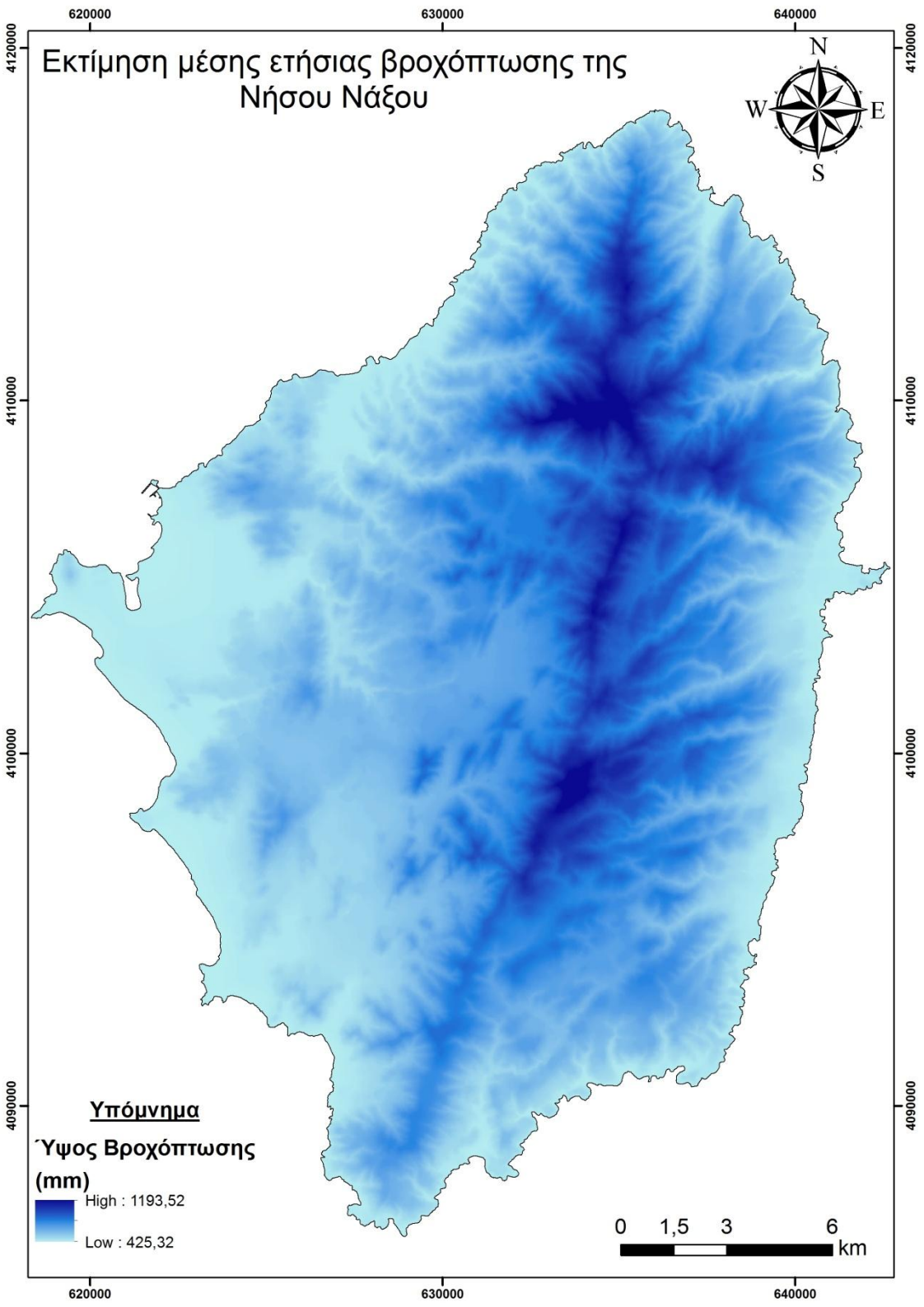
Τέλος, υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης R^2, ούτως ώστε να διαλευκανθεί ότι το αποτέλεσμα της εκτίμησης της βροχοβαθμίδας είναι αντιπροσωπευτικό και αληθές. Καθώς ο συντελεστής συσχέτισης ισούται με 0,8825 και είναι κοντά στην τιμή 1, η εκτίμηση της βροχοβαθμίδας είναι αποδεκτή για την περιοχή έρευνας.

Πίνακας 3.1: Οι μετεωρολογικοί σταθμοί της νήσου Νάξου, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βροχοβαθμίδας.

Σταθμός	**Συντεταγμένη Χ (Ε.Γ.Σ.Α. '87)**	**Συντεταγμένη Υ (Ε.Γ.Σ.Α. '87)**	**Υψόμετρο (m)**	**Μέσο ύψος βροχής (mm)**
Απείρανθος	634976	4103571	640	875,4
Κινίδαρος	631270	4106890	417	737,3
Χαλκί	631729	4102750	286	751,8
Χώρα	621896	4106710	8	374,6



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης περιόδου 1971-2000, σε σχέση με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών.



Εικόνα 3.13: Εκτίμηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για τη νήσο Νάξο, λαμβάνοντας υπόψη τη βροχοβαθμίδα.

3.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ

Η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε σχέση με την μονάδα του ύψους λέγεται θερμοκρασιακή βαθμίδα ή κατακόρυφη θερμοβαθμίδα και δίνεται από την σχέση:

$$\gamma = - dT/Dz$$

Το αρνητικό πρόσημο τοποθετείται για να δηλώσει ότι η αύξηση του ύψους αντιστοιχεί σε ελάττωση της θερμοκρασίας. Ως μονάδα ύψους λαμβάνονται τα 100 μέτρα (100 m) ή το 1 χιλιόμετρο (1km). Επομένως η θερμοβαθμίδα εκφράζεται σε °C/100 m ή σε °C/1 km και η μέση τιμή της είναι 0,6 °C (γ=0,6 °C/100 m ή 6 °C/1 km). Η τιμή αυτή μεταβάλλεται και κυρίως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που μπορεί να γίνει πολύ θερμή την ημέρα και να ψυχθεί την νύχτα, με αποτέλεσμα η θερμοβαθμίδα να λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή την ημέρα και μικρότερη την νύχτα.

Η ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα είναι μια άλλη παράμετρος του ατμοσφαιρικού αέρα και ορίζεται ως η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας μετά του ύψους μιας μάζας μη κορεσμένου αέρα που μετακινείται αδιαβατικά (χωρίς προσθήκες ή απώλειες θερμότητας). Η τιμή της ανέρχεται σε – 0,98 °C/100 m. Σε περίπτωση που η αέρια μάζα είναι κορεσμένη από υδρατμούς, τότε η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας μετά του ύψους καλείται υγρή κατακόρυφη αδιαβατική θερμοβαθμίδα και η μέση τιμή της είναι – 0,5 °C/100 m. Οι θερμοβαθμίδες της ατμόσφαιρας καθορίζουν την ευστάθεια ή αστάθεια αυτής. Έτσι αν η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα σε μια ορισμένη θέση και χρονική στιγμή συμβεί να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ξηρή και υγρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα, τότε η ατμόσφαιρα είναι σταθερή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ασταθής (Σκαραντωνάκης, 2010).

Στον πινάκα 3.2 και στην εικόνα 3.14 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί η θερμοβαθμίδα, το υψόμετρο των σταθμών καθώς και η μέση ετήσια θερμοκρασία του κάθε σταθμού για το χρονικό διάστημα 2010-2014. Αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει να είναι κοινό για όλους τους σταθμούς για τον σωστό υπολογισμό της θερμοβαθμίδας. Επιπλέον το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας δεν ήταν δυνατό να είναι το ίδιο με αυτό της βροχοβαθμίδας, καθώς τα δεδομένα ήταν ελλιπή και δεν ήταν δυνατόν να συμπληρωθεί η χρονοσειρά τους.

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει το γράφημα που απεικονίζει τη σχέση της ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο (Εικόνα 3.15). Ο κάθετος άξονας του διαγράμματος (άξονας y)

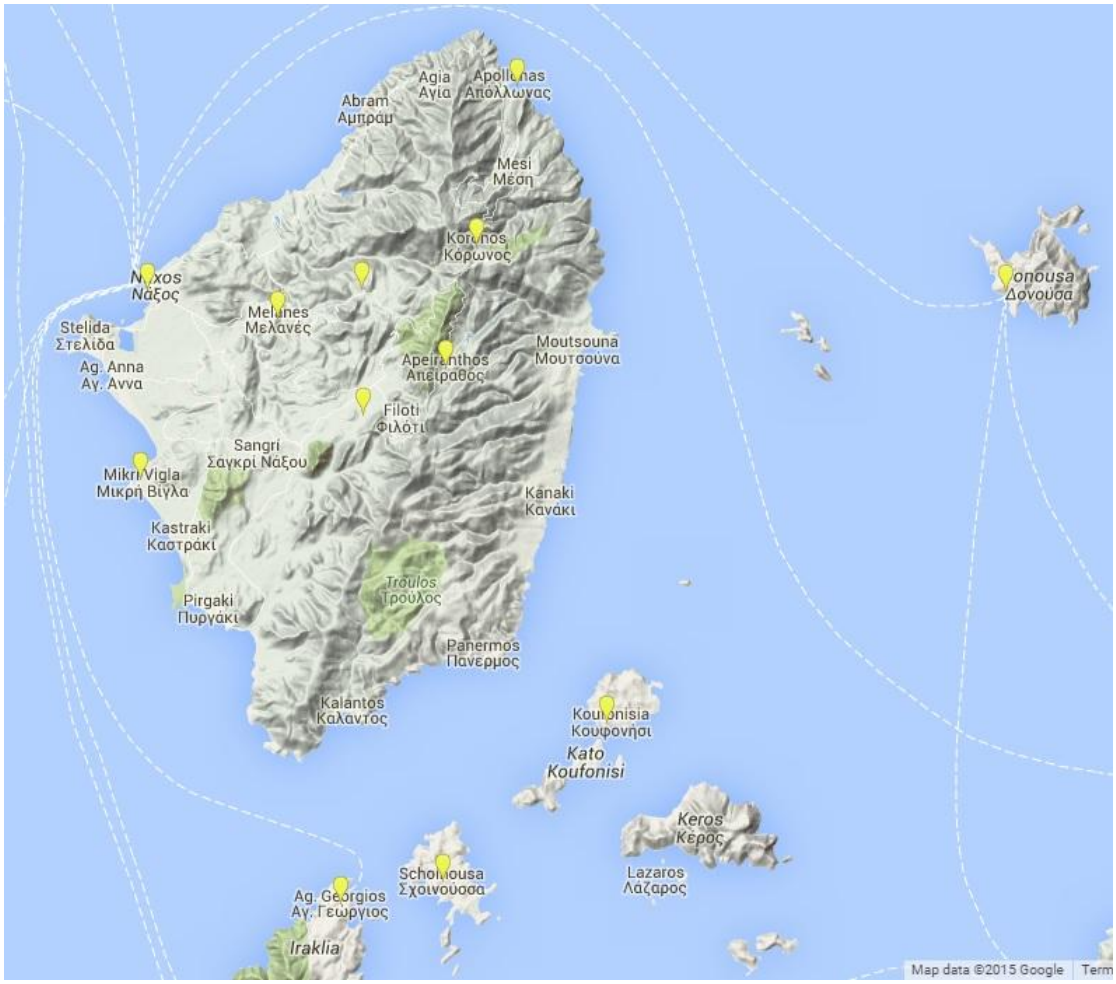
αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που σημειώνεται σε ^{o}C, ενώ στον οριζόντιο άξονα (άξονας x) απεικονίζεται το υψόμετρο που βρίσκονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί σε m. Για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας πρέπει να υπολογιστεί η κλίση της ευθείας που σχηματίζεται.

Όπως και με τη βροχοβαθμίδα, η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας με το υψόμετρο είναι η T=-0,0073*h+19,349. Εδώ η θερμοβαθμίδα ισούται με -0,0073 ^{o}C/m, δηλαδή η θερμοκρασία μειώνεται κατά 0,73 ^{o}C ανά 100 m υψομέτρου. Επιπλέον, η μέση ετήσια θερμοκρασία στο επίπεδο της θάλασσας (h=0) είναι ίση με 19,349 ^{o}C. Η μέση ετήσια θερμοκρασία για όλη την έκταση του νησιού παρουσιάζεται στο χάρτη της εικόνας 3.16.

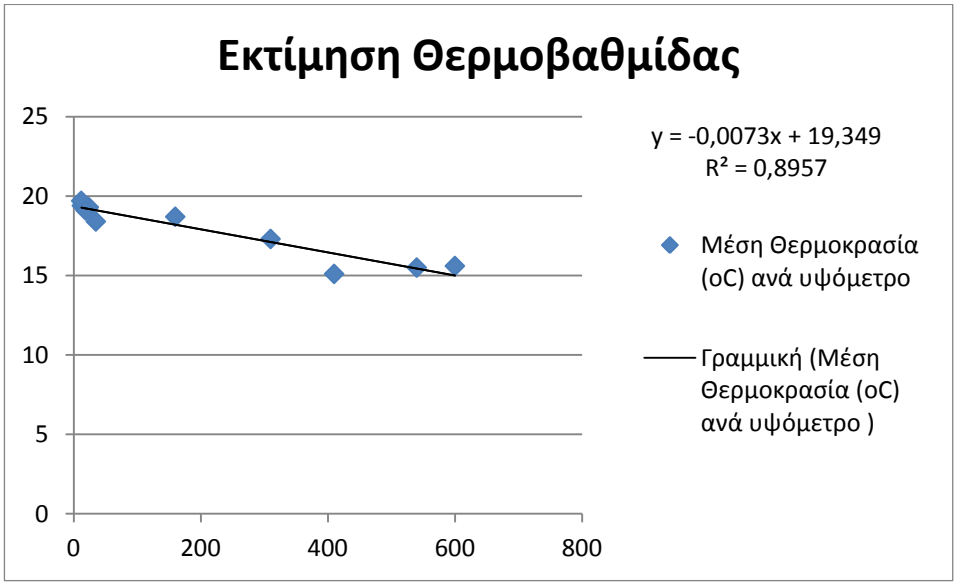
Τέλος, όπως και στην περίπτωση της βροχοβαθμίδας, υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης R^2, ούτως ώστε να διαλευκανθεί ότι το αποτέλεσμα της εκτίμησης της θερμοβαθμίδας είναι αντιπροσωπευτικό και αληθές. Καθώς ο συντελεστής συσχέτισης ισούται με 0,8957 και είναι κοντά στην τιμή 1, η εκτίμηση της θερμοβαθμίδας είναι αποδεκτή για την περιοχή έρευνας.

Πίνακας 3.2: Οι μετεωρολογικοί σταθμοί της νήσου Νάξου, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της θερμοβαθμίδας.

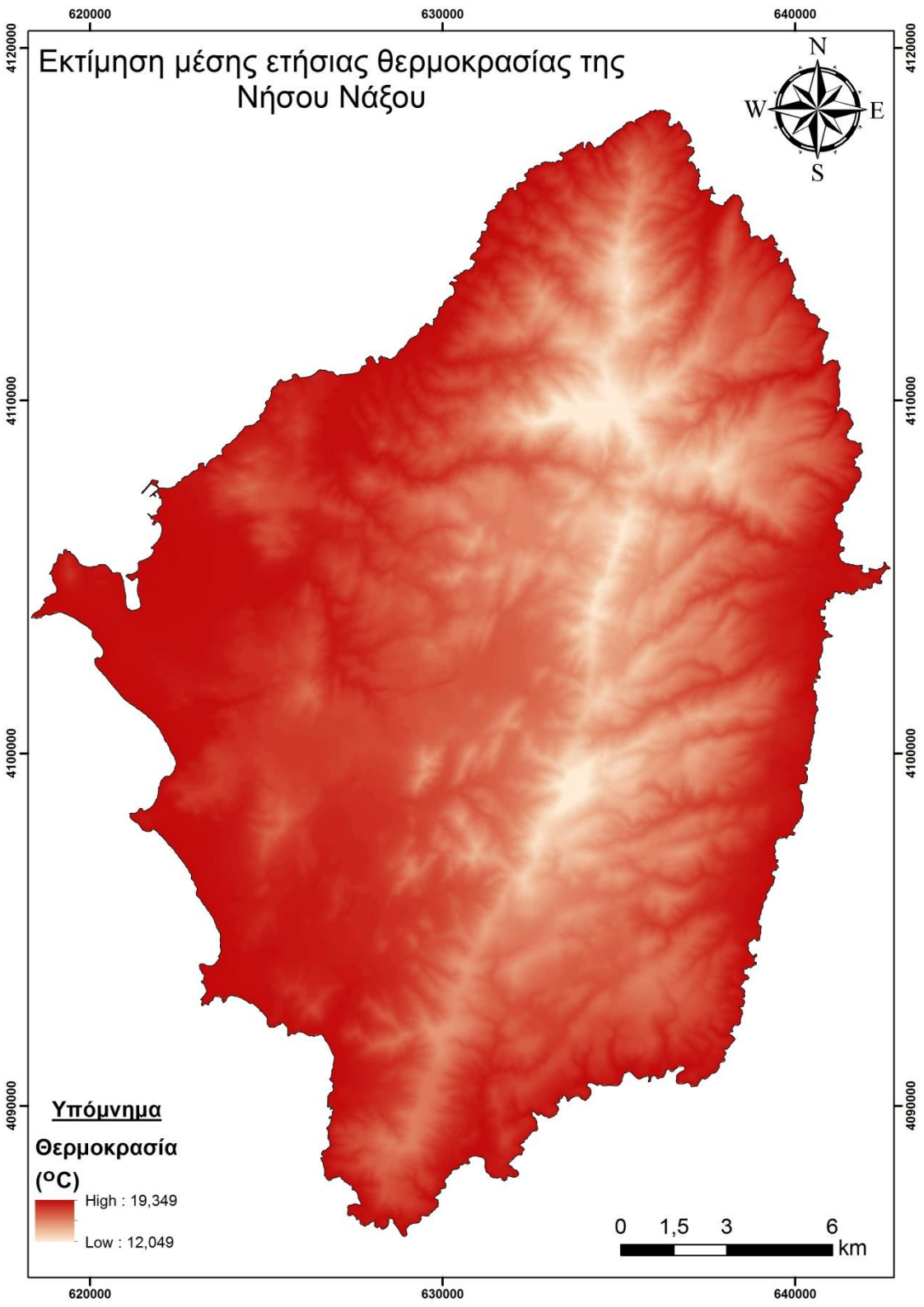
Σταθμός	**Συντεταγμένη Χ (Ε.Γ.Σ.Α. '87)**	**Συντεταγμένη Υ (Ε.Γ.Σ.Α. '87)**	**Υψόμετρο (m)**	**Μέση θερμοκρασία (^{o}C)**
Απείρανθος	634976	4103571	600	15,6
Απόλλωνας	637881	4115811	35	18,4
Δαμαριώνας	631431	4101437	310	17,3
Δονούσα	659363	4107272	13	19,4
Ηράκλεια	630771	4080140	24	19,3
Κόρωνος	636267	4108854	540	15,5
Κινίδαρος	631247	4106919	410	15,1
Μέλανες	627647	4105546	160	18,7
Μικρή Βίγλα	621741	4098452	12	19,7
Νάξος	621927	4106720	19	19,1



Εικόνα 3.14: Η θέση των μετεωρολογικών σταθμών, των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της θερμοβαθμίδας (πηγή: Αστεροσκοπείο Αθηνών).



Εικόνα 3.15: Διάγραμμα μέσης ετήσιας θερμοκρασίας περιόδου 2010-2014 σε σχέση με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών.



Εικόνα 3.16: Εκτίμηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας για τη νήσο Νάξο, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοβαθμίδα.

3.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ

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 (Καψωμενάκης κ.α., 2011).

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 (Denman et al., 2007) και άλλα. 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 (Καψωμενάκης κ.α., 2011).

Στο Κέντρο Έρευνας Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών (ΚΕΦΑΚ) έχουν αναπτυχθεί βάσεις δεδομένων και προσομοιώσεων προτύπων με βάση τα Σενάρια Εκπομπών A2, A1B, B2 και B1, των οποίων τα χαρακτηριστικά αναφέρονται συνοπτικά στον πίνακα 3.3. Τα σενάρια αυτά αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της τρίτης έκθεσης του Ο.Η.Ε για την κλιματική αλλαγή (Nakićenović et al., 2000). Στις βάσεις δεδομένων που δημιουργήθηκαν, για κάθε μία από τις 13 κλιματικές περιοχές στις οποίες χωρίστηκε η Ελλάδα, καθώς και για την επικράτεια, υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες μεταβολές των μέσων εποχικών και μέσων ετήσιων τιμών έξι κλιματικών παραμέτρων για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100, σε σύγκριση με την περίοδο αναφοράς (1961-1990).

Οι κλιματικές παράμετροι που μελετήθηκαν είναι οι εξής:

- Μέση θερμοκρασία του αέρα (ºC)
- Βροχόπτωση (mm/έτος)
- Σχετική υγρασία (%)
- Κλάσμα νεφοκάλυψης (%)

- Εισερχόμενη ολική μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία στην επιφάνεια (W/m^2)
- Ταχύτητα ανέμου στα 10 m από την επιφάνεια (m/sec)

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα αποτελέσματα που λήφθηκαν υπόψη για την εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος στη νήσο Νάξο ήταν αυτά που προέκυψαν από το σενάριο Α2. Η επιλογή του συγκεκριμένου σεναρίου δεν είναι τυχαία, καθώς από τα σενάρια που μελετήθηκαν το συγκεκριμένο δέχεται τη μεγαλύτερη αύξηση των εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου, και συνεπώς, τη μεγαλύτερη αλλαγή των κλιματικών παραμέτρων.

Πρόσφατη μελέτη (Zanis et al., 2008) παρουσίασε αναλυτικά την απόδοση εννέα περιοχικών κλιματικών προτύπων από το πρόγραμμα PRUDENCE για την περιοχή της Ελλάδος, καθώς και τις εκτιμήσεις για το μέλλον βάσει αυτών των προτύπων κατά την περίοδο 2071-2100, χρησιμοποιώντας το Σενάριο Α2. Για την περίπτωση του Σεναρίου Α2 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα 13 προσομοιώσεων. Οι υπολογισμοί καλύπτουν περίοδο 30 ετών για το κλίμα αναφοράς (1961-1990) και μια μελλοντική περίοδο 30 ετών (2071-2100). Οι μεταβολές των υπό μελέτη κλιματικών παραμέτρων για την περίπτωση των Σεναρίου Α2 βασίζονται στη μέση τιμή του συνόλου (ensemble mean) των 13 προσομοιώσεων.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σύμφωνα με το σενάριο Α2 για τις 6 κλιματικές παραμέτρους, παρατίθενται στον πίνακα 3.4. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής:

- **<u>Βροχόπτωση</u>**

  Προβλέπεται μείωση της βροχόπτωσης κατά 16,4% μέχρι το 2080, κατά 22,4% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 10,3% μέχρι το 2100 σε σχέση με τη βροχόπτωση που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990. Στα ποσοστά που αναφέρονται δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα των προγνώσεων.

- **<u>Σχετική Υγρασία</u>**

  Προβλέπεται μείωση της σχετικής υγρασίας κατά 0,7% μέχρι το 2080, κατά 1,0% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 1,3% μέχρι το 2100 σε σχέση με τη σχετική υγρασία που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990. Στα ποσοστά που αναφέρονται δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα των προγνώσεων.

- **Θερμοκρασία**

  Προβλέπεται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 16,7% μέχρι το 2080, κατά 17,9% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 21,9% μέχρι το 2100 σε σχέση με τη θερμοκρασία που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990. Στα ποσοστά που αναφέρονται δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα των προγνώσεων.

- **Ηλιακή Ακτινοβολία**

  Προβλέπεται αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 1,2% μέχρι το 2080, κατά 2,0% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 1,5% μέχρι το 2100 σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990. Η αύξηση της ακτινοβολίας είναι και ο κύριος παράγοντας αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα. Στα ποσοστά που αναφέρονται δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα των προγνώσεων.

- **Ταχύτητα ανέμου**

  Προβλέπεται αύξηση των ταχυτήτων των ανέμων κατά 1,5% μέχρι το 2080, κατά 2,8% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 3,4% μέχρι το 2100 σε σχέση με τις ταχύτητες ανέμων που παρατηρήθηκαν την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990. Στα ποσοστά που αναφέρονται δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα των προγνώσεων.

- **Κλάσμα νεφοκάλυψης**

  Προβλέπεται μείωση του κλάσματος νεφοκάλυψης κατά 12,9% μέχρι το 2080, κατά 16,3% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 15,3% μέχρι το 2100 σε σχέση με το κλάσμα νεφοκάλυψης που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990. Στα ποσοστά που αναφέρονται δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα των προγνώσεων.

Πίνακας 3.3: Σενάρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών (IPCC, 2007, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011).

Σενάριο A2	Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα, η οποία θα φτάσει τα 850 ppm το 2100.
Σενάριο A1B	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 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα, η οποία θα φτάσει τα 720 ppm.
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. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα με μέτριους αλλά σταθερούς ρυθμούς, η οποία θα φτάσει το 2100 τα 620 ppm.
Σενάριο B1	Μεγάλη αύξηση του παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. 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 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα με σχετικά ήπιους ρυθμούς, ιδίως από το 2050 και μετά, η οποία θα φτάσει το 2100 τα 550 ppm.

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης 6 κλιματικών παραμέτρων για τις Κυκλάδες, σύμφωνα με το Σενάριο Α2 (Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011). Σημειώνεται ότι παρατηρείται μείωση της βροχόπτωσης και αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που θα επιφέρει μείωση της επιφανειακής απορροής και αύξηση της εξατμισιδιαπνοής, με αποτέλεσμα τη μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

Κλιματική Παράμετρος	Περίοδοι	Τιμή	Διαφορά	Ποσοστό
Βροχόπτωση (mm/έτος)		mm/έτος	ΔΒ	(%)
	1961-1990	400,6±106,0	-	-
	2010-2015	375,8±100,0	-	-
	2071-2080	334,3±89,6	-66,3±32,3	-16,4±5,5
	2081-2090	313,4±95,8	-87,3±27,0	-22,4±6,3
	2091-2100	361,9±106,7	-38,7±36,9	-10,3±10,1
Σχετική Υγρασία (%)		Υ	ΔΥ	(%)
	1961-1990	73,78±3,70	-	-
	2010-2015	73,5±3,0	-	-
	2071-2080	73,22±3,52	-0,56±0,48	-0,7±0,6
	2081-2090	73,02±3,57	-0,76±0,56	-1,0±0,7
	2091-2100	72,83±3,70	-0,95±0,57	-1,3±0,7
Θερμοκρασία (ºC)		Τ	ΔΤ	(%)
	1961-1990	17,98±0,35	-	-
	2010-2015	18,52±0,30	-	-
	2071-2080	20,97±0,44	3,00±0,18	16,7±1,0
	2081-2090	21,20±0,40	3,22±0,26	17,9±1,6
	2091-2100	21,91±0,45	3,93±0,33	21,9±2,0
Ακτινοβολία (W/m^2)		S	ΔS	(%)
	1961-1990	204,1±22,4	-	-
	2010-2015	205±20,0	-	-
	2071-2080	206,5±21,6	2,4±3,9	1,2±2,2
	2081-2090	208,0±21,2	3,8±5,0	2,0±2,9
	2091-2100	207,0±21,6	2,8±4,7	1,5±2,7
Ταχύτητα Ανέμου (m/sec)		V	ΔV	(%)
	1961-1990	6,64±0,92	-	-
	2010-2015	6,68±0,90	-	-
	2071-2080	6,73±0,94	0,10±0,12	1,5±1,8
	2081-2090	6,83±1,00	0,20±0,12	2,8±1,7
	2091-2100	6,87±1,00	0,23±0,17	3,4±2,3
Κλάσμα Νεφοκάλυψης (%)		C	ΔC	(%)
	1961-1990	32,6±4,3	-	-
	2010-2015	30±4,0	-	-
	2071-2080	28,5±4,4	-4,1±1,5	-12,9±4,9
	2081-2090	27,4±4,5	-5,2±1,6	-16,3±5,5
	2091-2100	27,7±4,5	-4,9±1,6	-15,3±5,3

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τα αποτελέσματα των παραπάνω προβλέψεων των 6 κλιματικών παραμέτρων που μελετήθηκαν από το Κέντρο Έρευνας Φυσικής της Ατμόσφαιρας και

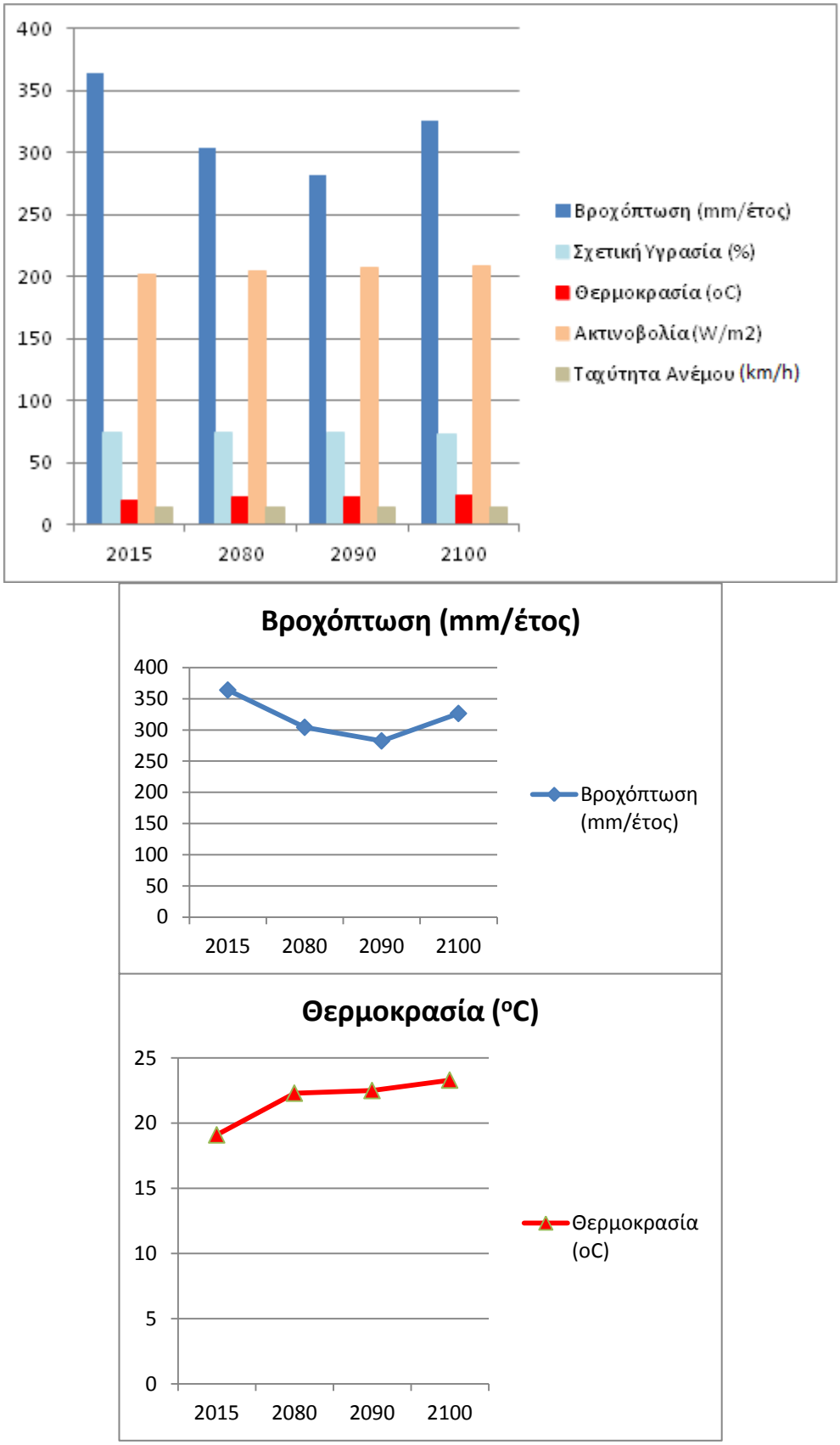
Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών (ΚΕΦΑΚ) για τις Κυκλάδες, η εκτίμηση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών της νήσου Νάξου παρουσιάζεται συνοπτικά στον πίνακα 3.5 και στην εικόνα 3.17. Για την εκτίμηση των κλιματικών παραμέτρων στη νήσο Νάξο, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού στη Χώρα, ο οποίος είναι ο μοναδικός που καταμετρώνται οι περισσότερες κλιματικές παράμετροι. Τα στοιχεία του συγκεκριμένου σταθμού, όπως και όλων των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, είναι διαθέσιμα από το Αστεροσκοπείο Αθηνών, μέσω της ιστοσελίδας http://stratus.meteo.noa.gr/front.

Συμπερασματικά αναφέρεται ότι μέχρι το 2100, η μέση ετήσια βροχόπτωση της νήσου Νάξου θα μειωθεί κατά 37,5 mm, η θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά 4,2 ºC, η σχετική υγρασία θα μειωθεί κατά 0,9%, η ηλιακή ακτινοβολία θα αυξηθεί κατά 6,9 W/m^2 και η ταχύτητα των ανέμων θα αυξηθεί κατά 0,48 km/h.

Τα συγκεκριμένα δεδομένα υπολογίστηκαν με στόχο τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου στην περιοχή μελέτης, τόσο για την παρούσα χρονική περίοδο, όσο και για το μέλλον, για την εισαγωγή των δεδομένων αυτών στο μοντέλο υπόγειας ροής.

Πίνακας 3.5: Εκτίμηση των μελλοντικών μέσων ετήσιων τιμών των κλιματικών παραμέτρων για τη νήσο Νάξο.

Κλιματική Παράμετρος	Περίοδοι	Μέση ετήσια τιμή
Βροχόπτωση (mm/έτος)	1971-2000	363,8
	2071-2080	304,1
	2081-2090	282,3
	2091-2100	326,3
Σχετική Υγρασία (%)	1958-2015	74,2
	2071-2080	73,7
	2081-2090	73,5
	2091-2100	73,2
Θερμοκρασία (ºC)	2010-2015	19,1
	2071-2080	22,3
	2081-2090	22,5
	2091-2100	23,3
Ακτινοβολία (W/m^2)	2010-2014	202
	2071-2080	205
	2081-2090	207,7
	2091-2100	208,9
Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	2010-2015	14
	2071-2080	14,21
	2081-2090	14,39
	2091-2100	14,48



Εικόνα 3.17: Διαγραμματική απεικόνιση των κλιματικών παραμέτρων της νήσου Νάξου για τα έτη 2015, 2080, 2090 και 2100.

3.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

Η αρχή των φαινομένων του υδρολογικού κύκλου βρίσκεται στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλάζι κ.λπ.). 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 στη κατείσδυση. Δευτερογενώς κ.ο.κ. το σχήμα αυτό γίνεται πιο σύνθετο, καθώς νερό που απορρέει, στη διαδρομή του εξατμίζεται ή κατεισδύει μερικώς, και αντιθέτως, νερό που έχει κατεισδύσει, εξέρχεται στην επιφάνεια μέσω των πηγαίων εκφορτίσεων και συνεχίζει τη διαδρομή του με επιφανειακή απορροή και μερική εξάτμιση. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να γίνουν αρκετές φορές. Επιπλέον, το νερό που κατεισδύει, πριν εμπλουτίσει τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, καλύπτει κατά προτεραιότητα τις υδατικές ανάγκες της εδαφικής και υποεδαφικής ζώνης και του ριζικού συστήματος (νερό κατακρατήσεως, προσροφήσεως, τριχοειδές), στην οποία επιτελείται η ανάπτυξη φυτικών και ζωικών οργανισμών. Γίνεται επομένως φανερό, ότι κάθε διατάραξη στο καθεστώς των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων συνεπάγεται σημαντικές μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο και στο υδρολογικό (επιφανειακά ύδατα) και υδρογεωλογικό (υπόγεια ύδατα) ισοζύγιο.

Η λεκάνη της Μεσογείου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δείχνει να επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις κλιματικές αλλαγές στο θέμα του νερού, λόγω της γεωγραφικής της θέσης σε συνδυασμό με την κυκλοφορία των (υγρών και όχι) αερίων μαζών. Οι συγκεκριμένες αυτές επιπτώσεις αντιπροσωπεύονται από σχετικές φυσικές διαδικασίες που είναι, μεταξύ άλλων διαδικασιών ή φαινομένων, οι εξής (IPCC, 2007, Στουρνάρας κ.α., 2011):

- Η αύξηση της θερμοκρασίας και της εξατμισιδιαπνοής.
- Η παρεπόμενη αύξηση της κατανάλωσης υδατικών πόρων για αρδεύσεις, ενέργεια και γενικές χρήσεις.
- Η μείωση των κατακρημνισμάτων, τουλάχιστον εκείνων που προσφέρονται να εξυπηρετήσουν από υδρογεωλογικής πλευράς.

Στην Ελλάδα, το υδατικό έλλειμμα είναι φυσιολογικό, δεδομένου ότι η κατανομή της επιφανειακής απορροής εμφανίζει μια ανάλογη εικόνα με τη κατανομή των βροχοπτώσεων. Ο συνδυασμός γεωγραφικής θέσης (ομβροπλευρά), μορφολογίας και γεωλογίας ευνοεί τη συγκέντρωση επιφανειακών (λίμνες) και υπόγειων (εκτεταμένα καρστικά πεδία) νερών. Ευνοείται όμως και η επιβάρυνση της ποιότητας των υδατικών συστημάτων λόγω της επιδεκτικότητας του καρστ σε ρυπάνσεις. Σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, αναμένεται

αύξηση της εξάτμισης και διαπνοής, αύξηση των αναγκών άρδευσης και ενδεχομένως των τουριστικών αναγκών, και αύξηση του ρυπαντικού φορτίου λόγω αύξησης του ρυπαντικού φορτίου σε περιορισμένο όγκο υδατικού σώματος.

Η εξατμισιδιαπνοή είναι μια σοβαρή υδρολογική απώλεια, που διενεργείται τόσο στην επιφάνεια όσο και στα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Το ποσοστό της είναι ιδιαιτέρως υψηλό, ειδικώς στις ξηρές ανατολικές περιοχές της Ελλάδας. Ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης για τον χαρακτηρισμό του κλίματος μιας περιοχής είναι ο δείκτης ξηρότητας της UNESCO (indicator of dryness), προσδιοριζόμενος ως η σχέση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης προς την αντίστοιχη δυνητική εξατμισιδιαπνοή. Η κατανομή του συγκεκριμένου δείκτη στην Ελλάδα υπογραμμίζει τη σοβαρότητα της ξηρασίας που εμφανίζουν οι νοτιοανατολικές περιοχές και τα νησιά του Αιγαίου.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, οι επιπτώσεις στα υδατικά, κυρίως τα υπόγεια υδατικά συστήματα της χώρας, αλλά και της περιοχής έρευνας, από τις κλιματικές αλλαγές μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Γενική μειωμένη τροφοδοσία και ανανέωση του νερού των υδροφόρων οριζόντων από τη μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της εξατμισιδιαπνοής.
- Αυξημένη υφαλμύρωση των παράκτιων και υποθαλάσσιων υδροφόρων οριζόντων, ιδιαιτέρως των καρστικών, με προέλαση προς τη ενδοχώρα του μετώπου υφαλμύρωσης λόγω του μειωμένου δυναμικού της χερσαίας υδατικής φάσης από τη μειωμένη τροφοδοσία και την υπεράντληση.
- Αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντικού φορτίου στα παράκτια υδατικά σώματα και στη θάλασσα λόγω μικρότερης αραίωσης.
- Εντατικοποίηση της αποδόμησης των δελταϊκών περιοχών, που ήδη έχει ξεκινήσει λόγω της κατασκευής εγκάρσιων φραγμάτων στην ανάντη ζώνη (μείωση απορροής και στερεοπαροχής) και παραλλήλων αναχωμάτων στην πεδινή ζώνη του δέλτα (άφιξη μεταφερόμενου υλικού σε ένα και μοναδικό στόμιο).
- Ρύπανση ή αποξήρανση των παράκτιων υγροτόπων.
- Επιδείνωση του φαινομένου της ερημοποίησης λόγω υδατικού ελλείμματος και εδαφικών μεταβολών (συμπυκνώσεις στεγανοποιήσεις κ.λπ.).

Προκειμένου να διατυπωθούν οι ενδεχόμενες μεταβολές στο υδατικό δυναμικό της χώρας μέχρι και το έτος 2100 πραγματοποιήθηκαν εκτιμήσεις υδρολογικού ισοζυγίου για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100. Η πληροφορία προήλθε από τη χρησιμοποίηση μοντέλων εκτίμησης κλιματικών μεταβολών (βροχόπτωση και εξατμισιδιαπνοή σε mm

αντίστοιχα). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω μοντέλα A1B, A2 και B2, ενώ η εφαρμογή του μοντέλου B1 δεν κατέστη δυνατό.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν δύο εκτιμήσεις των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου P (βροχόπτωση), Etr (εξατμισιδιαπνοή), I (κατείσδυση), και R (επιφανειακή απορροή), όπου στην μεν πρώτη περίπτωση δεν κατέστη δυνατό ο υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής και της επιφανειακής απορροής, εξαιτίας της μη παραδοχής των αποτελεσμάτων, ενώ στη δεύτερη περίπτωση έγινε υπολογισμός όλων των αναγκαίων παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην πρώτη περίπτωση η γεωγραφική οριοθέτηση των περιοχών περιλαμβάνει τόσο το ηπειρωτικό τμήμα όσο και ένα μέρος του νησιωτικού τμήματος. Στη δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνεται μόνο το ηπειρωτικό τμήμα. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε προκειμένου να διακριθεί η αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια της επεξεργασίας των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου γίνεται αναφορά του συντελεστή κατείσδυσης των επιμέρους λιθολογικών σχηματισμών που απαντώνται στον ελλαδικό χώρο σύμφωνα με τα δεδομένα που υπάρχουν στις Διαχειριστικές Μελέτες (ΔΧΜ) του ΥΠΑΝ (2003).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε παραμέτρου του υδρολογικού ισοζυγίου για κάθε ενδεχόμενο σενάριο οδήγησε στο συμπέρασμα της μείωσης των τιμών ύψους βροχής κατά 3 – 7% και του συνολικού υδατικού δυναμικού κατά 7% - 20%, για την περίοδο 2021-2050, και 14% - 22% επί της βροχόπτωσης και 30% - 54% του υδατικού δυναμικού για την περίοδο 2071-2100, στο σύνολο της επικράτειας.

Πίνακας 3.6: Εκτίμηση της μεταβολής των παραμέτρων V (όγκος βροχής) και I+R (υδατικό δυναμικό) του γενικευμένου υδρολογικού ισοζυγίου ανά κλιματικό σενάριο και ανά περίπτωση, εκφρασμένες % (Στουρνάρας κ.α., 2011).

	A1B		A2		B2	
2021 - 2050	V	I+R	V	I+R	V	I+R
	- 8%	- 20%	- 8%	- 19%	- 3%	- 7%
	A1B		A2		B2	
2071 - 2100	V	I+R	V	I+R	V	I+R
	- 14%	- 37%	- 22%	- 54%	- 14%	- 30%

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι οι αλλαγές στο μετεωρολογικό καθεστώς επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τα υδατικά αποθέματα της περιοχής έρευνας, καθώς στην μείωση της επιφανειακής απορροής και της αύξησης της εξατμισιδιαπνοής όπως προαναφέρθηκε, λόγω της κλιματικής αλλαγής, προστίθενται οι ιδιαιτερότητες των υδροφοριών στο μέσο ασυνεχειών στο θέμα της τροφοδοσίας τους και της ανανεώσεως των αποθεμάτων τους. Καθώς τα πετρώματα παρουσιάζουν συνήθως, στις περιπτώσεις αυτές, μικρό συντελεστή κατείσδυσης, το νερό των κατακρημνισμάτων κατεισδύει μέσω των ασυνεχειών του πετρώματος, όταν αυτές βρίσκονται στην επιφάνεια, ή μέσω των ασυνεχειών, που καλύπτονται από το επιφανειακό κάλυμμα. Επομένως, δεν είναι διαθέσιμη, προς κατείσδυση, όλη η επιφάνεια του πετρώματος. Το νερό ακολουθεί τις ασυνέχειες και συγκεντρώνεται στις περιοχές των χειμάρρων, όπου οι ασυνέχειες είναι πιο πυκνές και το πάχος του εδαφικού καλύμματος πιο μεγάλο, αφού οι μισγάγγειες αυτές είναι τεκτονικής προελεύσεως, ενώ ένα μικρότερο ποσοστό κατεισδύσεως εμφανίζεται με τη δευτερογενή κατείσδυση, κατά τη διάρκεια της απορροής.

Τέλος, τονίζεται ότι, η μελέτη των σημερινών και των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών στην περιοχή έρευνας είναι καθοριστική για την προσομοίωση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, καθώς οι κλιματικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η βροχόπτωση, καθορίζουν το υδρολογικό ισοζύγιο μιας περιοχής. Έτσι, κάθε υδρογεωλογικό μοντέλο, όπως και στη συγκεκριμένη περίπτωση, πρέπει να λαμβάνει υπόψη τουλάχιστον δύο κλιματικούς παράγοντες, ώστε να υπολογιστούν όσο το δυνατόν καλύτερα τις ποσότητες ύδατος που συμμετέχουν στο υδρολογικό ισοζύγιο κατά την περίοδο προσομοίωσης και να αυξάνεται η αξιοπιστία του μοντέλου.

Κεφάλαιο 4ο - Γεωλογία

4. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

4.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

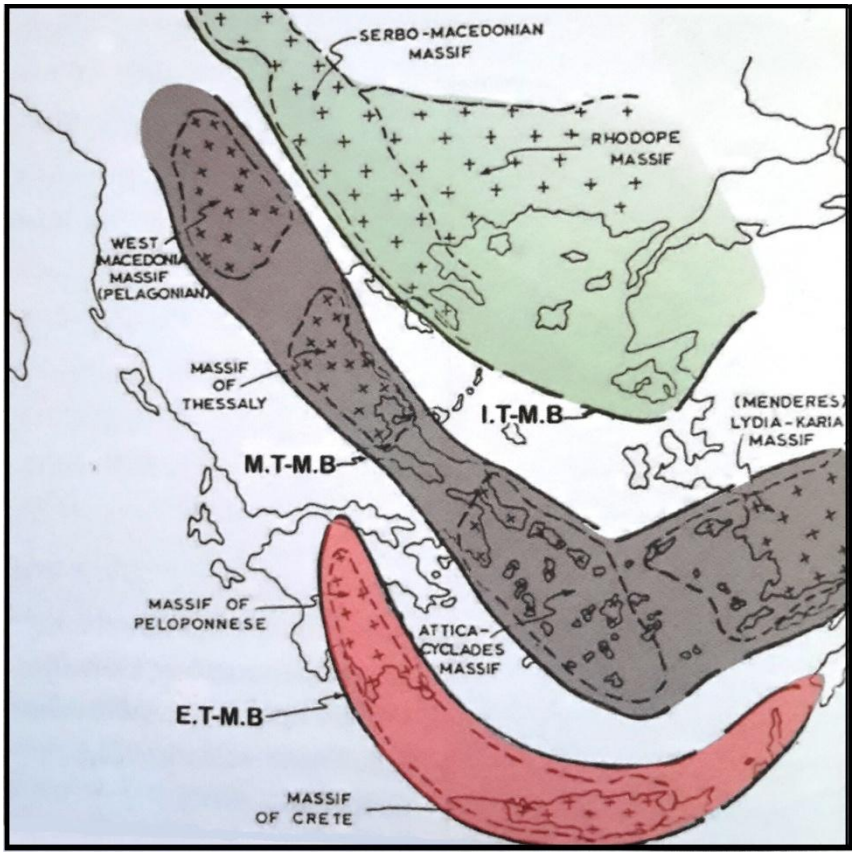
Στον ελλαδικό χώρο έχουν διακριθεί γεωτεκτονικά τρεις αλπικές τεκτονομεταμορφικές ζώνες (εξωτερική, ενδιάμεση, εσωτερική), οι οποίες περιγράφουν τη σημερινή εικόνα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων στην Ελλάδα. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η τεκτονική βάθους, η οποία συνοδεύεται από φαινόμενα μεταμόρφωσης (Παπανικολάου, 1988).

Πιο αναλυτικά, οι τρεις τεκτονομεταμορφικές ζώνες διακρίνονται ως εξής (Εικόνα 4.1):

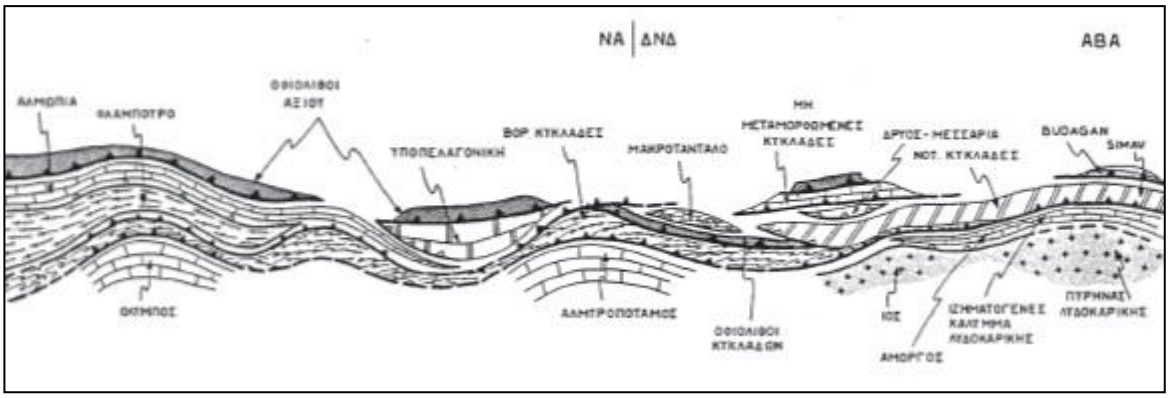
- Στην εξωτερική τεκτονομεταμορφική ζώνη Πελοποννήσου - Κρήτης, η οποία περιλαμβάνει τις πρώην μάζες Πελοποννήσου και Κρήτης και αποτελείται κυρίως από τις αλπικές ενότητες Μάνης (Plattenkalk) και Άρνας (φυλλιτών - χαλαζιτών).
- Στην ενδιάμεση τεκτονομεταμορφική ζώνη ή και πελαγονική (s.l.), η οποία περιλαμβάνει τις πρώην μάζες Δυτικής Μακεδονίας, Ανατολικής Θεσσαλίας, Αττικοκυκλαδικής και Λυδοκαρικής, και αποτελείται από πλήθος αλπικών και προαλπικών ενοτήτων.
- Στην εσωτερική τεκτονομεταμορφική ζώνη (ή εσωτερική ζώνη της Ροδόπης s.l.), η οποία περιλαμβάνει τη Σερβομακεδονική μάζα και τη μάζα της Ροδόπης και αποτελείται από τις ενότητες Περιροδοπική, Βερτίσκο, Κερδύλλια, Παγγαίο και Σιδηρόνερο.

Το Κυκλαδικό σύμπλεγμα, ανήκει στην ενδιάμεση τεκτονομεταμορφική ζώνη, η οποία είναι η πλέον πολύπλοκη και αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του Ελληνικού τόξου. Η γενική της διεύθυνση ταυτίζεται με την αλπική γεωτεκτονική ζώνωση, ενώ η ύπαρξη του σημερινού ενεργού ηφαιστειακού τόξου κατά μήκος των νότιων παρυφών της, υποδηλώνει την κυρίαρχη σημασία της και στη σημερινή γεωδυναμική. Μια σχηματική τομή κατά μήκος της ενδιάμεσης τεκτονομεταμορφικής ζώνης και ένα στερεογραφικό διάγραμμα αυτής, όπου διακρίνονται και οι γεωτεκτονικές ενότητες κατά Παπανικολάου (1986, 1988) δίνονται στις εικόνες 4.2 και 4.3.

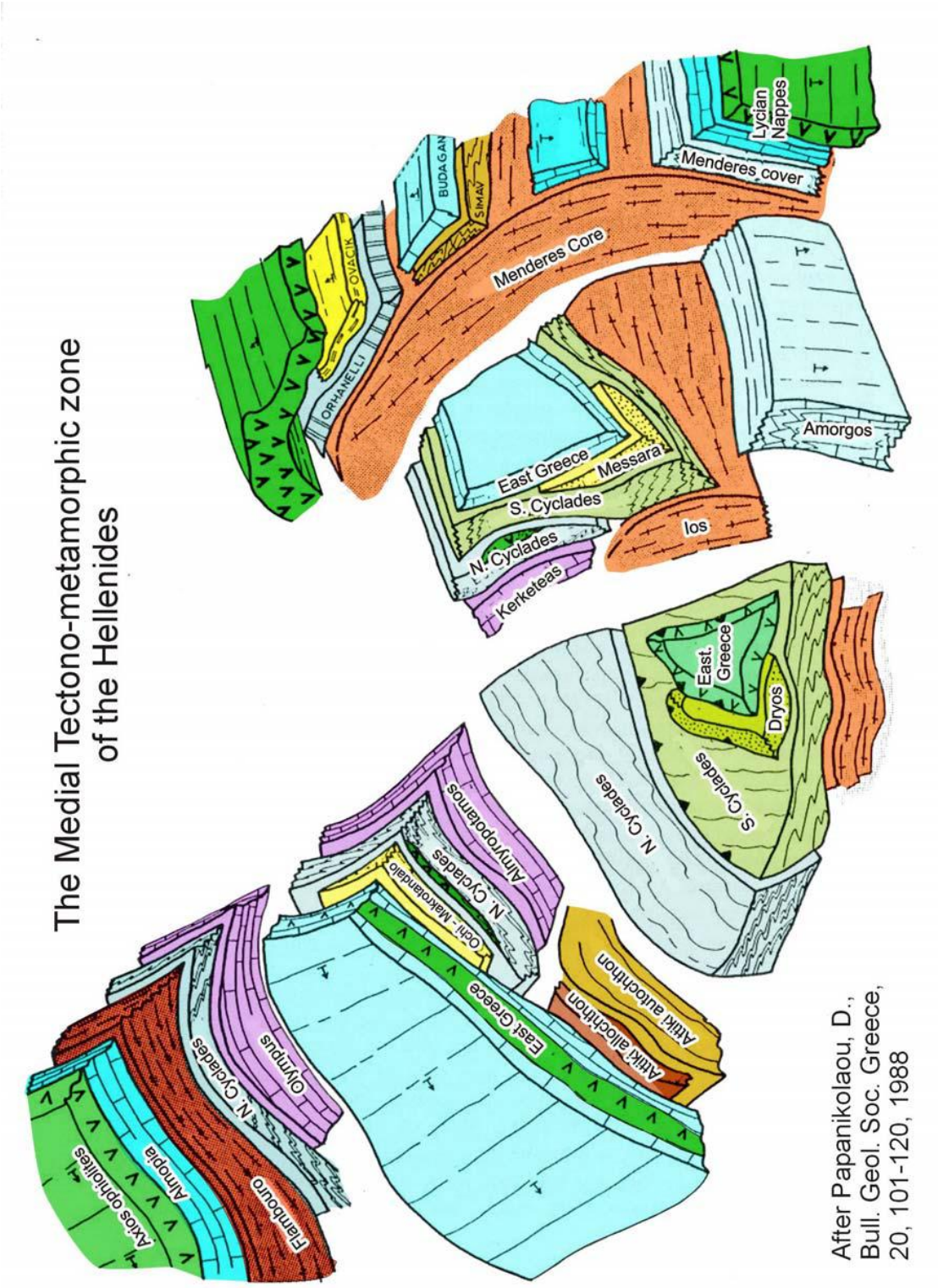
Η κεντρική ζώνη της, στην οποία περιορίζονται τα νησιά των Κυκλάδων, είναι γνωστή και ως Αττικοκυκλαδική μάζα. Σύμφωνα με τον Παπανικολάου (1988), η Αττικοκυκλαδική μάζα αποτελεί το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στη δομή των πρώην μαζών της Δυτικής Μακεδονίας και της Ανατολικής Θεσσαλίας με τη δομή της πρώην Λυδοκαρικής μάζας, που παρά την επικράτηση της άποψης από πολλούς ερευνητές ότι πρόκειται για ομόλογη γεωτεκτονική θέση, αναφερόμενοι στην Αττικοκυκλαδική Ζώνη, εντούτοις αποτελούν τελείως διαφορετικές γεωτεκτονικές μονάδες μέσα την Ενδιάμεση Τεκτονομεταμορφική Ζώνη (Εικόνες 4.4, 4.5).



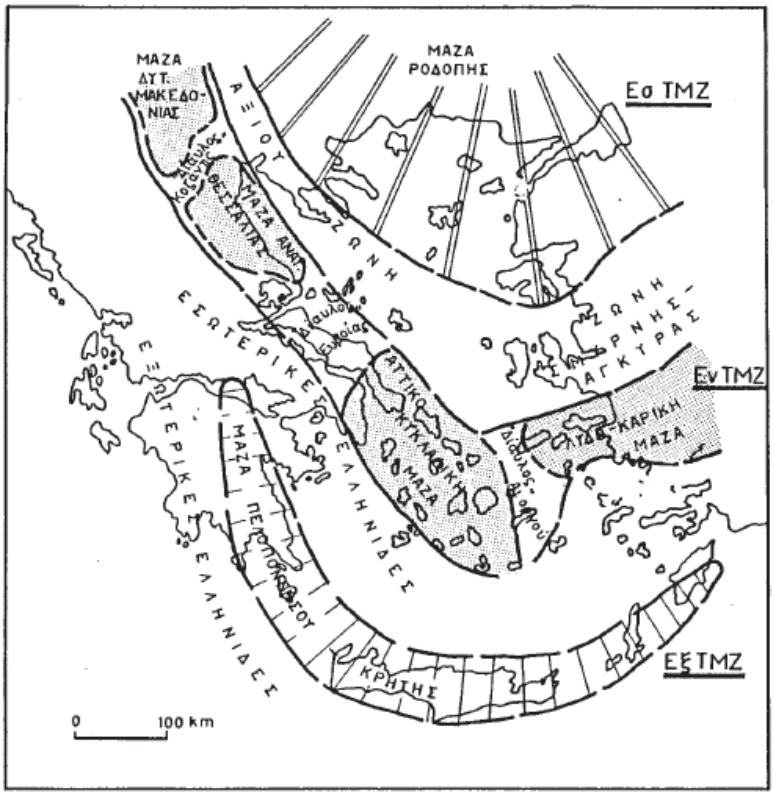
Εικόνα 4.1: Οι τρεις τεκτονομεταμορφικές ζώνες (εξωτερική, ενδιάμεση και εσωτερική) του Ελληνικού τόξου κατά Papanikolaou (1984, 1986). Κάθε μία αποτελείται από διάφορες αλπικές ή και προαλπικές μεταμορφωμένες ενότητες, που συναποτελούν μια ενιαία τεκτονική ενότητα βάθους (Παπανικολάου, 2014).



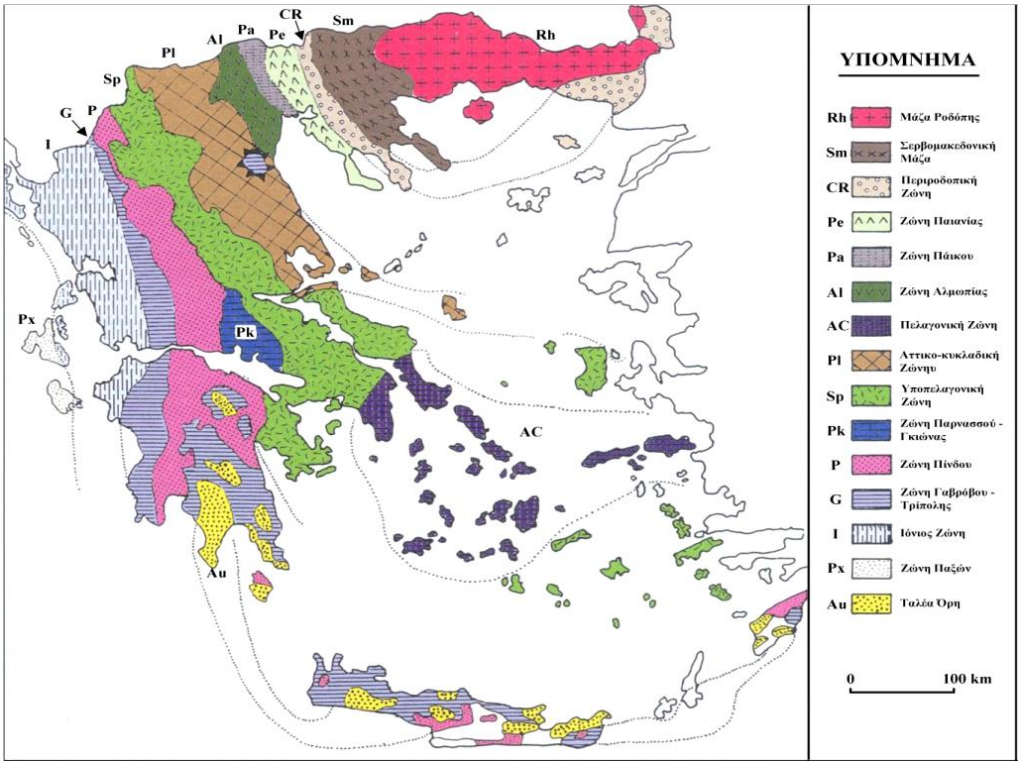
Εικόνα 4.2: Σχηματική τομή κατά μήκος της ενδιάμεσης τεκτονομεταμορφικής ζώνης (Παπανικολάου, 1986).



Εικόνα 4.3: Σχηματικό στερεογραφικό διάγραμμα της ενδιάμεσης τεκτονομεταμορφικής ζώνης (Παπανικολάου, 1988).



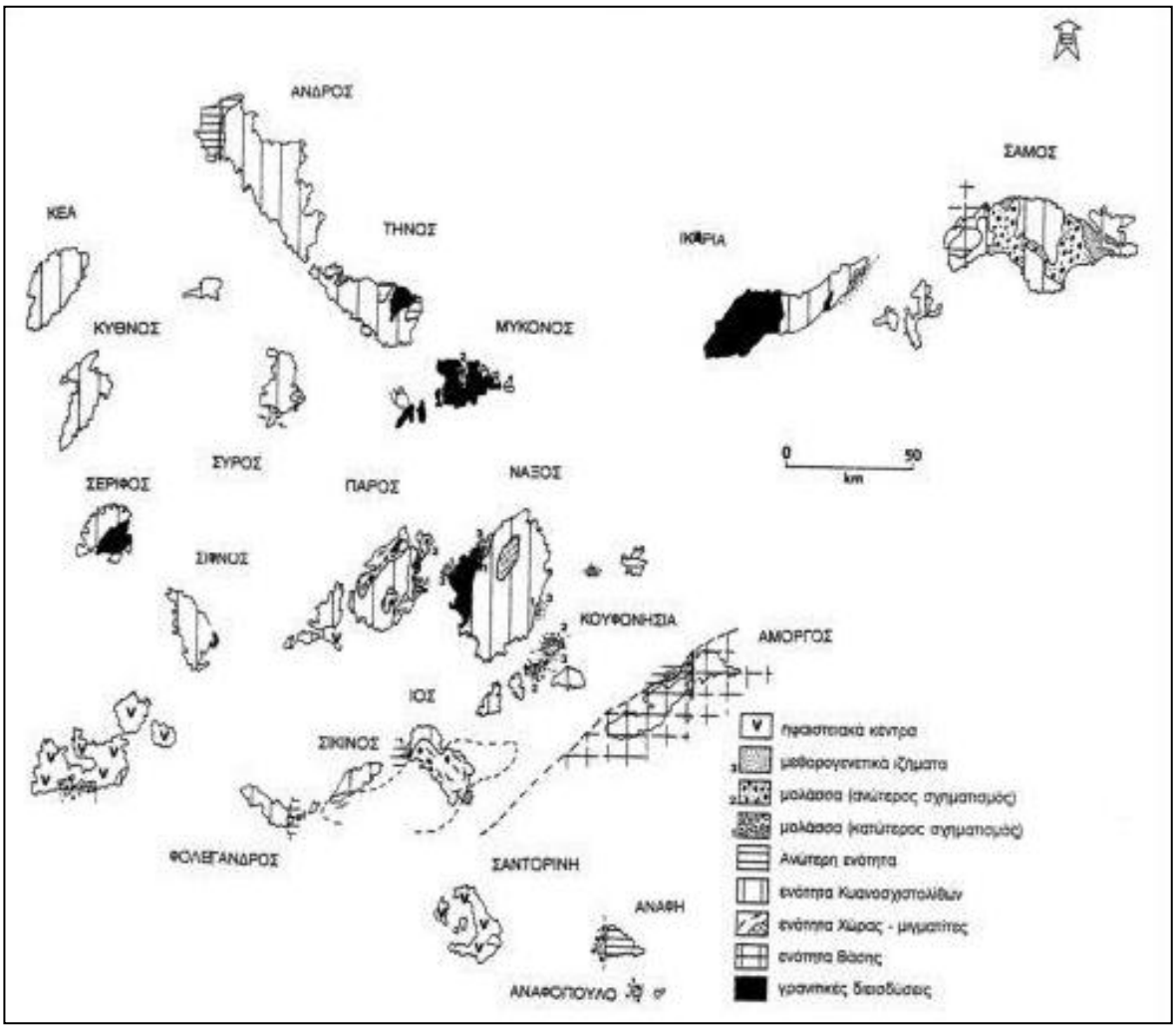
Εικόνα 4.4: Οι τρεις τεκτονομεταμορφικές ζώνες όπου, σε αντίθεση με την εικόνα 4.1, απεικονίζεται η Αττικοκυκλαδική Ζώνη, οι πρώην μάζες της Δυτικής Μακεδονίας, της Θεσσαλίας και της πρώην Λυδοκαρικής μάζας (Brunn, 1956, Παπανικολάου, 1988).



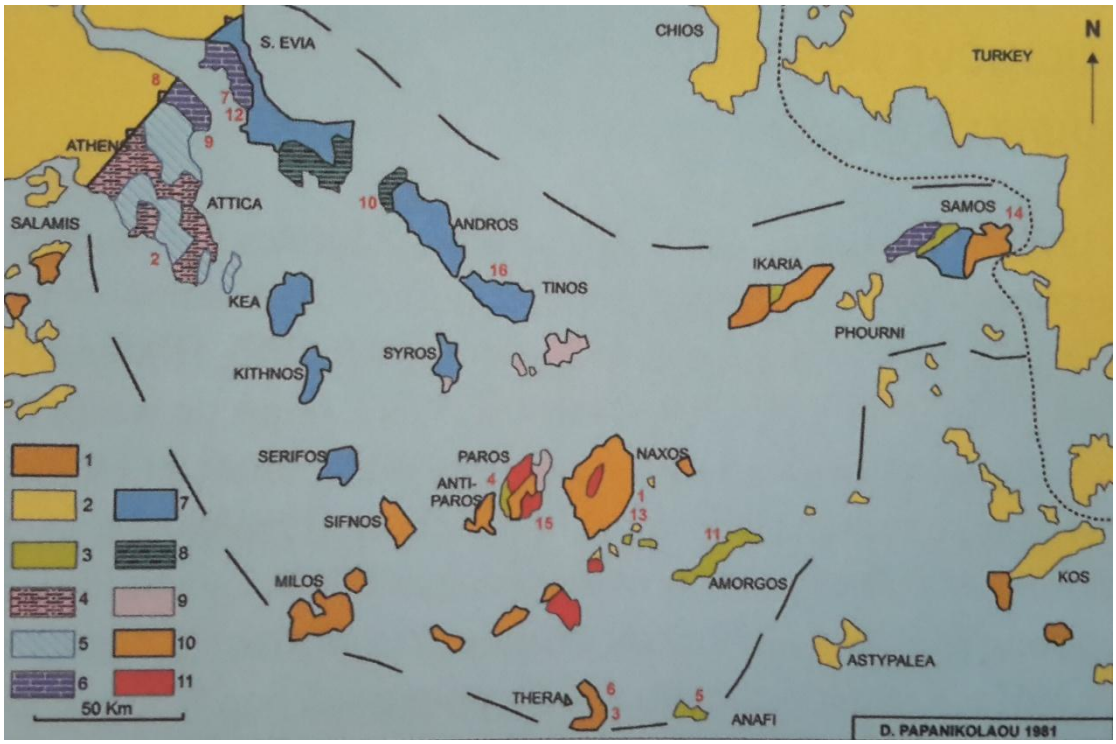
Εικόνα 4.5: Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων Ζωνών (Mountrakis et al., 1983, Μουντράκης, 1985).

Σύμφωνα με ορισμένες απόψεις, η Αττικοκυκλαδική Ζώνη είναι η προς το νότο συνέχεια της Πελαγονικής Ζώνης, στην πραγματικότητα όμως πρόκειται για μια μάζα ετερογενούς σύστασης που αποτελείται από διάφορες προαλπικές και αλπικές τεκτονικές ενότητες σχηματισμών, οι οποίες εμφανίζουν τεκτονικές μεταξύ τους σχέσεις. Όμως, η τεκτονική σχέση μεταξύ των ενοτήτων αυτών διαπιστώνονται σε λίγες περιοχές, καθώς η σημερινή εξάπλωση της θάλασσας του Αιγαίου στο χώρο της Αττικοκυκλαδικής μάζας εμποδίζει την παρατήρησή τους (Μουντράκης, 1985).

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη διάκριση των τεκτονικών ενοτήτων της Αττικοκυκλαδικής μάζας όπως Dürr et al., 1978, Jacobshagen et al., 1979, Bonneau, 1984, Παπανικολάου, 1986, Okrush & Brocker, 1990, Μπορονκάυ, 1995 και άλλοι. Οι υφιστάμενες ταξινομήσεις δεν συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους, γεγονός το οποίο φαίνεται στις εικόνες 4.6, και 4.7, όπου παρουσιάζονται οι ταξινομήσεις κατά Dürr (1978), τροποποιημένη κατά Okrush & Brocker (1990), και κατά Παπανικολάου (1981).



Εικόνα 4.6: Ταξινόμηση κατά Okrush & Broker, 1990 (από Μποτσιαλάς, 2007).



Εικόνα 4.7: Ταξινόμηση κατά Παπανικολάου (1981, Παπανικολάου, 2014). 1:πλειο-τεταρτογενή ηφαιστειακά, 2: μη μεταμορφωμένες Ελληνίδες, 3: χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης ενότητες, 4: Αλλόχθονο της Αττικής, 5: Αυτόχθονο της Αττικής, 6: Αλμυροπόταμος και Κερκετέα, 7: Βόρειες Κυκλάδες, 8:Μακροτάνταλο-Όχη και Φούρνοι, 9: σχιστώδεις γρανίτες, 10: Νότιες Κυκλάδες, 11: προαλπικά Νότιων Κυκλάδων.

Σύμφωνα με τον Παπανικολάου (1986), οι κυριότερες γεωτεκτονικές ενότητες που αναγνωρίζονται στην περιοχή των Κυκλάδων είναι η ενότητα Αμοργού, η ενότητα Βόρειων Κυκλάδων, η ενότητα Μακροτάνταλου - Όχης, η ενότητα Νότιων Κυκλάδων, οι ενότητες Δρυού - Μεσσαριάς και η Κυκλαδική ενότητα. Σημειώνεται επίσης, ότι όσον αφορά τον χώρο των Κυκλάδων, εμφανίζονται συχνά στο ίδιο νησί πετρώματα διαφορετικών ενοτήτων με τεκτονική σχέση μεταξύ τους.

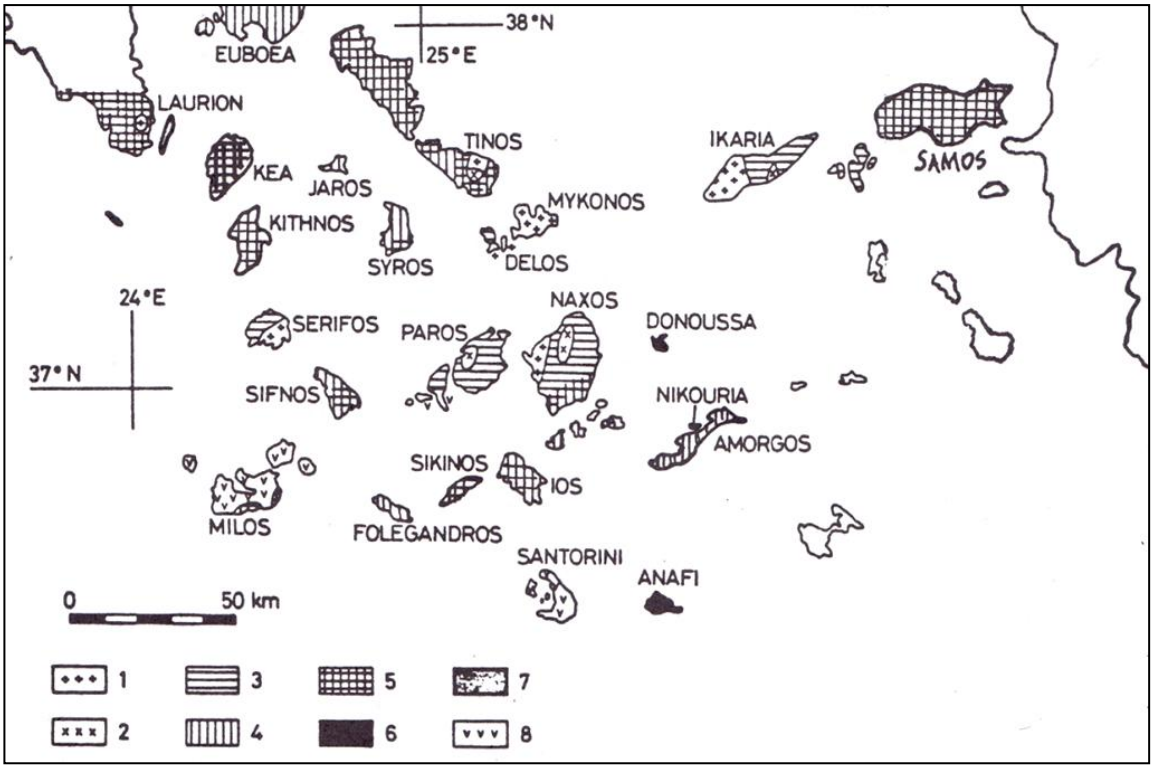
Ένα ακόμη κύριο χαρακτηριστικό της Αττικοκυκλαδικής μάζας είναι ότι μέσα στα πετρώματα των ενοτήτων της διείσδυσαν μεγάλοι όγκοι νεότερων μαγματικών πετρωμάτων. Πρόκειται για πλουτωνικά πετρώματα γρανιτικής κυρίως σύστασης Μειοκαινικής ηλικίας, όπως διαπιστώθηκε από σειρά ραδιοχρονολογήσεων, καθώς επίσης και από τα ηφαιστειακά πετρώματα της πολύ νέας (Τεταρτογενούς) μέχρι ενεργού ηφαιστειότητας, τα οποία όμως δεν σχετίζονται με την κατά γεωτεκτονικές ζώνες διαίρεση της Ελλάδας και δεν συνδέονται με την Αττικοκυκλαδική μάζα, απλά διείσδυσαν μέσα στο χώρο αυτής.

Ένα σημαντικό στοιχείο για την εξέλιξη της Αττικοκυκλαδικής μάζας είναι το θέμα της μεταμόρφωσης των πετρωμάτων της (Εικόνα 4.8). Συγκεκριμένα, στο χώρο της μάζας έχουν διαπιστωθεί τρεις διακριτές μεταμορφικές φάσεις (Altherr et al., 1982, Μουντράκης, 1985):

- Η πρώτη φάση έχει χαρακτήρες πρασινοσχιστολιθικής έως αμφιβολιτικής φάσης, Παλαιοζωικής ηλικίας και διαπιστώνεται στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του υποβάθρου της ενότητας Νότιων Κυκλάδων, το οποίο θεωρείται αντίστοιχο της Πελαγονικής.
- Η δεύτερη φάση είναι μεταμόρφωση υψηλής πίεσης - χαμηλής θερμοκρασίας (γλαυκοφανιτική) και η ηλικία της τοποθετείται σύμφωνα με τις ραδιοχρονολογήσεις στο Ηώκαινο. Παρατηρείται στα πετρώματα των Βόρειων και Νότιων Κυκλάδων.
- Η τρίτη φάση είναι πρασινοσχιστολιθική και έλαβε χώρα κατά το Ολιγόκαινο-Μειόκαινο, ταυτόχρονα με τη μαγματική άνοδο που έδωσε στους πλουτωνικούς όγκους, και ήταν ανάδρομη ως προς την προηγούμενη γλαυκοφανιτική μεταμόρφωση, την οποία και αλλοιώνει σε πολλές περιοχές πολύ αισθητά. Η φάση αυτή αναγνωρίζεται επίσης στα πετρώματα των ενοτήτων Βόρειων και Νότιων Κυκλάδων.

Τέλος, όσον αφορά την τεκτονική παραμόρφωση της μάζας, από τις μέχρι σήμερα μελέτες που έχουν γίνει στα νησιά των Κυκλάδων, διαπιστώθηκαν οι παρακάτω φάσεις πτυχώσεων των πετρωμάτων της Αττικοκυκλαδικής ζώνης (Μουντράκης, 1985):

- Η πιο παλιά παραμόρφωση που έχει αναγνωριστεί είναι μια φάση που προκάλεσε ισοκλινείς πτυχές, κατακείμενες, με τα αξονικά τους επίπεδα παράλληλα στη γενική φύλλωση των πετρωμάτων. Η διεύθυνση των αξόνων των πτυχών αυτών είναι γενικά ΒΑ-ΝΔ. Η ηλικία της φάσης πτυχώσεων αναφέρεται ως Άνω Ιουρασική – Κάτω Κρητιδική, αλλά έχουν εκφρασθεί και άλλες γνώμες που τη θεωρούν Παλαιοζωική.
- Μια δεύτερη φάση πτυχώσεων, η οποία προκάλεσε επίσης ισοκλινείς πτυχές, με διευθύνσεις αξόνων που είναι διεσπαρμένες ΒΑ-ΝΔ έως Α-Δ. Συγχρόνως με τις πτυχές αυτές, δημιουργήθηκε μια γράμμωση από τον προσανατολισμό του γλαυκοφανή. Πρόκειται για φάση συμμεταμορφική ως προς τη μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων (γλαυκοφανιτική), η οποία έλαβε χώρα στο Ηώκαινο.
- Μια τρίτη φάση, η οποία περιλαμβάνει πτυχές ανοιχτές με διευθύνσεις αξόνων μεταξύ 30° – 50°.
- Μια τελική παραμόρφωση, η οποία εκφράζεται με πτυχές τύπου knick ή πτυχές πολύ μεγάλης καμπυλότητας, οι άξονες των οποίων έχουν βασική διεύθυνση Β-Ν ή ΒΔ-ΝΑ.

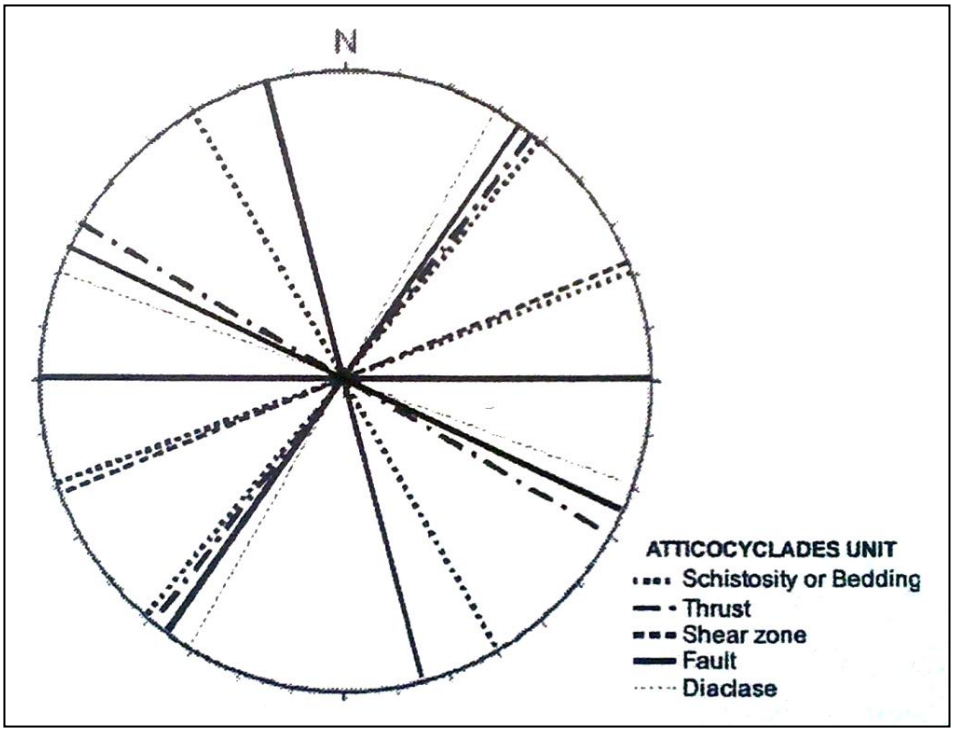


*Εικόνα 4.8: Χάρτης του χώρου της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης, στον οποίο απεικονίζονται οι περιοχές εξάπλωσης των τριών τύπων μεταμόρφωσης. 1: πλουτωνίτες Μειόκαινου, 2: πλουτωνίτες Ολιγόκαινου – Μειόκαινου, 3: πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση Ολιγόκαινου – Μειόκαινου, 4: μεταμόρφωση HP/LT (γλαυκοφανιτική) Ηωκαίνου, 5: περιοχές όπου διακρίνεται η επίδραση της νεότερης πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης επί της παλαιότερης γλαυκοφανιτικής, 6 και 7: μεταμορφωμένα πετρώματα άγνωστης τοποθέτησης και μεταμόρφωσης, 8: Τεταρτογενή ηφαιστειακά πετρώματα (*Altherr *et al., 1982).*

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, οι δύο τελευταίες φάσεις παραμόρφωσης, έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια ή μετά την πρασινοσχιστολιθική ανάδρομη μεταμόρφωση του Μειόκαινου. Τέλος, τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν το τεκτονικό και μικροτεκτονικό καθεστώς της Αττικοκυκλαδικής μάζας παρατίθενται στον Πίνακα 4.1 και την Εικόνα 4.9.

Πίνακας 4.1: Τεκτονικά στοιχεία της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης (Migiros et al., 2007, με τροποποιήσεις).

ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΤΤΙΚΟΚΥΚΛΑΔΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ	
Στρώση ή Σχιστότητα	Β30^{o}Δ / 50°-60° ΒΑ Β70^{o}Α / 20°-30° ΒΔ ή ΝΑ Β40^{o}Α / 40°-50° ΝΑ ή ΒΔ
Άξονες πτύχωσης	ΒΑ-ΝΔ έως Α-Δ Β-Ν ή ΒΔ-ΝΑ
Επωθήσεις	Β50^{o}-70°Δ / 50° ΒΑ ή ΝΔ Β30^{o}-50°Α / 40° ΒΔ ή ΝΑ
Διατμητικές ζώνες	Β60^{o}-80°Α / 60°-70° ΒΔ ή ΝΑ
Ρήγματα / Ρηξιγενείς ζώνες	Β60^{o}-70°Δ / 60°-70° ΝΔ ή ΒΑ Β30^{o}-40°Α / 60°-70° ΝΑ ή ΒΔ Β10^{o}-20°Δ / 70°-80° ΒΑ ή ΝΔ Α-Δ / 70°-80° Ν ή Β
Διακλάσεις	Β20^{o}-40°Α / 70°-80° ΝΑ ή ΒΔ Β60^{o}-80°Δ / 70°-80° ΝΔ ή ΒΑ



Εικόνα 4.9: Ροδοδιάγραμμα των τεκτονικών στοιχείων της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης, το οποίο προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα 4.1 (Migiros et al., 2007).

4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ

4.2.1 Γενικά

Η νήσος Νάξος μπορεί να περιγραφεί γενικά ως ένας ελλειπτικός δόμος, κύριας διεύθυνσης Β15ΟΑ, ο οποίος αποτελείται από μεταμορφωμένα και μαγματικά πετρώματα διαφορετικής ηλικίας και παραμορφώσεως, μειοκαινικά αλλόχθονα μολασσικά ιζήματα και πυριγενή πετρώματα και από νεότερα, κυρίως χερσαία, πλειοκαινικά και πλειστοκαινικά ιζήματα.

Το μεγαλύτερο τμήμα της Νάξου, και κυρίως το ανατολικό και το νότιο, καταλαμβάνεται από μια σειρά μεταμορφωμένων μεσοζωικών ιζημάτων πλατφόρμας, τα οποία συμμετείχαν στην αλπική ορογένεση σε περιβάλλον σύγκλισης λιθοσφαιρικών πλακών. Τα μεταμορφωμένα αυτά πετρώματα πρόκειται κυρίως για μάρμαρα εναλλασσόμενα με μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και δολομίτες, τα οποία παρουσιάζουν μια ζωνώδη κατανομή διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ περίπου, η οποία συμπίπτει με αυτή της βασικής οροσειράς του νησιού (όρος Ζας). Το δυτικό τμήμα της νήσου χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση γρανοδιορίτη τύπου Ι, του οποίου η επαφή με το μεταμορφωμένο σύμπλεγμα έχει διεύθυνση Β-Ν. Επίσης στο ίδιο τμήμα έχουμε την εμφάνιση της αλλόχθονης σειράς πετρωμάτων, η οποία συνίσταται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες, διαβάσες, γάββρους και υπερβασικά πετρώματα.

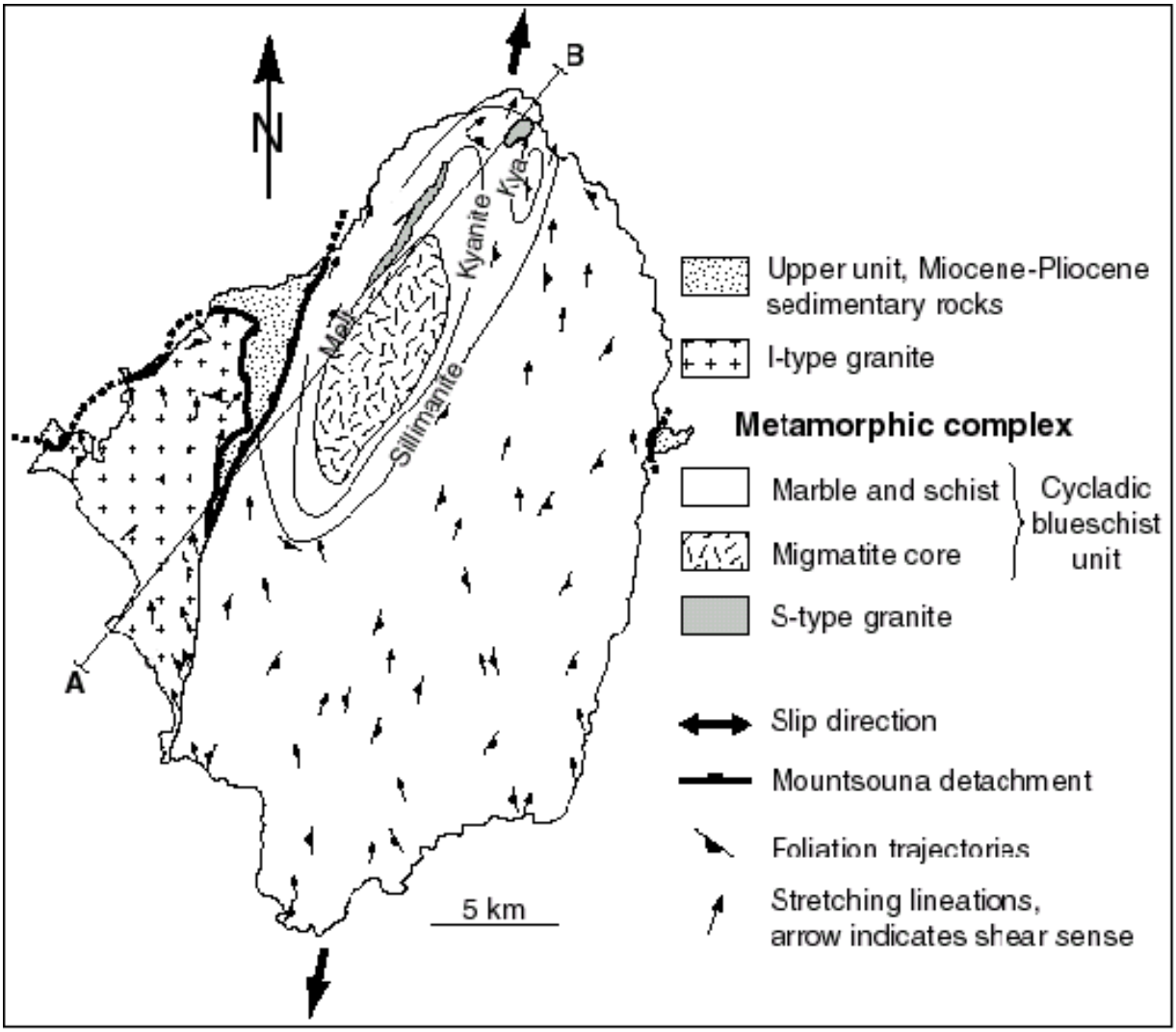
Γενικά, έχοντας υπόψη την παραπάνω γεωγραφική κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών, μπορούν να αναγνωριστούν τρεις κύριες ενότητες στο νησί (Brichau, 2004, Partsinevelou et al., 2011), η ανώτερη μη μεταμορφωμένη ενότητα, η ενότητα των κυκλαδικών κυανοσχιστόλιθων και ο όγκος του γρανοδιορίτη (Εικόνα 4.10).

Η ανώτερη ενότητα, η οποία αποτελείται από την αλλόχθονη σειρά πετρωμάτων της Κυκλαδικής ενότητας και τις μεταλπικές αποθέσεις, πρόκειται για ένα πολύ λεπτό και μη μεταμορφωμένο κάλυμμα, το οποίο αποτελείται από ιζηματογενή πετρώματα του Ανώτερου Τριτογενούς, του Ολιγόκαινου - Μειόκαινου, του Νεογενούς του Τεταρτογενούς και επικαλύπτει ασύμφωνα την ενότητα των κυανοσχιστόλιθων και τον όγκο του γρανοδιορίτη.

Η ενότητα των κυκλαδικών κυανοσχιστόλιθων πρόκειται ουσιαστικά για τους σχηματισμούς που ανήκουν στην ενότητα Νότιων Κυκλάδων, και πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ένα μεταμορφωμένο συγκρότημα, το οποίο χαρακτηρίζεται κυρίως από την εμφάνιση του μιγματιτικού δόμου του νησιού, ο οποίος περιβάλλεται από μια πολυπτυχωμένη σειρά μαρμάρων, μεταπηλιτών, σχιστόλιθων, γνευσίων και αμφιβολιτών. Η σειρά αυτή στα κατώτερα τμήματά της κοντά στο μιγματίτη, έχει έντονα μεταμορφωμένα και πτυχωμένα πετρώματα αμφιβολιτικής σύστασης, φακούς και υπερβασίτες, ενώ στο ανώτερο μέρος της σειράς αυτής έχουμε την εμφάνιση μεταβωξιτών (κοιτάσματα σμύριδας) και

μετακροκαλοπαγούς (Schuiling & Kreulen, 1979, Παπανικολάου, 1986, Ευελπίδου 2001, Partsinevelou et al., 2011).

Τέλος, ο ορεινός όγκος του γρανοδιορίτη εμφανίζεται στα δυτικά του νησιού και αποτελείται από έναν γρανίτη τύπου I, ο οποίος διεισδύει στην ενότητα των κυανοσχιστολίθων, ενώ μη παραμορφωμένες διεισδύσεις, κυρίως γρανιτών τύπου S, εμφανίζονται στο βόρειο τμήμα του νησιού (Γαλανού & Ρόκκος, 1999).



Εικόνα 4.10: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της νήσου Νάξου, όπου είναι εμφανείς οι τρεις κύριες ενότητες, η ανώτερη μη μεταμορφωμένη ενότητα, η ενότητα των κυκλαδικών κυανοσχιστολίθων και ο όγκος του γρανοδιορίτη (Brichau, 2004).

4.2.2 Λιθοστρωματογραφία

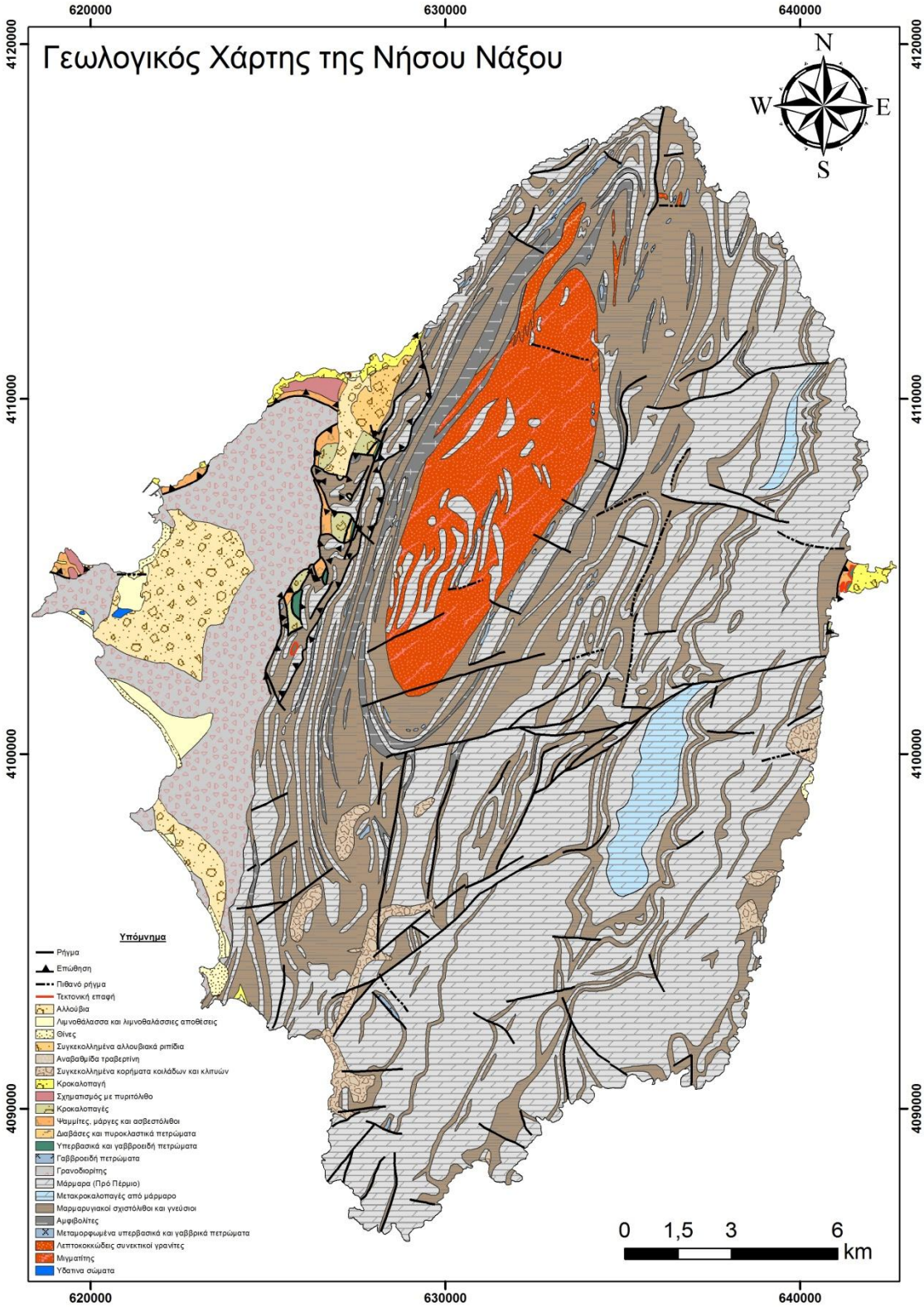
Όπως αναφέρθηκε, το γεωλογικό υπόβαθρο της νήσου Νάξου αποτελείται από μεταμορφωμένα και μαγματικά πετρώματα ηλικίας Παλαιοζωικού ή κατώτερου Μεσοζωικού αιώνα με επικράτηση γνεύσιων, σχιστόλιθων, μαρμάρων, γρανιτών και μιγματιτών. Σε ασυμφωνία επάνω σε αυτά επικάθονται νεώτεροι σχηματισμοί τριτογενούς και πλειοκαινικής ηλικίας, κυρίως κροκαλοπαγή μάργες, ψαμμίτες και ασβεστόλιθοι. Τέλος, υπάρχουν οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις κυρίως στα δυτικά και νότια του νησιού αποτελούμενες από άμμους, αργίλους, χαλαρά κροκαλοπαγή και θίνες, προϊόντα αποσαθρώσεως και μεταφοράς των βασικών πετρωμάτων του νησιού.

Σύμφωνα με τον Παπανικολάου (1986), στη γεωλογική διαμόρφωση της νήσου Νάξου συμμετέχουν κυρίως αλπικοί σχηματιμοί, οι οποίοι ανήκουν στην Κυκλαδική ενότητα και στην ενότητα Νότιων Κυκλάδων. Επίσης έχουμε την εμφάνιση μόλασσας στο δυτικό τμήμα του νησιού, η οποία βρίσκεται έντονα τεκτονισμένη στην οροφή των αλπικών σχηματισμών (μη μεταμορφωμένη ενότητα) και σε άμεση επαφή με τα υποκείμενα μεταμορφωμένα πετρώματα, και στην περίπτωση της Νάξου με το γρανοδιορίτη.

Σύμφωνα με την παραπάνω κατανομή και λαμβάνοντας υπόψη το γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε (Φύλλο Νάξος, Jansen, 1973) κλίμακας 1:50.000 (Εικόνα 4.11) προκύπτει ότι στη νήσο Νάξο, παρατηρούνται οι εξής ομάδες γεωλογικών σχηματισμών, από τη νεότερη προς την παλαιότερη:

- Μεταλπικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αντιστοιχούν στις Τεταρτογενείς αποθέσεις και στις αποθέσεις του Νεογενούς.
- Μόλασσα, η οποία αντιστοιχεί στους σχηματισμούς ηλικίας Ολιγόκαινου-Μειόκαινου και Ανώτερου Τριτογενούς.
- Αλπικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αντιστοιχούν στην Κυκλαδική ενότητα και πρόκειται για μη μεταμορφωμένα κρυσταλλικά πετρώματα.
- Η διείσδυση του γρανοδιορίτη ηλικίας Ανώτερου Μειόκαινου, η οποία δεν σχετίζεται με κάποια γεωτεκτονική ενότητα.
- Αλπικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αντιστοιχούν στην ενότητα Νότιων Κυκλάδων και πρόκειται για τα μεταμορφωμένα πετρώματα της νήσου.

Αναλυτικά, η λιθοστρωματογραφία των σχηματισμών, σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση, παρουσιάζεται στις αμέσως επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 4.11: Γεωλογικός χάρτης της νήσου Νάξου (Jansen, 1973, με τροποποιήσεις).

4.2.2.1 Μεταλπικοί σχηματισμοί

4.2.2.1.1 Τεταρτογενείς αποθέσεις

Οι αποθέσεις Τεταρτογενούς ηλικίας, είναι οι ανώτεροι στρωματογραφικά γεωλογικοί σχηματισμοί, που συμμετέχουν στη γεωλογική διαμόρφωση της νήσου Νάξου, και εμφανίζονται στο δυτικό τμήμα αυτής. Πρόκειται για αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται κυρίως από άμμους, ιλύες, αμμώδη πηλό και φακούς χαλικιών και κροκάλων. Στις περιοχές των ελωδών εκτάσεων και των μικρών λιμνοθαλασσών (π.χ. Αλυκή) και εντός των αμμωδών κυρίως αποθέσεων, συναντώνται οργανικά υλικά και περιλαμβάνουν στρώσεις με κίσσηρη και γύψο. Κατά μήκος των ακτών αναπτύσσονται αμμοθίνες από λεπτόκοκκες άμμους, οι οποίες περιέχουν διάφορα βαρέα ορυκτά, προερχόμενα από την αποσάθρωση του γρανοδιορίτη, τον οποίο καλύπτουν ασύμφωνα. Το πάχος τους φτάνει από λίγα μέτρα μέχρι και λίγες δεκάδες μέτρα. Πιο αναλυτικά, οι τεταρτογενείς αποθέσεις που συναντώνται στην περιοχή μελέτης είναι οι εξής (Jansen, 1973, 1977):

- **Αλλούβια ($Q.al_1$)**

  Παράκτιες πεδιάδες από άμμο, ιλύ και ενίοτε χάλικες. Η επιφάνεια των κοιλάδων είναι περίπου 3 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το μέγιστο πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων φτάνει τα 10 m.

- **Λιμνοθάλασσα και λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις (Q.al)**

  Συνήθως αμμώδεις, ενίοτε μετά στρωμάτων πλουσίων σε κίσσηρη. Γύψος και πλούσιος σε μαγνήσιο ασβεστίτης είναι συνήθη. Βρέθηκε επίσης αραγωνίτης και δολομίτης. Σε περίοδο ξηρασίας σχηματίζεται ορυκτό άλας.

- **Θίνες (Q.θ)**

  Κύριο χαρακτηριστικό των θινών είναι ότι η άμμος είναι πλούσια σε μοσχοβίτη και συχνά εμφανίζει ραβδώσεις πλούσιες σε μαγνητίτη, γρανάτη, κορούνδιο, τουρμαλίνη, τιτανίτη, επίδοτο και κυανίτη.

- **Συγκεκολλημένα αλλουβιακά ριπίδια (Q.t)**

  Πρόκειται για αδιαβάθμητες κυρίως συγκεντρώσεις μαρμάρων, σχιστόλιθων, γνευσίων, μιγματίτη και αμφιβολίτη σε αμμώδη συνδετική ύλη. Το πάχος τους μπορεί να φτάσει μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα.

- **Αναβαθμίδα τραβερτίνη (Q.tr)**

  Μεταγενέστερη διάβρωση έχει ήδη επέλθει στην απόθεση τραβερτίνη, η οποία χαρακτηρίζεται από αφθονία απολιθωμένων φύλλων και φυτικών στελεχών. Το μέγιστο πάχος της κυμαίνεται περίπου στα 20 m.

4.2.2.1.2 Πλειστοκαινικά ιζήματα

Πρόκειται για πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων που αποτελούνται από τεμάχη, συνήθως μαρμάρων, σχιστόλιθων και σμύριδας, συγκολλημένα με ανθρακικό ή αμμώδες συνδετικό υλικό και αδρομερή κροκαλοπαγή με ενστρώσεις ψαμμιτών. Εμφανίζονται κυρίως στις δυτικές και ανατολικές ακτές (Παχιά Άμμος, Ψιλή Άμμος και Μουτσούνα), καθώς και στο νότιο τμήμα της νήσου (Αγιασσός). Πιο αναλυτικά, διακρίνουμε (Jansen, 1973, 1977):

- **Συγκολλημένα κορήματα κοιλάδων και κλιτύων (Pt.s)**

  Τεμάχη, κυρίως μαρμάρου, σχιστόλιθου και σμύριδας, σε ευθρόφαιο ανθρακικό συνδετικό υλικό. Αυτό το συνδετικό υλικό βρίσκεται στα πληρώματα των καρστικών ρωγμών και περιέχει χερσαία πλειστοκαινική πανίδα απολιθωμάτων μικρών σπονδυλωτών. Το πάχος τους κυμαίνεται μεταξύ 0,1 m και 5 m.

- **Κροκαλοπαγή (Pt.c)**

  Πολύ αδρομερή κροκαλοπαγή με παρενεστρωμένους χονδρόκοκκους ψαμμίτες. Τα καλά αποστρογγυλωμένα συστατικά προέρχονται από όλους τους παλαιότερους σχηματισμούς του νησιού, αλλά κυρίως από τα κατά τόπους υποκείμενα πετρώματα. Η ηλικία τους πιθανολογείται ότι είναι πλειστοκαινική, ενώ το πάχος τους φτάνει τα 50 m περίπου.

4.2.2.1.3 Πλειοκαινικά ιζήματα

Τα πλειοκαινικά ιζήματα του νησιού, αν και ανήκουν στους μεταλπικούς σχηματισμούς της νήσου, λόγω της ασύμφωνης επαφής τους με τις παραπάνω σειρές των πλειστοκαινικών και τεταρτογενών ιζημάτων, διαχωρίζονται και χαρακτηρίζονται ως νεοαυτόχθονα. Συγχρόνως, τα ιζήματα αυτά έρχονται σε επαφή επίσης ασύμφωνα με τα παλαιότερα στρώματα και για το λόγο αυτό δεν συγκαταλέγονται στους σχηματισμούς που αποτελούν τη μόλασσα.

Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σχηματισμό που περιέχει πυριτόλιθους, ηλικίας Ανώτερου Πλειόκαινου (Pl.ch), ο οποίος συνίσταται από κροκαλοπαγή, χονδρόκοκκες

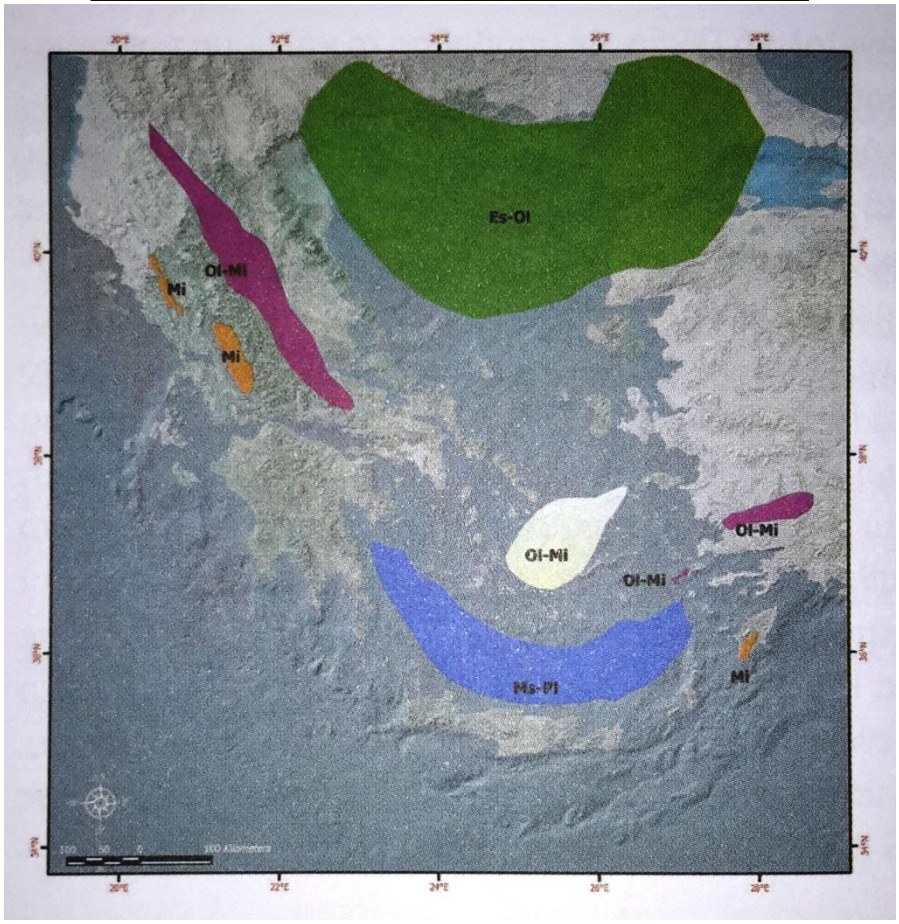
αρκόζες και ψαμμίτες, που κατά το μεγαλύτερο μέρος τους είναι πλήρως πυριτιωμένα. Μέρη του σχηματισμού αυτού φαίνονται να αποτελούνται από απευθείας ιζήματα διοξειδίου του πυριτίου, με πυριτιωμένα στελέχη καλαμών και κατάλοιπα φυκιών. Οι ορίζοντες των κροκαλοπαγών περιέχουν υλικό προερχόμενο από το γρανοδιορίτη και το μεταμορφωμένο σύμπλεγμα. Ο σχηματισμός αυτός είναι περισσότερο διερρηγμένος από τα πλειστοκαινικά πετρώματα, αλλά λιγότερο από αυτά του Τριτογενούς (Jansen, 1973, 1977).

Στη νήσο Νάξο παρατηρούνται δύο εμφανίσεις του σχηματισμού αυτού, στα δυτικά αυτής. Η πρώτη εμφάνιση στην Στυλίδα, το κατώτερο μέρος της συνίσταται από κλαστικά ιζήματα με ορίζοντες πυριτόλιθου, ενώ το ανώτερο μέρος της συνίσταται κυρίως από πυριτόλιθους. Η δεύτερη εμφάνιση στην Κοντίλη, συνίσταται κυρίως από ασβεστόλιθο, μάργα, ψαμμίτη και κροκαλοπαγές, ενίοτε με φακούς πυριτόλιθων. Τέλος, το πάχος του σχηματισμού γενικά και στις δύο εμφανίσεις δύναται να φτάνει τα 180 m.

4.2.2.2 Μόλασσα

Στο δυτικό τμήμα του νησιού, παρατηρείται η εμφάνιση μιας σειράς αλλόχθονων τριτογενών ιζημάτων, τα οποία αντιστοιχούν σε τμήμα της Κυκλαδικής μόλασσας. Η Κυκλαδική μόλασσα είναι κάτω μειοκαινικής ηλικίας, αλλόχθονη μαζί με το μη μεταμορφωμένο υπόβαθρό της πάνω στις μεταμορφωμένες Κυκλαδικές ενότητες και θεωρείται πιθανή προέκταση της Μεσοελληνικής Αύλακας, (Παπανικολάου, 1986). Τα ιζήματα αυτά είναι έντονα τεκτονισμένα είτε στην οροφή της μη μεταμορφωμένης σειράς, είτε και σε άμεση επαφή με την υποκείμενη μεταμορφωμένη σειρά (Εικόνα 4.12).

Τα ιζήματα αυτά αποτελούνται από εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, μάργων, ασβεστόλιθων και γραουβακών. Χαρακτηρίζονται από απουσία αδρόκοκκων συστατικών του κρυσταλλικού υποβάθρου της νήσου και συνίστανται από κροκάλες διαβασών, γάββρων, ραδιολαριτών, ασβεστόλιθων, ψαμμιτών και σχιστόλιθων. Διακρίνονται δύο σειρές, των ψαμμιτών-μαργών-ασβεστόλιθων και των κροκαλοπαγών με ενστρώσεις ψαμμιτών και μαργών. Συναντώνται στην περιοχή της Στυλίδας, στη Γαλήνη και στον Αγ. Θαλλέλαιο. Οι μεγάλες διαφορές των εμφανίσεων τους (τεκτονική θέση, συνδετική ύλη, κ.τ.λ.) σε τόσο περιορισμένη περιοχή πιθανώς να οφείλεται σε ταχείες μεταβολές των συνθηκών ιζηματογένεσης. Η μορφή τους και η τεκτονική τους διατάραξη οδηγούν στην πιθανότητα να πρόκειται για μικρά τεμάχη ενός καλύμματος που σχηματίσθηκε σε απομακρυσμένη από την τωρινή τους θέση περιοχή (Σ.Χ.Ο.Α.Π. Δήμου Δρυμαλίας, 2010).



Εικόνα 4.12: Οι κυριότερες μολασσικές λεκάνες του Ελληνικού Τόξου. 1: Ροδόπη - Βορείου Αιγαίου, 2: Μεσοελληνική Αύλακα, 3: Ηπείρου - Ακαρνανίας, 4: Κυκλάδων (Κατώτερο Μειόκαινο), 5: Κρητικού πελάγους (Παπανικολάου, 1986, Παπανικολάου, 2014).

Πιο αναλυτικά, οι σχηματισμοί που αποτελούν τη μόλασσα είναι οι εξής (Jansen, 1973, 1977):

- **Κροκαλοπαγές Άνω Τριτογενούς (Pl.c)**

  Πολυγενές κροκαλοπαγές με ενστρώσεις μαργών, ψαμμιτών και ασβεστόλιθων, με τους τελευταίους συχνά να περιλαμβάνουν άφθονους νουμουλίτες. Επίσης απαντώνται φακοί λατυποπαγούς διαβάση, πράσινου ή πορφυρού χρώματος.

  Τα συστατικά του κροκαλοπαγούς είναι πολύ καλά αποστρογγυλωμένα, ενίοτε δε, σχεδόν στιλβωμένα. Συνίσταται από σερπεντινιωμένα υπερβασικά πετρώματα, διαβάσες, ερυθρούς ιασπιλίτες, ασβεστόλιθους δίχως απολιθώματα, ψαμμίτες, μαργαϊκούς σχιστόλιθους, πράσινους πυριτόλιθους και τεφρούς ασβεστόλιθους, όπου τα συστατικά συνήθως δεν είναι μεγαλύτερα από το μέγεθος γροθιάς. Τα ιζήματα έχουν αποτεθεί σε περιβάλλον ηπειρωτικό ή αβαθούς θάλασσας. Η σειρά αυτή είναι τεκτονισμένη, και καταλήγει ενίοτε σε τεθραυσμένες κροκάλες. Πλησίον της Μουτσούνας, επιπρόσθετα στα παραπάνω συστατικά, περιέχονται κροκάλες μαύρου ασβεστόλιθου του Ανώτερου Περμίου, με άφθονη πανίδα. Νότια της Μουτσούνας, τεμάχη του ίδιου ασβεστόλιθου Περμικής ηλικίας, όπως επίσης και σερπεντίνης βρίσκονται κατά μήκος της επιφάνειας επωθήσεως. Τα τρηματοφόρα στους λευκότεφρους ασβεστολιθικούς φακούς και τις κροκάλες έχουν προφανώς μεταφερθεί. Το μέγιστο πάχος του συγκεκριμένου σχηματισμού φτάνει τα 250 m.

- **Ψαμμίτες, μάργες και ασβεστόλιθοι Ολιγόκαινου - Μειόκαινου (Ol-M.s)**

  Στο σχηματισμό αυτό αναγνωρίζονται τρεις φάσεις, οι οποίες υποδεικνύουν πιθανώς μεταβολή από ηπειρωτικές σε αβαθείς θάλασσες ή λίμνες. Το συνολικό εκτιθέμενο πάχος του σχηματισμού αυτού φτάνει τα 200 m.

  Το κατώτερο μέρος είναι κυρίως ερυθρού χρώματος φυλλώδη αμμώδη ιζήματα, στα οποία έχουν παρατηρηθεί διασταυρούμενη στρώση και στροβιλώδη ρεύματα, ενώ δεν βρέθηκαν απολιθώματα.

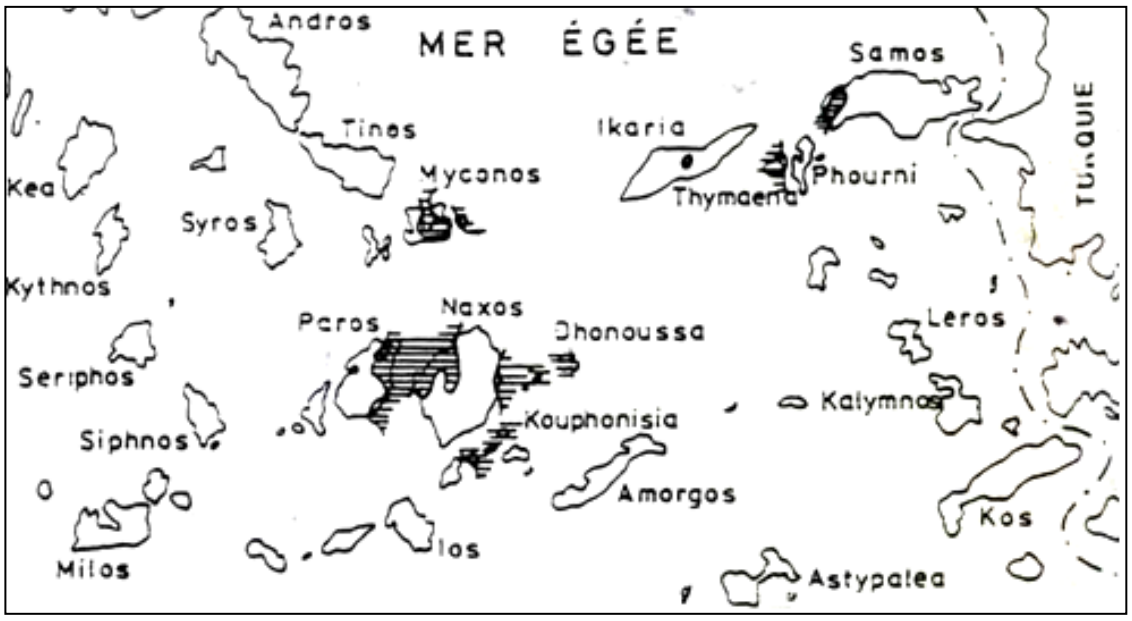
  Το μέσο τμήμα αποτελείται από τεφρούς ψαμμίτες ενίοτε με φυτικά κατάλοιπα και μικρών στρωματιδίων άνθρακα και γραουβακών. Βρέθηκαν επίσης φακοί κροκαλοπαγούς με λευκότεφρα νουμουλιτοφόρα ασβεστολιθικά συστατικά και μάργες με ορίζοντες ερυθρής γύψου. Επίσης παρατηρήθηκε διασταυρούμενη στρώση μικρής κλίμακας και πληρωμένα κανάλια διαβρώσεως.

  Το ανώτερο μέρος αποτελείται από έναν τεφρό έως κίτρινο ψαμμίτη, με ενστρώσεις μαργών και ασβεστόλιθων και πολύ λεπτή φυλλώδη στρώση.

4.2.2.3 Κυκλαδική ενότητα

Στο χώρο των Κυκλάδων και σε μικρές εμφανίσεις, παρατηρούνται μη μεταμορφωμένα αλπικά πετρώματα, τα οποία στο σύνολό τους αποτελούν την Κυκλαδική ενότητα (Εικόνα 4.13). Η ενότητα αυτή είναι αποδεδειγμένα τεκτονισμένη μέχρι και το Μέσο έως Ανώτερο Μειόκαινο (Τορτόνιο), με παραμόρφωση λόγω εφαπτομενικού τεκτονισμού. Το γεγονός αυτό διαπιστώνεται ιδιαίτερα στη νήσο Νάξο, λόγω της παρουσίας της μόλασσας (Παπανικολάου, 1986).

Στην περιοχή μελέτης, οι αλπικοί σχηματισμοί αντιστοιχούν και στα μη μεταμορφωμένα κρυσταλλικά πετρώματα, τα οποία αναλύονται στην αμέσως επόμενη παράγραφο.



Εικόνα 4.13: Οι κυριότερες εμφανίσεις του μη μεταμορφωμένου Κυκλαδικού τεκτονικού καλύμματος στο Αιγαίο (Papanikolaou, 1986).

4.2.2.3.1 Μη μεταμορφωμένα κρυσταλλικά πετρώματα

Πάνω από τη μεταμορφωμένη σειρά πετρωμάτων και κοντά στην επαφή της γρανοδιοριτικής διείσδυσης με τη μεταμορφωμένη σειρά, συναντώνται, σε μικρές εμφανίσεις, υπολείμματα μη μεταμορφωμένων κρυσταλλικών πετρωμάτων, τα οποία αποτελούνται από περιδοτίτες, γάββρους, σερπεντινίτες, διαβάσες και πυροκλαστικά υλικά. Τα συγκεκριμένα πετρώματα, είναι αλλόχθονα όπως και η μόλασσα, και θεωρούνται ότι είναι τμήματα των Πελαγονικών και οφιολιθικών καλυμμάτων.

Πιο αναλυτικά στη σειρά αυτή διακρίνουμε τους εξής σχηματισμούς (Jansen, 1973, 1977):

- **Διαβάσες και πυροκλαστικά πετρώματα (δ)**

  Πορφυροερυθρά και πράσινα ηφαιστειογενή πετρώματα με φαινοκρυστάλλους πλαγιόκλαστου. Στους φαινοκρυστάλλους αυτούς είναι δυνατόν να παρατηρηθούν όλα τα στάδια χλωριτιώσεως και επιδοτιώσεως. Η κύρια μάζα συνίσταται κυρίως από πλαγιόκλαστα και αιματίτη. Στο κατώτερο μέρος βρέθηκαν φακοί ψαμμίτη, κροκαλοπαγούς και πυριτόλιθου, ενώ ο διαβάσης είναι συνήθως λατυποποιημένος.

- **Υπερβασικά και γαββροειδή πετρώματα (σ)**

  Τα υπερβασικά πετρώματα εμφανίζονται σε όλα τα στάδια της σερπεντινιώσεως. Ένας ιδιόμορφος κονδυλώδης περιδοτίτης βρίσκεται κοντά στο Γαλανάδο, όπου οι σκοτεινότεροι πυρήνες των κονδύλων συνίσταται ακόμη εν μέρει από πρωτογενή ολιβίνη, ενώ η ανοικτότερου χρώματος κύρια μάζα είναι αποκλειστικά σερπεντίνης. Ο χρωμίτης είναι ένα κοινό επουσιώδες ορυκτό, ο σερπεντίνης είναι σχεδόν αποκλειστικά αντιγορίτης και μόνο σπάνια βρέθηκε ινώδης χρυσοτίλης. Ο χλωρίτης και ο αμφίβολος έχουν επίσης παρατηρηθεί σε λεπτές τομές.

- **Γαββροειδή πετρώματα (γβ)**

  Μικρές εμφανίσεις, κατά μήκος της επιφάνειας επωθήσεως, από πλαγιόκλαστο και αμφίβολο, δευτερογενή χλωρίτη, ασβεστίτη και επίδοτο, ισχυρά τεκτονισμένα.

4.2.2.4 Γρανοδιοριτική διείσδυση

Όπως φαίνεται από το γεωλογικό χάρτη της εικόνας 4.11, το δυτικό τμήμα του νησιού καλύπτεται από μια γρανοδιοριτική διείσδυση του Ανώτερου Μειόκαινου. Η μεταμόρφωση του συγκεκριμένου σχηματισμού είναι μεταγενέστερη της γενικής και είναι ηλικίας Μεσοζωικού ή Κατώτερου Τριτογενούς. Η επαφή μεταξύ του γρανοδιορίτη και του μεταμορφωμένου συστήματος έχει διεύθυνση Β-Ν. Στο νοτιότερο τμήμα του νησιού φαίνεται ο γρανοδιορίτης να διεισδύει εντός του μεταμορφωμένου συστήματος, ενώ βορειότερα η επαφή αυτή γίνεται τεκτονική και καλύπτεται κατά θέσεις από ιζήματα και από διάβασες και περιδοτίτες. Σύμφωνα με τη γενική γεωλογική εικόνα της Νάξου η στενή επαφή γρανοδιορίτη και μεταμορφωμένου συστήματος δεν επέτρεψε στο βαθύτερα ευρισκόμενο υπερβασικό μάγμα να διεισδύσει σ' αυτούς, οπότε και θεωρούνται το υπόβαθρο των μειοκαινικών και νεώτερων σχηματισμών (Jansen, 1977, ΥΠ.ΑΝ, 2005).

Αναλυτικότερα, η διείσδυση στο δυτικό μέρος του νησιού ποικίλει σε σύσταση, από γρανίτη μέχρι γρανοδιορίτη. Διακόπτεται συχνά από λευκοκρατικές μεγάλες και μικρές φλέβες.

Παρουσιάζει συνήθως παράλληλη διευθέτηση (foliation), η οποία δύναται να καταστεί πολύ σαφής κοντά στα όριά του (Jansen, 1977).

Η παραπάνω διευθέτηση φαίνεται να ακολουθεί το γενικό σχήμα της διείσδυσης. Όπου αυτή καθίσταται σαφής, συνοδεύεται με δευτερογενή χλωριτίωση, επιδοτιτίωση και αλβιτίωση. Τα κύρια ορυκτά είναι χαλαζίας, καλιούχος άστριος, πλαγιόκλαστο, βιοτίτης και κεροστίλβη. Είναι δυνατόν να υπάρχει και κλινοπυρόξενος. Ένα εμφανές επουσιώδες ορυκτό, το οποίο είναι δυνατόν να είναι άφθονο, είναι ο μελιτόχρωος ιδιόμορφος τιτανίτης, ο οποίος συχνά φτάνει το μέγεθος λίγων χιλιοστών και μπορεί να αναγνωριστεί εύκολα με γυμνό μάτι. Κοντά στην διεισδυτική του επαφή με τη μεταμορφωμένη σειρά, αναπτύσσεται μια απλιτική συνοριακή φάση, με άφθονο μαύρο τουρμαλίνη. Κοντά στην προ-πλειοκαινική επιφάνεια επωθήσεως απαντάται μυλονιτοποίηση, η οποία οδηγεί ενίοτε στο σχηματισμό ασυνεχών μελανών γραμμών από ψευδοταχυλίτη (Jansen, 1977, Χαρμανίδης 2002).

4.2.2.5 Μεταμορφωμένα πετρώματα

Η συγκεκριμένη σειρά μεταμορφωμένων πετρωμάτων χρονολογείται προ του Περμίου, το συνολικό πάχος της ανέρχεται στα 6000 m και ανήκει στη γεωτεκτονική ενότητα των Νότιων Κυκλάδων. Πιο συγκεκριμένα η σειρά αυτή, από τα νεότερα προς τα κατώτερα μέλη της, αποτελείται από τους εξής γεωλογικούς σχηματισμούς (Jansen, 1973, 1977):

- **Μάρμαρα (P.mr)**

  Στα στρωματογραφικά κατώτερα μέρη της μεταμορφωμένης σειράς, τα περισσότερα μάρμαρα είναι χονδροκρυσταλλικά και λευκά. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ορατή μια παχιά στρώση, η οποία συχνά χαρακτηρίζεται από λεπτές ζώνες ταινιών αμφιβολιτών και βιοτιτικών-κεροστιλβικών γνευσίων. Τα δολομιτικά μάρμαρα σπανίζουν στους υψηλότερους βαθμούς μεταμόρφωσης και, όπου εμφανίζονται, συνοδεύονται κυρίως από τρεμολίτη. Άλλα ορυκτά που βρίσκονται στα μάρμαρα είναι φλογοπίτης, σκαπόλιθος, γροσσουλαρίτης, διοψίδιος, βεζουβιανίτης και τιτανίτης. Το επίδοτο ουσιαστικά απουσιάζει στους βαθύτερους ορίζοντες μαρμάρου.

  Στα στρωματογραφικά υψηλότερα μέρη της μεταμορφωμένης σειράς, τα μάρμαρα είναι πλέον λεπτόκοκκα. Τα ασβεστιτικά μάρμαρα είναι συνήθως πλέον αδρόκοκκα των δολομιτικών ίδιου βαθμού μεταμόρφωσης, λεπτοστρωματώδη και καλά στρωμένα σε ταινίες και έχουν συχνά κυανότεφρο χρώμα. Οι δολομίτες είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος συμπαγείς, χωρίς σαφή ένστρωση και είναι κιτρινόλευκοι. Τα μάρμαρα

περιέχουν ενστρώσεις ασβεστιτικών σχιστόλιθων, χλωριτοσερικιτικών σχιστόλιθων, ακτινο-χλωρο-επιδοτιτικών και γλαυκοφανιτικών σχιστόλιθων.

Όλα τα μάρμαρα παρουσιάζουν μάλλον ταχείες πλευρικές αλλαγές σε πάχος και σύσταση και τα περισσότερα από αυτά, πλην αυτών που βρίσκονται κοντά στο μιγματίτη, περιέχουν πολυάριθμες εμφανίσεις σμύριδας ή διάσπορου, οι οποίες συχνά φαίνονται να συγκεντρώνονται σε μερικούς ορίζοντες.

- **Μετακροκαλοπαγές εκ μαρμάρου (mr)**

  Ο σχηματισμός αυτός απαντάται σε δύο χωρισμένες μάζες, οι οποίες πιθανώς βρίσκονται σε αυτή τη στρωματογραφική θέση. Η βόρεια μάζα αποσφηνούται κατά μήκος της διευθύνσεως, ενώ η νοτιότερη μάζα εμφανίζεται στο υψηλότερο σημείο του άξονος ενός ευρέως αντίκλινου. Δεδομένου ότι οι γραμμές ίσου βαθμού μεταμόρφωσης δεν είναι αυστηρά παράλληλες προς την στρωματογραφία, η βορειότερη μάζα δείχνει έναν κάπως υψηλότερο βαθμό μεταμόρφωσης από την νοτιότερη μάζα. Ο σχηματισμός συνίσταται από ασβεστιτικές ή δολομιτικές λατύπες σε ανθρακική κύρια μάζα. Επιπρόσθετα των ανθρακικών κροκάλων, μεταηφαιστειακά, πιθανώς, πετρώματα απαντώνται επίσης ως κροκάλες. Στο νοτιότερο μέρος αποτελούνται από ακτινολιθο-επιδοτιτο-χλωριτο-μαγνητιτικά πετρώματα, ή ακτινολιθο-επιδοτιτο-χλωριτο-βιοτιτικών-κεροστιλιβικών σχιστόλιθων στο βορειότερο μέρος. Όλες οι κροκάλες είναι ισχυρά επιμηκυμένες κατά μήκος του άξονα b, ο οποίος είναι η κατεύθυνση της γραμμώσεως προσανατολισμού και πτυχών, με προσανατολισμό περίπου B15^{o}A.

  Το ανώτερο τμήμα του σχηματισμού χαρακτηρίζεται από την απουσία μεταηφαιστειακών κροκαλών και αποτελείται κυρίως από μικρές κυανότεφρους ασβεστιτικές κροκάλες σε δολιμιτικό κυρίως συνδετικό υλικό. Το μέγιστο πάχος του συγκεκριμένου σχηματισμού μπορεί να φτάσει τα 250 m.

- **Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι (msch)**

  Οι περισσότεροι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι φαίνονται να έχουν μια αρκετά κανονική πηλιτική σύσταση, αν και απαντώνται σχιστόλιθοι με ανθρακικά υλικά, χαλαζίτες και σχιστόλιθοι με αμφίβολο. Εντός της σειράς υπάρχει, συχνά, μια ταχεία πλευρική αλλαγή σε πάχος και λιθολογία. Κοντά στο μιγματιτικό δόμο απαντώνται συχνά άφθονες, απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες, σώματα χαλαζία είναι συνήθη, καθώς και επίσης διασταυρούμενες υδροθερμικές φλέβες γαλακτόχροου

χαλαζία. Οι γνεύσιοι πλησίον του μιγματίτη είναι συνήθως ζωνώδεις, βιοτιτικοί ή διμαρμαρυγιακοί, ενώ οι οφθαλμογνεύσιοι είναι σπανιότεροι. Με αυξανόμενο βαθμό μεταμόρφωσης είναι δυνατό να παρατηρηθεί μια μετάβαση από χλωριτικούς - σερικιτικούς σχιστόλιθους μέσω βιοτιτικών, προς κυανιτικούς κυανιτικούς - σιλλιμανιτικούς και σιλλιμανιτικούς σχιστόλιθους. Στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους εμφανίζεται γρανάτης σε όλη τη μεταμορφωμένη σειρά, αλλά δεν είναι συνήθως ορυκτό. Στους χαμηλότερους βαθμούς μεταμόρφωσης παρατηρείται ενίοτε χλωριτοειδής, ενώ ο σταυρόλιθος είναι σπάνιος στους μέσου βαθμού μεταμόρφωσης μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους. Κοντά στο νοτιοδυτικό άκρο του μιγματιτικού δόμου εμφανίζονται ο ένας παράπλευρα του άλλου, ανδαλουσίτης, κυανίτης και σιλλιμανίτης ενίοτε. Αν και οι περισσότεροι από τους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, στους χαμηλότερους βαθμούς μεταμόρφωσης είναι μάλλον κανονικοί, χλωριτικοί - σερικιτικοί - αλβιτικοί σχιστόλιθοι, έχει παρατηρηθεί ένας αριθμός εμφανίσεων γλαυκοφανιτικών σχιστόλιθων με παραγωνίτη, επίδοτο και γρανάτη. Ένας ιδιόμορφος ερυθρωπός σχιστόλιθος κοντά στην ανατολική ακτή της νήσου αποδεικνύεται ότι είναι πιεμοντιτοφόρος.

- **Αμφιβολίτες (ab)**

  Οι ζωνώδεις αμφιβολίτες εμφανίζονται ως παρεμβολές στη σειρά των σχιστόλιθων - μαρμάρων. Συνήθως φαίνεται ότι συνδέονται με στρώματα μαρμάρου. Η συνήθης ορυκτολογική παραγένεση είναι κεροστίλβη – πλαγιόκλαστο αν και απαντάται επίσης και γρανάτης, επίδοτο και διοψίδιος. Ο τιτανίτης είναι σύνηθες επουσιώδες ορυκτό. Οι αμφιβολίτες επίσης δείχνουν ταχεία πλευρική αλλαγή, η οποία λαμβάνει χώρα συχνότερα στη μεταμορφωμένη σειρά δυτικά του μιγματιτικού δόμου, παρά στην ανατολική πλευρά του.

- **Μεταμορφωμένα υπερβασικά και γαββρικά πετρώματα (σγβ)**

  Εντός των μεταμορφωμένων σειρών απαντάται ένας αριθμός επιμηκυμένων σωμάτων υπερβασικών πετρωμάτων, τα οποία, πιθανώς ανήκουν σε δύο ορίζοντες, ενώ συγχρόνως επιπρόσθετα των δύο αυτών οριζόντων υπάρχουν μερικά απομονωμένα σώματα. Τα μεγαλύτερα αυτών αριθμούν λίγα χιλιόμετρα κατά μήκος της διευθύνσεως και φτάνουν το μέγιστο πάχος των 100 περίπου μέτρων, αλλά δύναται να είναι τόσο μικρά όσο υπερβασικές σφαίρες μεγέθους γροθιάς στο περιβάλλον γνευσιακό πέτρωμα. Συνήθως χαρακτηρίζονται από τον σχηματισμό ζωνών αντίδρασης ενός ορυκτού στις επαφές των με τους περιβάλλοντες σχιστόλιθους ή γνεύσιους. Οι ζώνες

αυτές είναι δυνατόν να συνίσταται περιφερειακά από φλογοπίτη, ακολουθούμενου από ακτινόλιθο και στη συνεχεία από ανθοφυλλίτη, με ή χωρίς ζώνη τάλκου. Ενίοτε απαντάται επίσης ζώνη χλωρίτη. Τα σώματα κάθε αυτά είναι δυνατόν να ποικίλουν από σχεδόν καθαρούς δουνίτες ως περιδοτίτες πλούσιους σε πυρόξενο ή ακόμα και σε πυροξενίτες. Σε μια περίπτωση φαίνεται να υπάρχει μεταμορφωμένος μεταγάββρος. Ανάλογα προς το βαθμό μεταμορφισμού είναι δυνατόν να βρεθούν ευμεγέθεις κρύσταλλοι μαγνησίτη. Ακόμη και τα ενδότερα μέρη των μεγαλύτερων σωμάτων δείχνουν κάποια σχιστότητα, παράλληλα προς τη σχιστότητα των περιβαλλόντων αυτά σχιστόλιθων και γνευσίων. Η σχιστότητα αυτή διακρίνεται συνήθως από ωχροπράσινο χλωρίτη. Ο βαθμός μεταμόρφωσης των υπερβασικών αυτών σωμάτων συμφωνεί αρκετά με αυτόν των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Πλην μιας μικρής εμφάνισης στο νοτιοανατολικό μέρος της νήσου, η σερπεντινίωση και ο σχηματισμός πυκνών δολομιτικών φλεβιδίων φαίνεται να περιορίζεται στις επιγενείς ζώνες ρηγμάτων.

- **Λεπτοκοκκώδεις συντεκτονικοί γρανίτες (γ)**

  Οι συγκεκριμένοι γρανίτες βρίσκονται σε άμεση γενετική σχέση προς το μιγματίτη, ενώ βρίσκεται μικρός αριθμός λακκολιθικών στρωμάτων από λεπτοκοκκώδεις ανοιχτόχρωμους γρανίτες, οι οποίοι δείχνουν ευδιάκριτη γράμμωση παράλληλη προς την κύρια διεύθυνση των γραμμώσεων και του άξονα πτύχωσης. Τα σώματα αυτά, τα οποία περιορίζονται στο βορειότερο μισό του μιγματιτικού δόμου, περιέχουν ενίοτε πηγματοειδή τμήματα. Τα περισσότερα από τα φυλλόμορφα σώματα είναι διμαρμαρυγιακοί γρανίτες. Εγκλείσματα μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων από τα περιβάλλοντα πετρώματα, δεν είναι καθόλου σπάνια.

- **Μιγματίτης (μγ)**

  Πρόκειται για τυπικούς γνεύσιους και γρανίτες από ανάτηξη και νεφελοειδείς στους οποίους οι πλάκες βιοτίτη ακόμα δείχνουν κάποιο βαθμό παραλληλίας, συχνά όμως αρκετά συνεστραμμένη διάταξη. Πηγματικά σώματα αφθονούν, ισότροπα γρανιτικά τμήματα είναι ανώμαλα κατανεμημένα, ενώ ο βιοτίτης είναι δυνατόν να συγκεντρώνεται σε ραβδώσεις, ταινίες και ανώμαλου σχήματος σώματα. Ο συχνά ετερογενής αυτός σχηματισμός, φέρει όλες τις ενδείξεις ροής και όλα τα στάδια ανάτηξης. Το πέτρωμα συνίσταται κυρίως από χαλαζία, καλιούχο άστριο και μάλλον όξινο πλαγιόκλαστο με βιοτίτη. Σιλλιμανίτης και γρανάτης είναι δυνατόν να είναι πρόσθετες φάσεις, αλλά πρωτογενής μοσχοβίτης φαίνεται να απουσιάζει στο μεγαλύτερο μέρος του μιγματιτικού δόμου, εκτός των πηγματοειδών και

λευκογρανιτικών μερών. Στις απότομες πλευρές του μιγματιτικού δόμου, η έναρξη ανατηκτικών φαινομένων είναι μάλλον απότομη, ενώ πλησίον των νοτιότερων και βορειότερων άκρων είναι περισσότερο βαθμιαία.

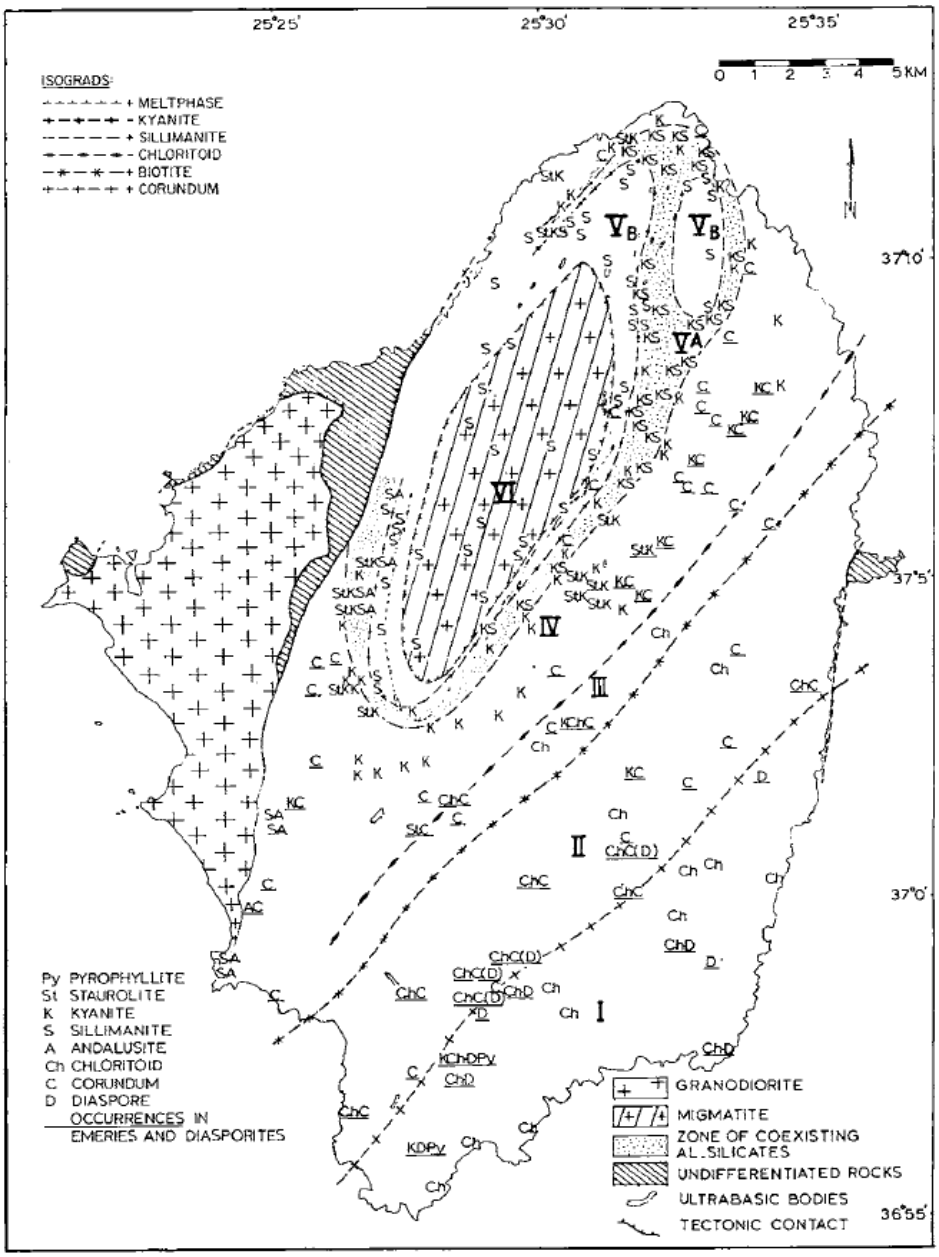
4.2.3 Μεταμόρφωση

Τα πετρώματα που συνιστούν το μεταμορφωμένο σύμπλεγμα της Νάξου, έχουν συμμετάσχει σε τουλάχιστον δύο διαφορετικά επεισόδια καθολικής μεταμόρφωσης αλπικού τύπου. Συνολικά αναφέρονται τέσσερα μεταμορφικά επεισόδια, τα οποία είναι τα εξής (Andriessen et al., 1979):

- Η πρώτη μεταμορφική φάση M1, η οποία έλαβε χώρα κατά το Ηώκαινο (45±5 m.a.) και είναι αποτέλεσμα συνθηκών υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας.
- Η δεύτερη μεταμορφική φάση M2 τύπου Barrow με μέσες πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες του Ανώτερου Ολιγόκαινου – Κατώτερου Μειόκαινου. Λόγω της ευρείας μεταμορφικής υπέρθεσης των νεότερων ορυκτών, τα οποία σχηματίστηκαν στη φάση αυτή, οι κυανοσχιστόλιθοι διατηρούνται μόνο στο νοτιοανατολικό τμήμα της νήσου. Με κριτήριο το βαθμό μεταμόρφωσης, η μεταμορφική φάση M2 διακρίνεται σε:
    - Μέσου βαθμού μεταμόρφωση, με επικράτηση των μαρμάρων, με βωξίτες και μετακροκαλοπαγή.
    - Μέσου έως υψηλού βαθμού μεταμόρφωση, με επικρατέστερους τους μεταπηλίτες και τους γνεύσιους, εναλλασσόμενους με μεταψαμμίτες, μάρμαρα και αμφιβολίτες.
    - Υψηλού βαθμού μεταμόρφωση στον πυρήνα του λευκογνευσίου με μερική ανάτηξη.
- Η τρίτη μεταμορφική φάση M3 σχετίζεται με τη διείσδυση του γρανοδιορίτη και χρονολογείται στα 11 Ma.
- Η τέταρτη ανάδρομη μεταμορφική φάση M4, είναι πιθανό να συνδέεται με νεότερες αλπικές εφιππεύσεις και η ηλικία της έχει προσδιοριστεί στα 10 Ma.

Ο Jansen (1973) χαρτογράφησε επτά ισόθερμες επιφάνειες στη νήσο Νάξο, οι οποίες αποτελούν τις ισόβαθμες ζώνες μεταμόρφωσης. Η χαρτογράφηση των καμπυλών αυτών στηρίχθηκε στην εμφάνιση ή στην εξαφάνιση ορισμένων ορυκτών δεικτών ή συνόλου

ορυκτών στη σμύριδα και τους μεταπηλίτες. Οι ισόβαθμες ζώνες αποτελούν αντίστοιχα στη ζώνη διάσπορου, στη ζώνη χλωρίτη – σερικίτη, στη ζώνη βιοτίτη – χλωριτοειδούς, στη ζώνη κυανίτη, στη ζώνη σιλλιμανίτη, στη ζώνη σιλλιμανίτη – κυανίτη και στη ζώνη μιγματίτη (Εικόνα 4.14, Πίνακας 4.2).



Εικόνα 4.14: Πετρολογικός χάρτης της νήσου Νάξου, ο οποίος εμφανίζει την κατανομή των αργιλικών ορυκτών και τις διάφορες μεταμορφικές ζώνες. I: ζώνη διάσπορου, II: ζώνη χλωρίτη – σερικίτη, III: ζώνη βιοτίτη – χλωριτοειδούς, IV: ζώνη κυανίτη, V_A: ζώνη σιλλιμανίτη, V_B: ζώνη σιλλιμανίτη – κυανίτη και VI: ζώνη μιγματίτη. Έχοντας υπόψη την αύξηση του βαθμού μεταμόρφωσης προς το κέντρο του μιγματιτικού δόμου, οι ισόβαθμες καμπύλες είναι αντίστοιχα του κορουνδίου, του βιοτίτη, του χλωριτοειδούς, του σιλλιμανίτη, του κυανίτη και της φάσης τήξης (Ben et al., 1976).

Πίνακας 4.2: Οι θερμοκρασίες των μεταμορφικών ζωνών γύρω από τον μιγματιτικό δόμο της νήσου Νάξου, από την περιφέρεια προς το δόμο (Wijbrans & McDougall, 1986).

Ζώνη	Ονομασία	Θ ^{0}C
I	Διάσπορου	≈330
II	Χλωρίτη - Σερικίτη	330 - 410
IIIA	Βιοτίτη - Χλωρίτη	410 - 460
IIIB	Δισθενούς - Κυανίτη	460 - 500
IV	Δισθενούς – Κυανίτη – Σιλλιμανίτη	500 - 560
V	Σιλλιμανίτη	560 - 720
VI	Ανάτηξης	>720

4.2.4 Τεκτονική

Η σημερινή τεκτονική δομή της νήσου Νάξου είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα προϋπαρχόντων συμπιεστικών δομών και εφελκυστικών - εκτατικών κινήσεων, που υπέστησαν τα πετρώματα μετά το Μειόκαινο και οι οποίες είναι παράλληλες με τη διάταξη του Ελληνικού Τόξου (Παπανικολάου, 1986). Από στις προϋπάρχουσες συμπιεστικές δομές υδρολογικό ενδιαφέρον έχει μόνο η σχιστότητα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Οι δομές, οι οποίες κυριαρχούν σήμερα είναι οι εφελκυστικές και ιδιαίτερα οι νεότερες θραυσιγενείς τεκτονικές δομές, που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο και στη ροή των υπόγειων υδάτων.

Ο μιγματιτικός δόμος συμπεριφέρεται σαν ενιαία μάζα, η οποία έχει ανυψωθεί. Επειδή η άνοδος του μιγματίτη φαίνεται να ήταν μεγάλη, τόσο σε ύψος, όσο και σε χρονική διάρκεια, έχει διαταράξει τις παλαιότερες τεκτονικές δομές και έχει επηρεάσει καθοριστικά τη σημερινή τεκτονική του νησιού. Η μεγαλύτερη εφελκυστική πλαστική τεκτονική δομή, είναι μια μεγάλη πλαστική διατμητική ζώνη αποκόλλησης μεταξύ του μιγματιτικού δόμου και των μεταϊζημάτων που προήλθε από την άνοδο του μιγματίτη. Σε γενικές γραμμές διακρίνουμε μια ακτινωτή συμμετρία τόσο στην παράταξη των στρωμάτων, όσο και στη φορά της κίνησης των τεκτονικών λεπιών (κανονικά ρήγματα μικρής κλίσης) από το δόμο προς τη θάλασσα. Κατά αυτόν τον τρόπο τα πετρώματα διατάσσονται σε ζώνες παράλληλες με το μεγάλο άξονα του δόμου, με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ. Σε πολλές περιπτώσεις η άνοδος του δόμου προκάλεσε και πτυχώσεις βαρύτητας, με αποτέλεσμα την έντονη πτύχωση (στολίδωση) των στρωμάτων, καθώς και την αντιστροφή των λεπίων (Buick, 1988, Lister & Foster, 1996). Όλες οι παραπάνω καταπονήσεις οδηγούν σε μια πολύπλοκη τεκτονική δομή, που η ανάλυσή της είναι ιδιαίτερα δύσκολη (Εικόνες 4.15 & 4.16).

Στη Νάξο σήμερα κυριαρχούν τα μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα, τα οποία σχηματίζουν αναρίθμητα θραυσιγενή λέπια που συμφωνούν με το μοντέλο των εφελκυστικών κινήσεων από το Μειόκαινο μέχρι σήμερα. Πρόκειται για κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας κλίσης και με διεύθυνση που συμπίπτει συχνά με τη μέση κλίση της σχιστότητας. Στη βάση κάθε λεπίου μαρμάρου παρατηρείται μια κερματισμένη ζώνη (μυλωνιτιωμένη ζώνη), που αρχίζει με μια αγκεριτίωση-δολομιτίωση του υγιούς μαρμάρου και προχωράει εκτεινόμενη μέχρι τον κατακερματισμό και την ανάμιξη μαρμάρου-σχιστόλιθου στην επαφή. Πολύ συχνά στη βάση των ασβεστολιθικών καλυμμάτων η δολομιτίωση προκαλεί την απώλεια της σχιστότητας και τα μάρμαρα εμφανίζονται άστρωτα έως άμορφα. Τα πολυάριθμα αυτά λέπια εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία μεγεθών.

Τα μεγάλα ασβεστολιθικά λέπη, τα οποία είναι και τα ανώτερα λέπη της λιθοτεκτονικής στήλης, αποτελούν τη ραχοκοκκαλιά της Νάξου από το Λυώνα μέχρι τον Κάλαντο και εκτείνονται προς ανατολή μέχρι τη θάλασσα. Εκεί έχουμε τα μεγαλύτερα πάχη των μαρμάρων – δολομιτικών μαρμάρων, που αποτελούν και τους κυριότερους υδροφόρους της περιοχής. Αντίθετα, τα μεγαλύτερα σχιστολιθικά λέπη παρατηρούνται στις παρυφές του μιγματιτικού δόμου και ιδιαίτερα στους αμφιβολίτες κοντά στα χωριά Τσικαλαριό, Μονή, Κεραμωτή, Κόρωνος και Κορωνίδα, που αποτελούν και τα κατώτερα στρωματογραφικά μεταϊζήματα. Τα μικρότερα λέπη εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές ΒΔ του Λυώνα, μεταξύ Απείρανθου – Κορακιάς – Δανακού και μεταξύ Καλάντου και Πύργου Χειμάρρου, που είναι και η μεγαλύτερη περιοχή. Πολλές φορές σχηματίζεται μια πλειάδα πολύ λεπτών λεπίων μαρμάρων και σχιστόλιθων, σε κάθε ένα από τα οποία δημιουργείται μυλωνιτιωμένη τεκτονική επαφή, ώστε να είναι αδύνατος ο διαχωρισμός μαρμάρου – σχιστόλιθου σε χάρτη (Σ.Χ.Ο.Α.Π Δήμου Δρυμαλίας, 2010).

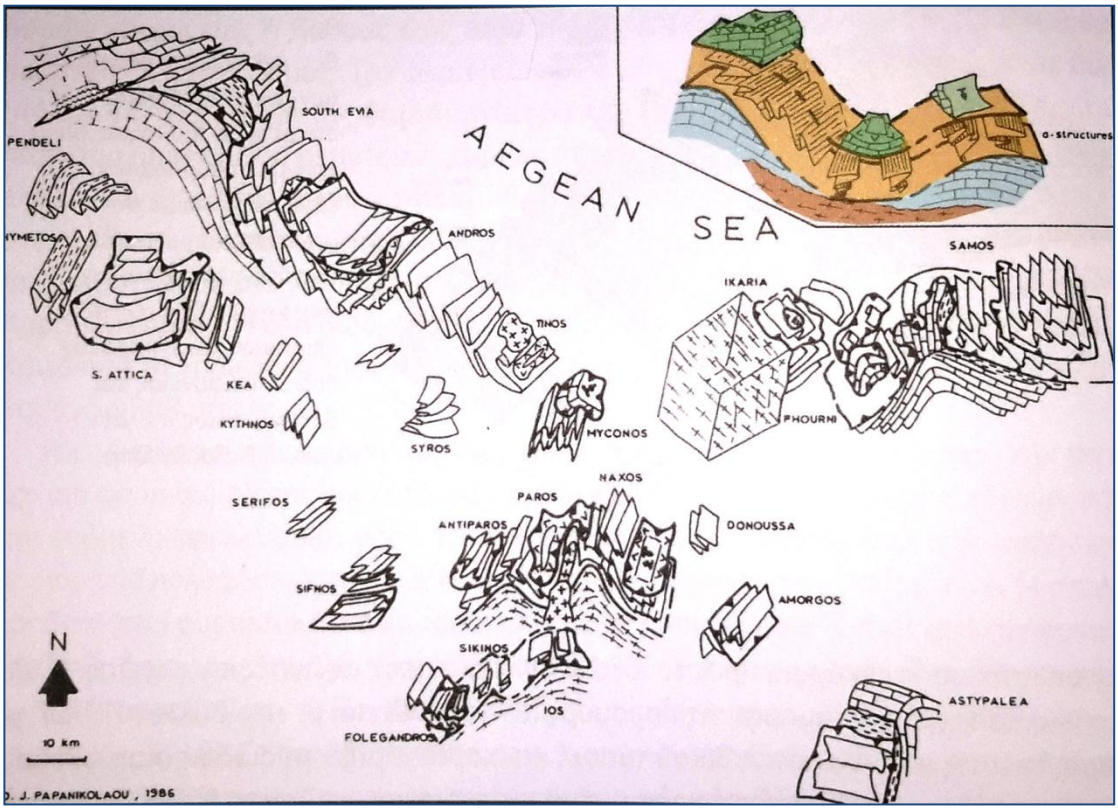
Τα ρήγματα μεγάλης κλίσης είναι νεότερες τεκτονικές δομές. Αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα παλαιότερα πολυάριθμα και μικρά ρήγματα και τα νεότερα και λίγα και μεγάλα ρήγματα. Τα μεγάλα και μεσαία τεκτονικά λέπη, διελαύνονται από πληθώρα μικρών υποκατακόρυφων ρηγμάτων (αντιθετικών) διαφόρων διευθύνσεων, που διακρίνονται κυρίως στα ανθρακικά πετρώματα και κόβουν μόνο το λέπος που επηρεάζουν, χωρίς να προχωρούν κάτω από τη μυλονιτιωμένη θραυσιγενή ζώνη. Τέλος ακολουθεί σχετικά μικρός αριθμός ρηγμάτων μεγάλης κλίσης (υποκατακόρυφα), το μήκος των οποίων δεν ξεπερνάει τα 5 km, με μέση διεύθυνση ΒΑ-ΝΑ, εγκάρσια με την κίνηση των λεπίων. Αυτά κόβουν πολλά λέπη ανθρακικά και σχιστολιθικά και είναι τα νεότερα στην περιοχή. Σε γενικές γραμμές πάντως, τα ρήγματα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Γαλανού & Ρόκκος, 1999):

- Κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας, τα οποία είναι υπεύθυνα για την τοποθέτηση της αλλόχθονης σειράς πετρωμάτων (τεκτονοϊζηματογενή σειρά) πάνω στο γρανοδιορίτη και στο μεταμορφωμένο σύμπλεγμα. Η επαφή της σειράς αυτής με το γρανοδιορίτη και το μεταμορφωμένο σύμπλεγμα είχε προσδιοριστεί ως επώθηση, αλλά σήμερα θεωρείται ως ένα μικρής γωνίας κανονικό ρήγμα. Τα ρήγματα αυτά έφεραν στον ίδιο χώρο σχηματισμούς, οι οποίοι δημιουργήθηκαν σε εντελώς διαφορετικούς τεκτονικούς ορόφους του φλοιού.
- Κανονικά ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ με οριζόντια συνιστώσα, τα οποία ενδεχομένως έχουν σχέση με το τελευταίο στάδιο ανύψωσης του μιγματιτικού δόμου.
- Κανονικά ρήγματα του Πλειόκαινου και του Τεταρτογενούς, τα οποία παρουσιάζουν διάφορες διευθύνσεις.

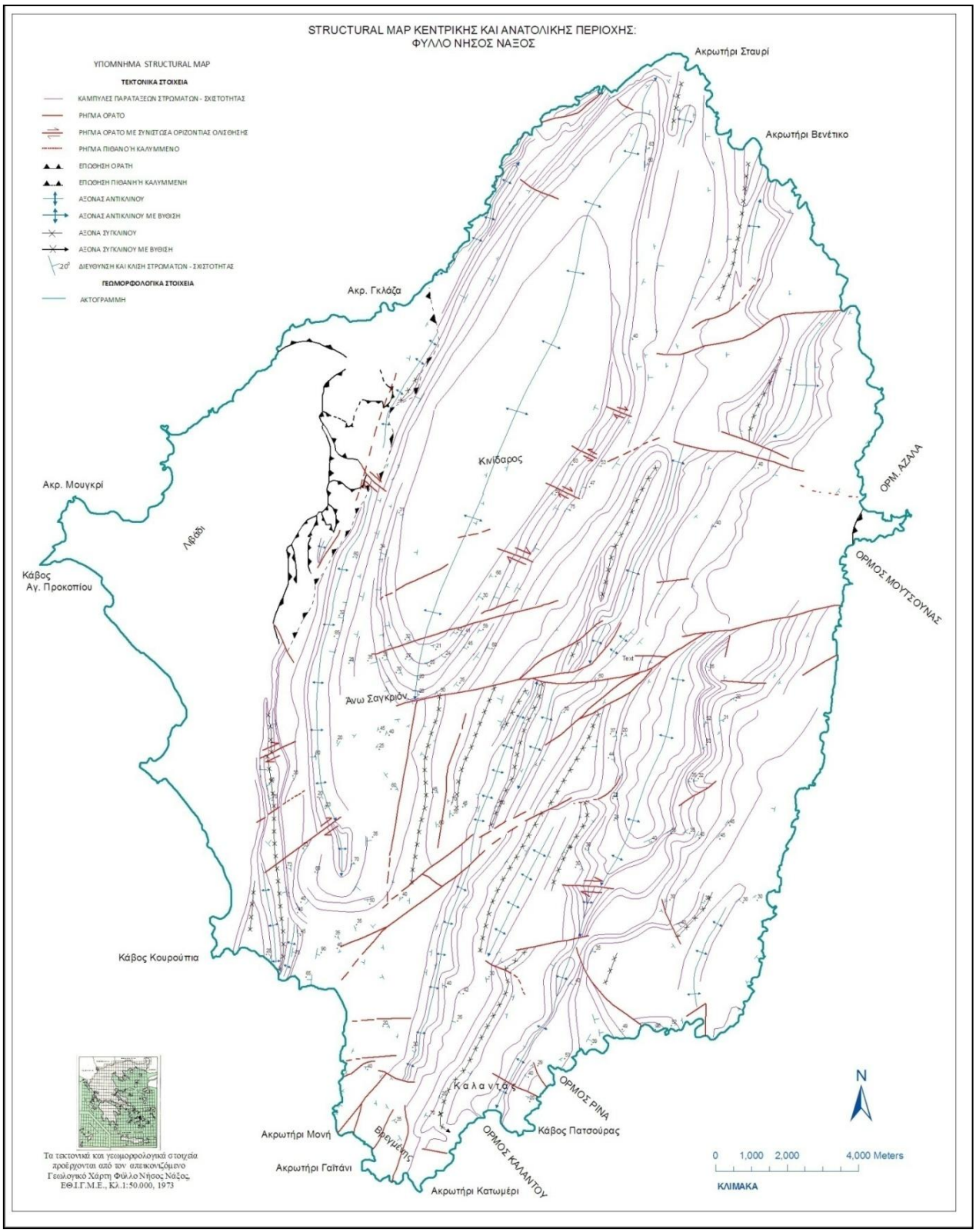
Οι κλίσεις της σχιστότητας των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, που συμπίπτει με τη στρώση τους, είναι γενικώς μεγάλες, ενώ σε γενικές γραμμές, οι παρατάξεις των στρωμάτων κυμαίνονται από 75^{ο} έως 20^{ο} με ακτινωτή διάταξη και με διεύθυνση από το δόμο προς τη θάλασσα. Συχνά όμως η ακτινωτή συμμετρία διαταράσσεται και οι παρατάξεις εμφανίζονται άναρχες και ανεστραμμένες, εξαιτίας νεότερων διαταράξεων (πτυχές βαρύτητας). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στη ΒΔ περιοχή του όρους Ζας.

Όσον αφορά την πλαστική παραμόρφωση στο νησί, από το Ηώκαινο έως σήμερα, έχουν παρατηρηθεί τουλάχιστον τρεις γενεές πτυχών και έχουν αναγνωριστεί δύο μεγάλες ζώνες διατμητικής ολίσθησης, με εύρος μεγαλύτερο του ενός χιλιομέτρου (Παπασταματίου, 1950, Μουντράκης, 1985, Urai et al., 1990, Γαλανού & Ρόκκος, 1999). Η πρώτη γενεά αφορά σε ισοκλινείς πτυχές, οι οποίες σχηματίστηκαν πριν από την κορύφωση της δεύτερης μεταμορφικής φάσης Μ2. Η δεύτερη γενεά πτυχών αφορά επίσης σε ισοκλινείς πτυχές και θεωρείται σύγχρονη με την κορύφωση της δεύτερης μεταμορφικής φάσης Μ2, ενώ η τρίτη γενεά πτυχών, σχηματίστηκαν μετά τη δεύτερη μεταμορφική φάση Μ2, και η δημιουργία τους έχει αποδοθεί λόγω συμπιεστικού πεδίου διεύθυνσης Α-Δ. Η τρίτη διατμητική ζώνη ολίσθησης θεωρείται εφελκυστικού χαρακτήρα μικρής γωνίας, με διεύθυνση ΒΒΑ, η οποία περιβάλλει ως κέλυφος το μιγματιτικό πυρήνα και θεωρείται ότι έχει άμεσα σχέση με αυτόν. Διήρκεσε και πέραν των υψηλών συνθηκών μεταμόρφωσης, ενώ έχει πτυχωθεί λόγω δράσης πεδίου συμπίεσης διευθύνσεως Α-Δ (τρίτη γενεά πτυχών). Η δεύτερη ζώνη διατμητικής ολίσθησης έχει αναγνωριστεί στο ανατολικό όριο του γρανοδιορίτη, στην επαφή του με το μεταμορφωμένο σύμπλεγμα και θεωρείται ότι οφείλεται σε πεδίο διαγωνίου πιέσεως.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία, συνθέτουν μια πολύπλοκη γεωλογική και τεκτονική δομή της νήσου Νάξου, η οποία σε συνδυασμό με τη γεωμορφολογία, καθορίζουν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη διαφόρου τύπων πηγών (π.χ. επαφής ή υπερπλήρωσης σε περιοχές εναλλαγής μαρμάρων με μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους), ελεύθερου φρεάτιου ορίζοντα στις προσχωματικές αποθέσεις των πεδιάδων και χαρακτηριστικής καρστικής υδροφορίας στα μάρμαρα. Συγχρόνως όμως, καθιστάται πολύ δύσκολος ο προσδιορισμός των συνθηκών και του προσανατολισμού της υπόγειας ροής. Για το λόγο αυτό η μελέτη των γεωλογικών συνθηκών είναι πολύ σημαντική, ώστε να γίνει μια πρώτη προσέγγιση της τεκτονικής και του μέσου ασυνεχειών, αλλά και για μια πρώτη εκτίμηση της υδρολιθολογίας, ώστε το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής να αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας.



Εικόνα 4.15: Σχηματικό στερεοδιάγραμμα της τεκτονικής των κυανοσχιστολιθών των Κυκλάδων, με απεικόνιση των μεγαπτυχών στα επιμέρους νησιά, που αποτελούν α-δομές βάθους εγκάρσια προς το τόξο, μέσα στη μεγαδιατμητική ζώνη του Ολιγόκαινου (Papanikolaou, 1987, Παπανικολάου, 2014).



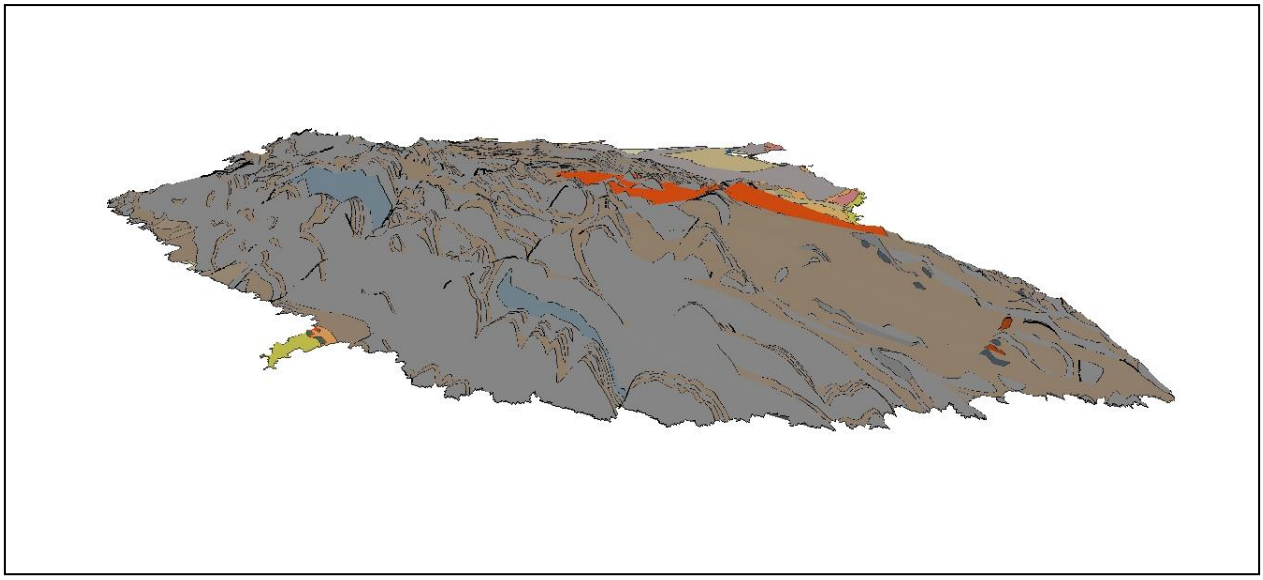
Εικόνα 4.16: Structural map κεντρικής και ανατολικής περιοχής της νήσου Νάξου, κλίμακας 1:50.000, όπου φαίνεται η πολύπλοκη τεκτονική δομή της (σε σμίκρυνση).

4.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ

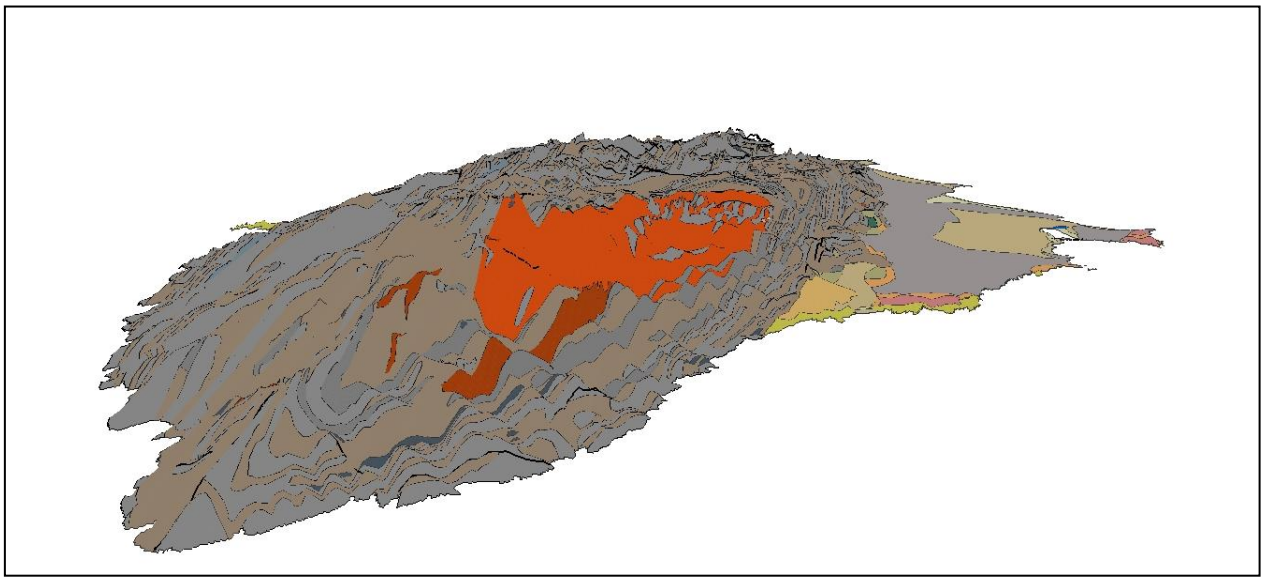
Για τη δημιουργία του μοντέλου υπόγειας ροής για την περιοχή έρευνας, είναι απαραίτητη η τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωλογικής δομής, τόσο στην επιφάνεια, όσο και στο βάθος. Σε πρώτη φάση, για την κατανόηση της πολύπλοκης γεωλογικής δομής στην επιφάνεια, κατασκευάστηκε το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωλογικής δομής της περιοχής έρευνας, με βάση το γεωλογικό χάρτη και το ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου. Για τη δημιουργία της συγκεκριμένης τρισδιάστατης απεικόνισης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcScene, το οποίο ανήκει στο λογισμικό πακέτο ArcGIS 10.x. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού παρουσιάζονται στις εικόνες 4.17 - 4.20.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωλογικής δομής στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης έχει καθοριστικό ρόλο για τη διερεύνηση της επίδρασης των ρηγμάτων και των ρωγμών στην υπόγεια ροή, καθώς με το μοντέλο αυτό δίνεται η αίσθηση της υπαίθριας κατάστασης. Στο μέσο ασυνεχειών, η βοήθεια των τρισδιάστατων μοντέλων στην εκτίμηση της υπόγειας ροής και του μηχανισμού των πηγών είναι σημαντική, καθώς παρατηρείται ότι σε ορεινές περιοχές, με μεγάλη μεταβολή της τοπογραφικής κλίσης, με μικρό πάχος αποσαθρωμένου μανδύα και έντονο βαθμό διάρρηξης, έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή κατείσδυση σε υψηλά υψόμετρα, ενώ παρόλο που η υδαταγωγιμότητα των πετρωμάτων είναι χαμηλή, η έντονα διερρηγμένη ζώνη και η υψηλή υδραυλική κλίση έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταφορά προς τα κατάντη μεγάλων ποσοτήτων νερού. Τέλος, με τη μείωση του υψομέτρου, μειώνεται αντίστοιχα η υδραυλική κλίση (Krasny, 1996, Μποτσιαλάς, 2007).

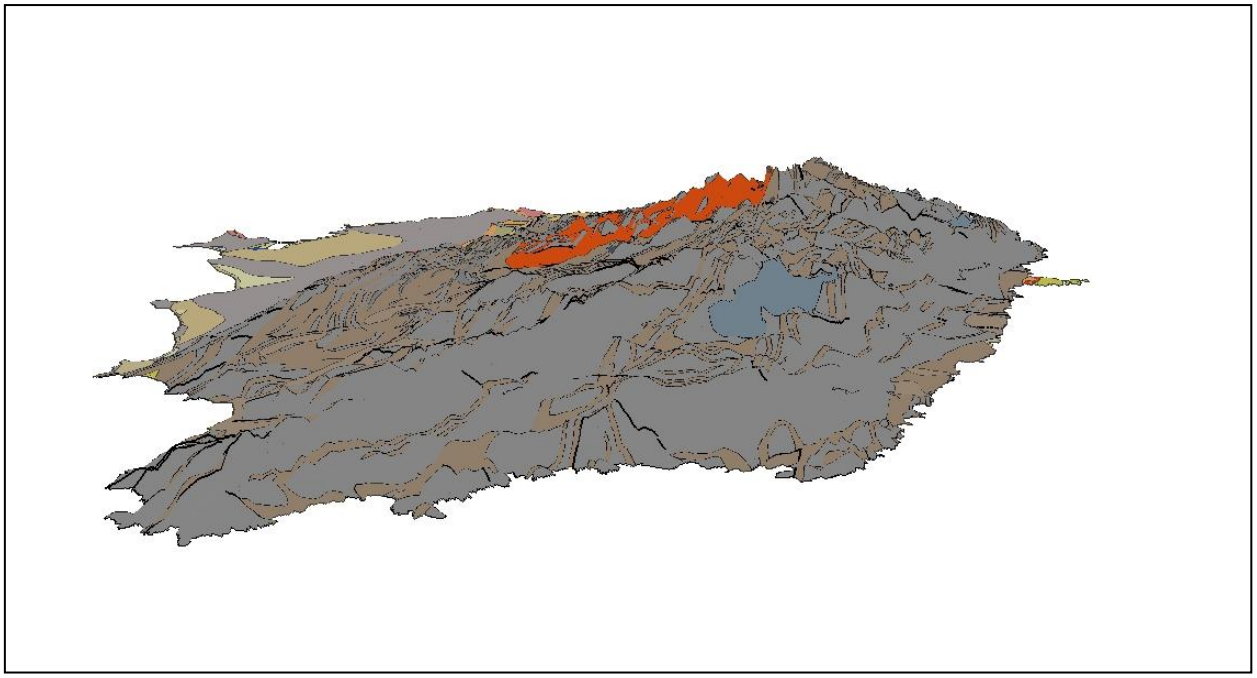
Το συγκεκριμένο μοντέλο της γεωλογικής δομής της νήσου Νάξου, σε συνδυασμό με δεδομένα γεωτρήσεων και γεωλογικών τομών χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του τρισδιάστατου γεωλογικού μοντέλου σε βάθος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της υπόγειας ροής. Το τρισδιάστατο μοντέλο υπόγειας ροής παρουσιάζεται αναλυτικά στα παρακάτω κεφάλαια.



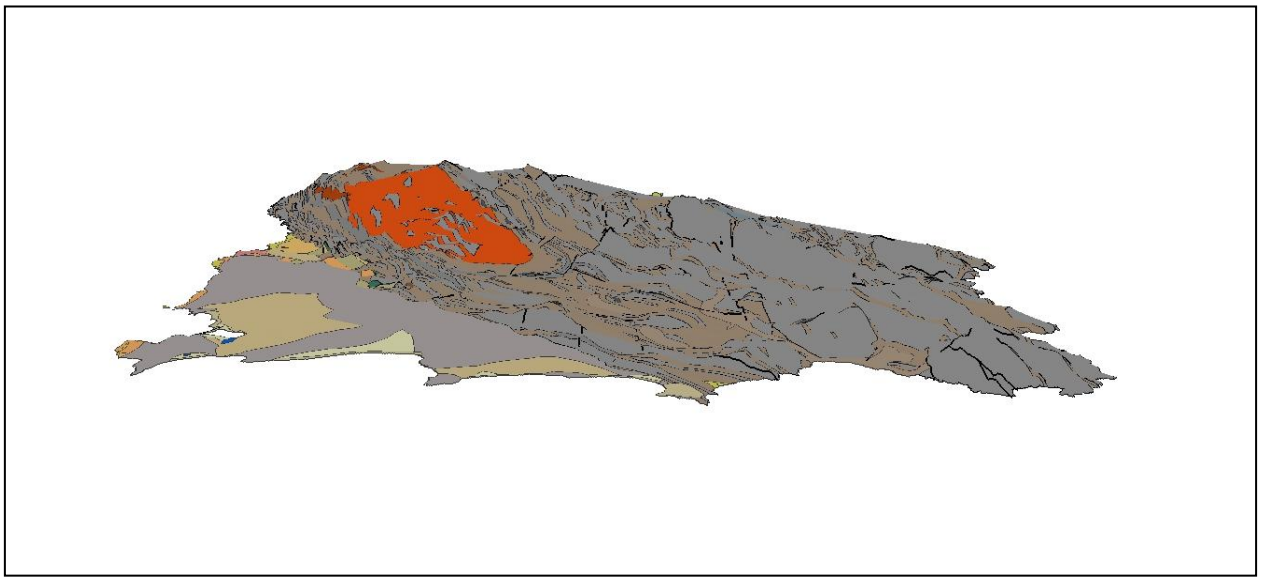
Εικόνα 4.17: Βορειοανατολική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.



Εικόνα 4.18: Βορειοδυτική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.



Εικόνα 4.19: Νοτιοανατολική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.



Εικόνα 4.20: Νοτιοδυτική όψη του τρισδιάστατου επιφανειακού γεωλογικού μοντέλου.

Κεφάλαιο 5^{ο} - Το Μέσο Ασυνεχειών της Νήσου Νάξου

5. ΤΟ ΜΕΣΟ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ

5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΩΣΕΩΝ - ΔΙΑΡΡΗΞΕΩΝ

5.1.1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται και αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε με τη βοήθεια λογισμικών τηλεπισκόπισης και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, προκειμένου να ληφθούν τα τελικά προϊόντα - εικόνες, από τις οποίες ήταν δυνατό να αναγνωριστούν χωρικά και να ψηφιοποιηθούν τα γραμμικά τεκτονικά στοιχεία (ρωγμές, διαρρήξεις). Τα γραμμικά τεκτονικά στοιχεία που ψηφιοποιήθηκαν, επιβεβαιώθηκαν μέσω εργασίας υπαίθρου και μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά τους, ούτως ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή του μέσου ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.

5.1.2 Περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των φωτογραμμώσεων, με σκοπό την αποτύπωση των γραμμικών τεκτονικών στοιχείων, ήταν μία δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM^+, καθώς και 51 αεροφωτογραφίες της Γ.Υ.Σ., οι οποίες ελήφθησαν από ύψος 3.500 ποδών και χρονολογούνται από το 1988.

Η δορυφορική εικόνα έχει ληφθεί από ύψος περίπου 705 km και περιλαμβάνει το σύνολο της νήσου Νάξου, ενώ οι διαστάσεις της είναι 183 km * 170 km. Τα κανάλια τα οποία συμπεριλαμβάνονται είναι ένα παγχρωματικό κανάλι με χωρική διακριτική ικανότητα 15 m, καθώς και επτά κανάλια σε διάφορες φασματικές περιοχές. Τα κανάλια αυτά αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ιδιότητες καταγραφής, οι οποίες με τη σειρά τους συνδέονται με τις ιδιότητες των φυσικών αντικειμένων επί της γήινης επιφάνειας. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε καναλιού είναι τα εξής (Βασιλάκης, 2006, 2008):

- **Κανάλι 1 (0,45 - 0,52 μm, blue):** επιτρέπει τη διείσδυση στις υδάτινες μάζες και συνεισφέρει σημαντικά στην ανάλυση των χρήσεων γης, στη διάκριση των εδαφών και των διαφορών στα χαρακτηριστικά της βλάστησης.
- **Κανάλι 2 (0,52 - 0,60 μm, green):** αντιστοιχεί στο ανακλώμενο πράσινο της υγιούς βλάστησης. Συνδέει την περιοχή μεταξύ των φασματικών ζωνών μπλε και κόκκινου, οι οποίες απορροφούνται από τη χλωροφύλλη των φυτών.
- **Κανάλι 3 (0,63 - 0,69 μm, red):** αποτελεί τη σημαντικότερη φασματική ζώνη για τη διάκριση της βλάστησης, λόγω της μεγάλης απορρόφησης του συγκεκριμένου μήκους

κύματος από τη χλωροφύλλη, στην περίπτωση της υγιούς βλάστησης. Επίσης, βοηθά στην οριοθέτηση των εδαφών και των γεωλογικών σχηματισμών.

- **Κανάλι 4 (0,76 - 0,90 μm, near infrared):** έχει πολύ καλή απόκριση για τη διάκριση του περιεχομένου της βιομάζας που αποτυπώνεται σε μια εικόνα. Επίσης, βοηθά στην αναγνώριση των καλλιεργειών και στη μεγιστοποίηση της αντίθεσης μεταξύ γυμνού εδάφους και καλλιεργειών και μεταξύ εδάφους και υδάτινων μαζών.
- **Κανάλι 5 (1,55 - 1,75 μm, middle infrared):** είναι πολύ ευαίσθητο στο ποσό της υγρασίας που υπάρχει σε έδαφος και βλάστηση. Πλεονέκτημά της είναι η διείσδυσή της σε μικρού πάχους νέφωση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ χιονιού, σύννεφων και πάγου. Προσδίδει αρκετά καλή αντίθεση σε διαφορετικού τύπου βλάστηση, η οποία μπορεί να σχετίζεται άμεσα με την επιφανειακή μεταβολή της λιθολογικής σύστασης.
- **Κανάλι 6 (10,4 - 12,4 μm, thermal infrared):** αποτυπώνει τις μεταβολές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με γεωθερμική δραστηριότητα, υποθαλάσσια εκφόρτιση πηγών σε παράκτιες περιοχές και σε μεταβολές της υγρασίας του εδάφους.
- **Κανάλι 7 (2,08 - 2,35 μm, middle infrared):** συμπίπτει με τη φασματική περιοχή απορρόφησης από τα ιόντα υδροξυλίου που περιέχονται σε πολλά ορυκτά και κατά συνέπεια βοηθάει στη διάκριση των γεωλογικών σχηματισμών και στον εντοπισμό ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης σε ηφαιστειακά πετρώματα.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι αεροφωτογραφίες χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη τους διακριτική ικανότητα, η οποία φτάνει τα 5 m, αλλά και από ένα παγχρωματικό κανάλι, το οποίο δεν μπορεί να δώσει ικανή πληροφορία για τη γεωλογική χαρτογράφηση και την εξαγωγή φωτογραμμώσεων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργούνται προβλήματα στη διάκριση μεγαδομών, όπως είναι τα ρήγματα. Αντίθετα οι δορυφορικές εικόνες Landsat 7 ETM^+, χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή διακριτική ικανότητα, αλλά η ενσωματωμένη πληροφορία των 7 καναλιών, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην αναγνώριση και αποτύπωση των γραμμώσεων.

5.1.3 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων τηλεπισκόπισης είναι από τα σημαντικότερα στάδια στην εκπόνηση μιας υδρογεωλογικής έρευνας σχετιζόμενης με το μέσο ασυνεχειών. Το τελικό αποτέλεσμα επιβάλλεται να είναι χωρικά και φασματικά ακριβές και αξιόπιστο, ενώ η διακριτική ικανότητα της εικόνας πρέπει να προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα αποτύπωσης ασυνεχειών σε ένα εύρος μήκους από μερικά μέτρα μέχρι και χιλιόμετρα.

Στην παρούσα έρευνα, η διαθεσιμότητα υψηλής ευκρίνειας αεροφωτογραφιών και των δορυφορικών εικόνων Landsat 7 ETM^{+}, έδωσε τη δυνατότητα να επιτευχθεί η παραπάνω συνθήκη. Συγκεκριμένα, η συγχώνευση ενός ορθοφωτομωσαϊκού προερχόμενο από τις αεροφωτογραφίες και των πολυφασματικών εικόνων Landsat 7 ETM^{+}, είναι ικανή να δώσει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα όσον αφορά την εξαγωγή των φωτογραμμώσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς η διακριτική ικανότητα των αεροφωτογραφιών, που φτάνει τα 5 m, σε συνδυασμό με την πληροφορία των 7 καναλιών που περιέρχεται στη δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM^{+}, μπορούν να δώσουν ικανοποιητική πληροφορία για την εξαγωγή των φωτογραμμώσεων.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, ακολουθήθηκε μια μακρά και δύσκολη σε εκτέλεση διαδικασία, η οποία περιελάμβανε δύο κυρίως στάδια. Το πρώτο στάδιο ήταν αυτό της βασικής επεξεργασίας, ώστε τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα (δορυφορική εικόνα και αεροφωτογραφίες) να υποστούν τις απαραίτητες χωρικές και φασματικές διορθώσεις. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε το δεύτερο στάδιο της ειδικής επεξεργασίας, όπου μέσω ειδικού λογισμικού επεξεργασίας εικόνων, μεταβλήθηκε η απόχρωση και η ευκρίνεια των εικόνων, με τελικό σκοπό τη βελτίωση της απεικόνισης της περιοχής μελέτης.

5.1.3.1 Βασική επεξεργασία

Η βασική επεξεργασία των δεδομένων τηλεπισκόπισης αναπτύσσεται σε δύο στάδια, και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, έχει ως στόχο τη χωρική και φασματική διόρθωση των πρωτογενών δεδομένων. Το πρώτο στάδιο αφορά τη φασματική διόρθωση, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, ενώ το δεύτερο στάδιο αφορά τη γεωμετρική (χωρική) διόρθωση.

Κύριος στόχος είναι αφότου ολοκληρωθούν τα δύο παραπάνω στάδια της βασικής επεξεργασίας των δεδομένων, να κατασκευαστεί ένα ορθοφωτομωσαϊκό, το οποίο θα έχει

προκύψει από συγχώνευση ενός ορθοανηγμένου μωσαϊκού αεροφωτογραφιών και με μια ορθοανηγμένη δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM^{+}.

5.1.3.1.1 Ατμοσφαιρική διόρθωση

Το πρώτο στάδιο της βασικής επεξεργασίας αφορά την ατμοσφαιρική διόρθωση της δορυφορικής εικόνας Landsat 7 ETM^{+}. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη αφού μεταξύ της γης και του δορυφορικού δέκτη παρεμβάλλεται ένας αριθμός ατμοσφαιρικών στρωμάτων, τα οποία αλλοιώνουν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα και κατά συνέπεια και το τελικό αποτέλεσμα.

Στις δορυφορικές εικόνες του τύπου αυτού, περιέχονται δύο τιμές σε κάθε κελί. Η πρώτη τιμή αφορά την ανάκλαση του φωτός στην επιφάνεια της γης και είναι αυτή που χρησιμεύει για την παρατήρηση της γήινης επιφάνειας, ενώ η δεύτερη αφορά την ανάκλαση ή/και τη διάθλαση που προκαλείται από τα ατμοσφαιρικά στρώματα, και είναι αυτή η οποία προκαλεί ποιοτική υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της εικόνας.

Η ατμοσφαιρική διόρθωση στοχεύει στην απαλοιφή της τιμής του κελιού που αναφέρεται στην ανάκλαση ή/και στη διάθλαση της ατμόσφαιρας. Η ιδανική διόρθωση είναι η απαλοιφή της τιμής σε κάθε κελί ξεχωριστά, όμως καθώς αυτό είναι σχεδόν ανέφικτο, η διόρθωση γίνεται σε ολόκληρο το κανάλι ή σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

Η τεχνική που εφαρμόστηκε για την ατμοσφαιρική διόρθωση ονομάζεται μέθοδος του ελάχιστου ιστογράμματος (Mather, 1994) και σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται τα ιστογράμματα για το σύνολο της έκτασης που καλύπτουν οι εικόνες, βρίσκεται για κάθε κανάλι η χαμηλότερη τιμή κελιού και απαλείφεται. Οι χαμηλές τιμές των κελιών αναφέρονται σε σκιασμένες περιοχές, στη θάλασσα, κ.τ.λ., και καταγράφουν την ανάκλαση στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Με τον τρόπο αυτό, απαλείφεται η ατμοσφαιρική επίδραση και η εικόνα γίνεται διαυγέστερη.

5.1.3.1.2 Γεωμετρική διόρθωση

Η γεωμετρική διόρθωση είναι το επόμενο βήμα που ακολουθείται στη βασική επεξεργασία. Αποτελεί κριτικής σημασίας διαδικασία για τη συνολική αποτελεσματικότητα της τηλεπισκόπισης, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο της γεωμετρικής διόρθωσης, τόσο πιο αξιόπιστη είναι και η τελική εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Η γεωμετρική διόρθωση εφαρμόστηκε, τόσο στη δορυφορική εικόνα, όσο και στις αεροφωτογραφίες, με τελικό στόχο την παραγωγή εικόνων στις οποίες το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς των εικόνων έχει μετασχηματιστεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα προβολής (Ε.Γ.Σ.Α.'87).

Όσον αφορά τη δορυφορική εικόνα, παρόλο που ήταν γεωαναφερμένη στο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων Ε.Γ.Σ.Α.'87, εντούτοις το κάθε κελί της εικόνας περιείχε μόνο τις συντεταγμένες x και y. Επειδή ο τελικός στόχος είναι να κατασκευαστεί ένα μωσαϊκό αεροφωτογραφιών και δορυφορικής εικόνας, όπου θα είναι ευδιάκριτες οι έντονες τοπογραφικές διακυμάνσεις της νήσου Νάξου, ήταν απαραίτητο η δορυφορική εικόνα να περιέχει και την πληροφορία του επιφανειακού αναγλύφου, δηλαδή να γίνει ορθοαναγωγή της εικόνας.

Για την ορθοαναγωγή της δορυφορικής εικόνας, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου της νήσου Νάξου, με ανάλυση κελιού 25 m, και η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού τηλεπισκόπισης (ENVI). Το αποτέλεσμα ήταν μια ορθοανηγμένη εικόνα Landsat 7 ETM^{+}, της οποίας το κάθε κελί περιείχε, εκτός από γεωγραφικό μήκος και πλάτος, και την πληροφορία του υψομέτρου.

Όσον αφορά με τις αεροφωτογραφίες, η γεωμετρική διόρθωση στοχεύει στην εξάλειψη της παραμόρφωσης που οφείλεται στη μετατόπιση του ανάγλυφου. Η διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης των αεροφωτογραφιών γίνεται ψηφιακά με τη συνδυασμένη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών τηλεπισκόπισης και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών. Πρόκειται για μια διαδικασία ιδιαίτερα σύνθετη και χρονοβόρα και περιλαμβάνει ένα σύνολο διαδικασιών, των οποίων τελικός στόχος είναι η αναδόμηση της εικόνας (resampling) και την εισαγωγή της γεωγραφικής πληροφορίας και στις τρεις διαστάσεις. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την αντιστοίχιση σημείων κοινών περιοχών μεταξύ των αεροφωτογραφιών και εικόνας που περιέχει τη γεωγραφική πληροφορία.

Ως πηγή της αρχικής γεωγραφικής πληροφορίας, χρησιμοποιήθηκε η ορθοανηγμένη δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM^{+} (Εικόνα 5.1) και με τη βοήθεια επίγειων σημείων ελέγχου, πραγματοποιήθηκε το ταίριασμά της με κάθε αεροφωτογραφία. Τα σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν ήταν χαρακτηριστικά κελιά θέσεις, όπως σημεία ακτογραμμής, συμβολές δρόμων, συμβολές αγροτεμαχίων και συμβολές ρεμάτων. Η επιλογή των σημείων έγινε με βάση τη λογική ότι προτιμούνται λίγα σημεία με μεγάλη ακρίβεια, παρά πολλά αλλά μέτριας ακρίβειας σημεία. Επιπροσθέτως δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο γεγονός ότι η κατανομή των

σημείων έπρεπε να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφη για κάθε μια από τις αεροφωτογραφίες. Τέλος, η μέγιστη ακρίβεια επιτεύχθηκε έχοντας υπόψη ότι τα επιλεχθέντα σημεία είχαν τη καλύτερη δυνατή διασπορά στην περιοχή μελέτης.

Η βέλτιστη θέση, και πιθανώς η σωστή διόρθωση, είναι η θέση που παράγει την υψηλότερη συσχέτιση και τη μικρότερη δυνατή απόκλιση (Βασιλάκης, 2006). Για το λόγο αυτό, η απόκλιση ελέγχθηκε μέσω της χρήσης του σφάλματος RMS (Root Mean Square), το οποίο εκφράζει την τυπική απόκλιση της διαφοράς μεταξύ των αρχικών συντεταγμένων των κελιών και των νέων στη διορθωμένη εικόνα. Με τον έλεγχο της ακρίβειας του κάθε σημείου ελέγχου, ολοκληρώνεται η διαδικασία αναδόμησης για κάθε αεροφωτογραφία και η μετατροπή τους σε ορθοανηγμένες εικόνες με ανάλυση κελιού 5 m (Εικόνα 5.2).

5.1.3.2 Ειδική επεξεργασία

Η ειδική επεξεργασία των δεδομένων τηλεπισκόπισης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες εργασίες στη μελέτη του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων. Η χαρτογράφηση των γραμμικών στοιχείων που αντιστοιχούν σε γεωλογικές δομές, όπως είναι τα ρήγματα και οι διαρρήξεις, και η επακόλουθη επεξεργασία τους, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα, αναφορικά με το υδρογεωλογικό περιβάλλον της περιοχής μελέτης. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι είναι αναγκαία η κατασκευή ενός χάρτη, ο οποίος να απεικονίζει με ικανή χωρική ακρίβεια τις ασυνέχειες της περιοχής μελέτης.

Το πρώτο στάδιο της εργασίας είναι η εξαγωγή των φωτογραμμώσεων από τα διαθέσιμα δεδομένα τηλεπισκόπισης. Ως φωτογράμμωση, ορίζεται κάθε γραμμικό στοιχείο, το οποίο αντιστοιχεί σε τοπογραφικές ή γεωλογικές δομές ή ακόμα και σε χρωματικές μεταβολές στην επιφάνεια της γης, και μπορεί να χαρτογραφηθεί με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπισης (O'Leary et al., 1976). Στην παρούσα μελέτη όμως μας ενδιαφέρει οι φωτογραμμώσεις να αντιστοιχούν σε γεωλογικά στοιχεία, και συγκεκριμένα σε ασυνέχειες (Scanvic, 1997). Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό, πριν κατασκευαστεί ο τελικός χάρτης των φωτογραμμώσεων, να γίνει μια επιπλέον επεξεργασία των αποτελεσμάτων της τηλεπισκόπισης, ούτως ώστε γραμμικά στοιχεία, τα οποία δεν ανταποκρίνονται σε ασυνέχειες, να απαλειφθούν.

Από τον ορισμό της φωτογράμμωσης γίνεται κατανοητό ότι η ψηφιοποίησή τους δεν αποτελεί μια αντικειμενική διαδικασία, της οποίας τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να ταυτίζονται μεταξύ διαφορετικών ερευνητών. Προκειμένου να γίνει μια κατά το δυνατόν αντικειμενική προσέγγιση επί του θέματος, επιχειρήθηκε σε πρώτο στάδιο η οπτική βελτίωση της εικόνας

που περιέχει τη δορυφορική εικόνα και το μωσαϊκό των ορθοφωτογραφιών (Εικόνα 5.3). Η βελτίωση αυτή αποσκοπεί στην αύξηση της διακριτικότητας της εικόνας, έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερη η φαινόμενη διάκριση μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων, που απεικονίζονται σε αυτή (Lillesand & Kiefer, 1994, Μποτσιαλάς 2007).

Η συνηθέστερη τεχνική βελτίωσης της εικόνας, αφορά τη μεταβολή της αντίθεσής της και της φωτεινότητάς της. Η πληροφορία που βρίσκεται αποθηκευμένη εντός του ορθοφωτομωσαϊκού αντιστοιχεί σε πολλά επίπεδα ανάκλασης, από τα χαμηλότερης μέχρι τα υψηλότερης ανακλαστικής ικανότητας αντικείμενα. Οι μεταβολές της αντίθεσης και της φωτεινότητας γίνονται μέσω της μετατροπής των ιστογραμμάτων των καναλιών, στα οποία αποτυπώνεται το πλήθος των κελιών που έχουν καταγεγραμμένη τιμή από 0 έως 255 για τα συστήματα 8bit, όπως είναι οι εικόνες Landsat (Βασιλάκης, 2006, 2008).

Για τη μετατροπή των ιστογραμμάτων των καναλιών υπάρχουν πολλές μέθοδοι όπως (Richards, 1993, Jensen, 1986):

- Η γραμμική επέκταση (linear stretching).
- Η λογαριθμική επέκταση (logarithmic and exponential stretching).
- Η πολλαπλή γραμμική επέκταση (piecewise linear stretching).
- Η εξισορρόπηση ιστογράμματος (histogram equalization).

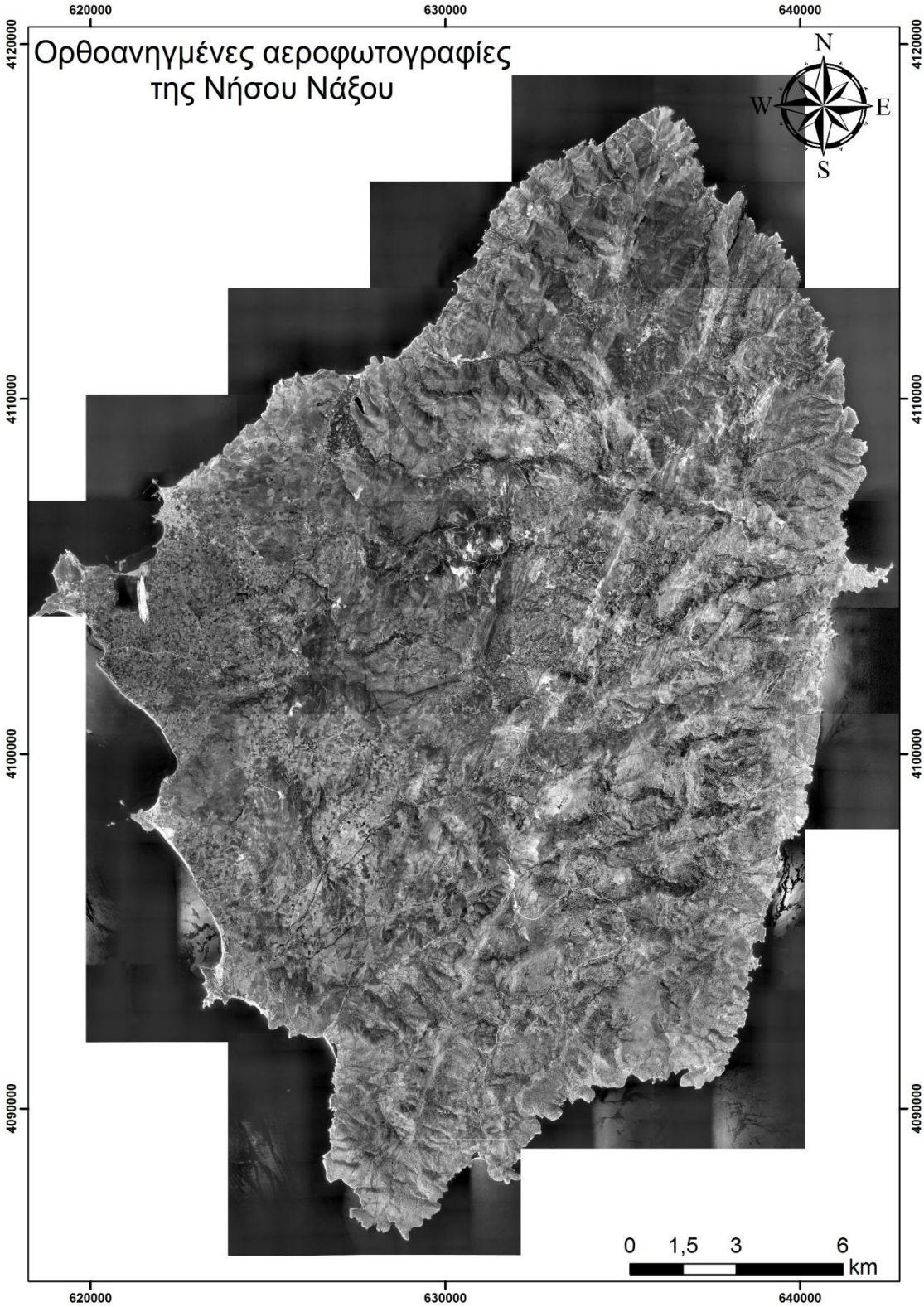
Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή της εξισορρόπησης του ιστογράμματος.

Το επόμενο στάδιο στην οπτική βελτίωση ήταν η εφαρμογή της τεχνικής γνωστής και ως βελτίωση των άκρων (edge enhancement), όπου τα οριακά σημεία των αντικειμένων στην επιφάνεια της γης γίνονται πιο ευδιάκριτα στο χρήστη. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφορετικών ανισότροπων φίλτρων σε οριζόντιες, κάθετες και διαγώνιες διευθύνσεις. Παρόλο που η εικόνα που προκύπτει είναι διαυγέστερη της αρχικής, η τεχνική αυτή θα πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή, αφού η εφαρμογή των φίλτρων στις διάφορες διευθύνσεις μπορεί να δώσει αποτελέσματα, τα οποία δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Αφού πραγματοποιήθηκε η οπτική βελτίωση, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των φωτογραμμώσεων. Κατά την ψηφιοποίησή τους ακολουθήθηκαν οι παρακάτω κανόνες (O'Leary et al. 1976, Παρχαρίδης, 1994, Campbell, 1996, Scanvic, 1997, Βασιλάκης, 2006, Μποτσιαλάς, 2007):

- Η κλίμακα απεικόνισης των ψηφιακών δεδομένων οφείλει να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης και της ψηφιοποίησης των φωτογραμμώσεων.
- Οι γραμμές που ψηφιοποιούνται δεν πρέπει να είναι τεθλασμένες, αλλά να σχηματίζονται από δύο σημεία, αρχής και τέλους.
- Οι γραμμές θα πρέπει να καλύπτουν ολόκληρο το γραμμικό στοιχείο χωρίς αυτό να αποκλίνει, ειδάλλως θα πρέπει να ψηφιοποιούνται περισσότερες γραμμές.
- Η ανάλυση που προκύπτει είτε μετά από βελτίωση των ιστογραμμάτων, είτε μετά από διαφορετικούς συνδυασμούς φασματικών ζωνών, δεν θα πρέπει να αποτελεί ξεχωριστή επεξεργασία.
- Κατά τη στατιστική επεξεργασία των φωτογραμμώσεων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι γεωλογικοί σχηματισμοί στους οποίους εντοπίζονται, καθώς επίσης και αυτές που εντοπίζονται σε περισσότερους από έναν σχηματισμούς.

Εικόνα 5.1: Ορθοανηγμένη δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM$^+$ της νήσου Νάξου, σε φυσικό χρώμα (συνδυασμός καναλιών: R=3, G=2, B=1).



Εικόνα 5.2: Ορθοανηγμένο μωσαϊκό αεροφωτογραφιών της νήσου Νάξου.

Εικόνα 5.3: Το τελικό προϊόν συγχώνευσης της δορυφορικής εικόνας Landsat 7 ETM$^+$ με το ορθοφωτομωσαϊκό των αεροφωτογραφιών της νήσου Νάξου.

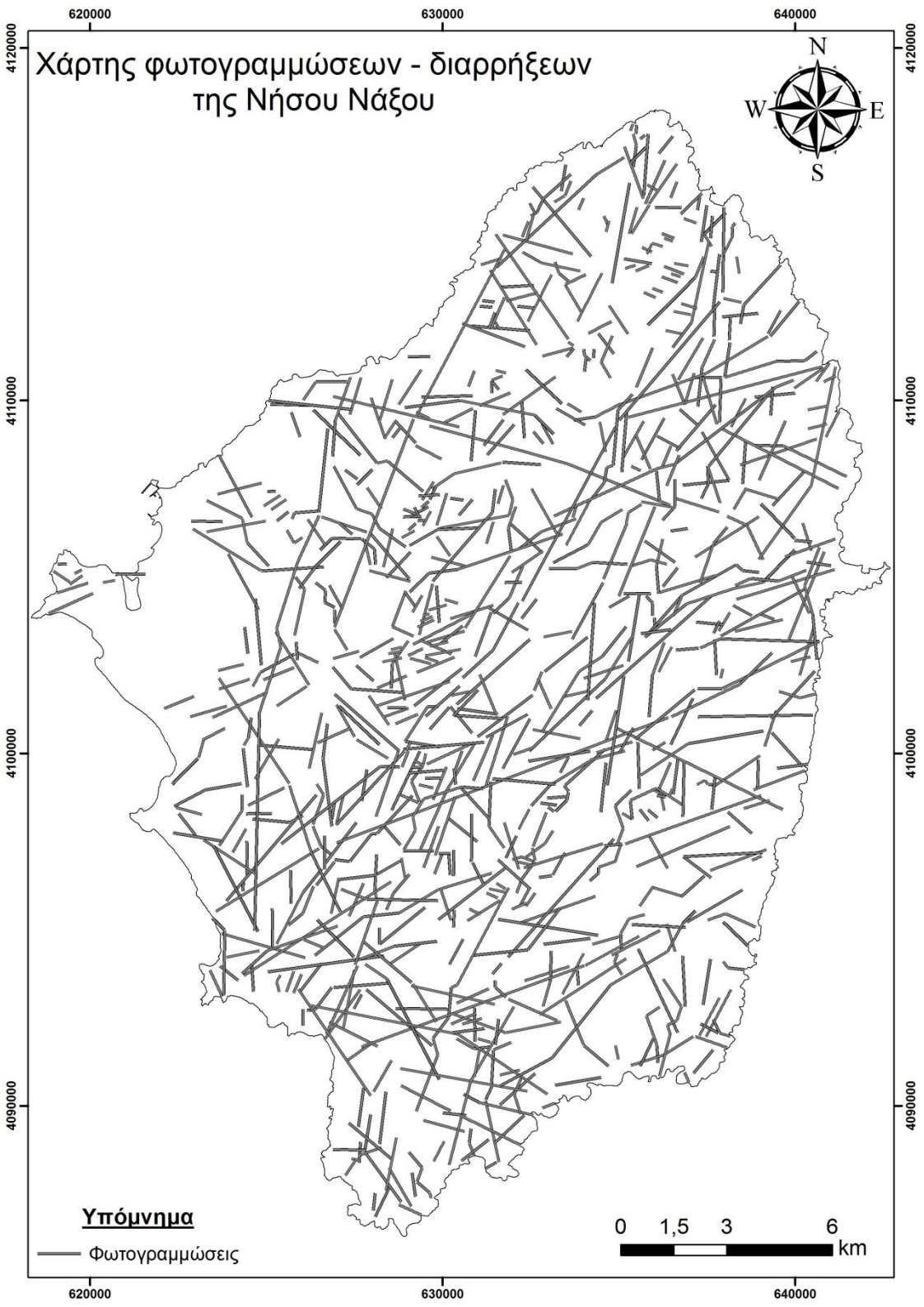
5.1.4 Κατασκευή χάρτη φωτογραμμώσεων - διαρρήξεων

Έχοντας ολοκληρώσει την επεξεργασία των δεδομένων και έχοντας υπόψη τις παραπάνω οδηγίες διαχείρισης αυτών, ψηφιοποιήθηκε το πλήθος των φωτογραμμώσεων της περιοχής μελέτης, με τη βοήθεια γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Όμως, πρέπει εδώ να σημειωθεί, ότι κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης, δεν σημαίνει ότι κάθε φωτογράμμωση αντιστοιχεί πλήρως σε κάποια γεωλογική δομή (ρήγμα, διάρρηξη, κ.τ.λ.). Σε πολλές περιπτώσεις οι παραγόμενες φωτογραμμώσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικού τύπου γραμμικά στοιχεία, όπως γραμμώσεις που σχετίζονται με τη μορφολογία (π.χ. υδρογραφικό δίκτυο) και γραμμώσεις που σχετίζονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα στην περιοχή μελέτης (π.χ. δρόμοι). Επίσης, όλων αυτών των τύπων οι γραμμώσεις, εμφανίζονται ταυτόχρονα στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να χαρακτηρίζεται σωστά κάθε φωτογράμμωση κατά τη διάρκεια της χαρτογράφησης - ψηφιοποίησης τους (Gülcan, 2005).

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον χωρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (οδικό δίκτυο, υδρογραφικό δίκτυο, κ.τ.λ.) και πραγματοποιήθηκε εργασία υπαίθρου, ώστε να πιστοποιηθούν οι φωτογραμμώσεις που αντιστοιχούν σε γραμμώσεις και διαρρήξεις, και να απαλειφθούν οι φωτογραμμώσεις που δεν αντιστοιχούν σε γεωλογικές δομές. Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής ήταν η σημαντική μείωση του πλήθους των φωτογραμμώσεων.

Ακόμη πρέπει να σημειωθεί, ότι από τη διαδικασία αυτή είναι αδύνατη η αποτύπωση όλων των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, όπως για παράδειγμα μικρές ρωγμές και διακλάσεις, και ότι στις γραμμώσεις αυτές δεν περιλαμβάνονται τα ρήγματα που έχουν μελετηθεί από τον Jansen (1973) και παρουσιάζονται στο γεωλογικό χάρτη.

Ο τελικός χάρτης των φωτογραμμώσεων στην περιοχή μελέτης, ο οποίος προέκυψε ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο χάρτη, στην περιοχή μελέτης έχουμε την εμφάνιση 887 φωτογραμμώσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε πραγματικές ή δυνητικώς πραγματικές ρωγμές και διαρρήξεις, προερχόμενες από μεταλπικές κινήσεις (Partsinevelou et al., 2011).



Εικόνα 5.4: Τελικός χάρτης φωτογραμμώσεων της νήσου Νάξου, οι οποίες αντιστοιχούν σε πραγματικές ή δυνητικώς πραγματικές ρωγμές και διαρρήξεις.

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

5.2.1 Γενικά

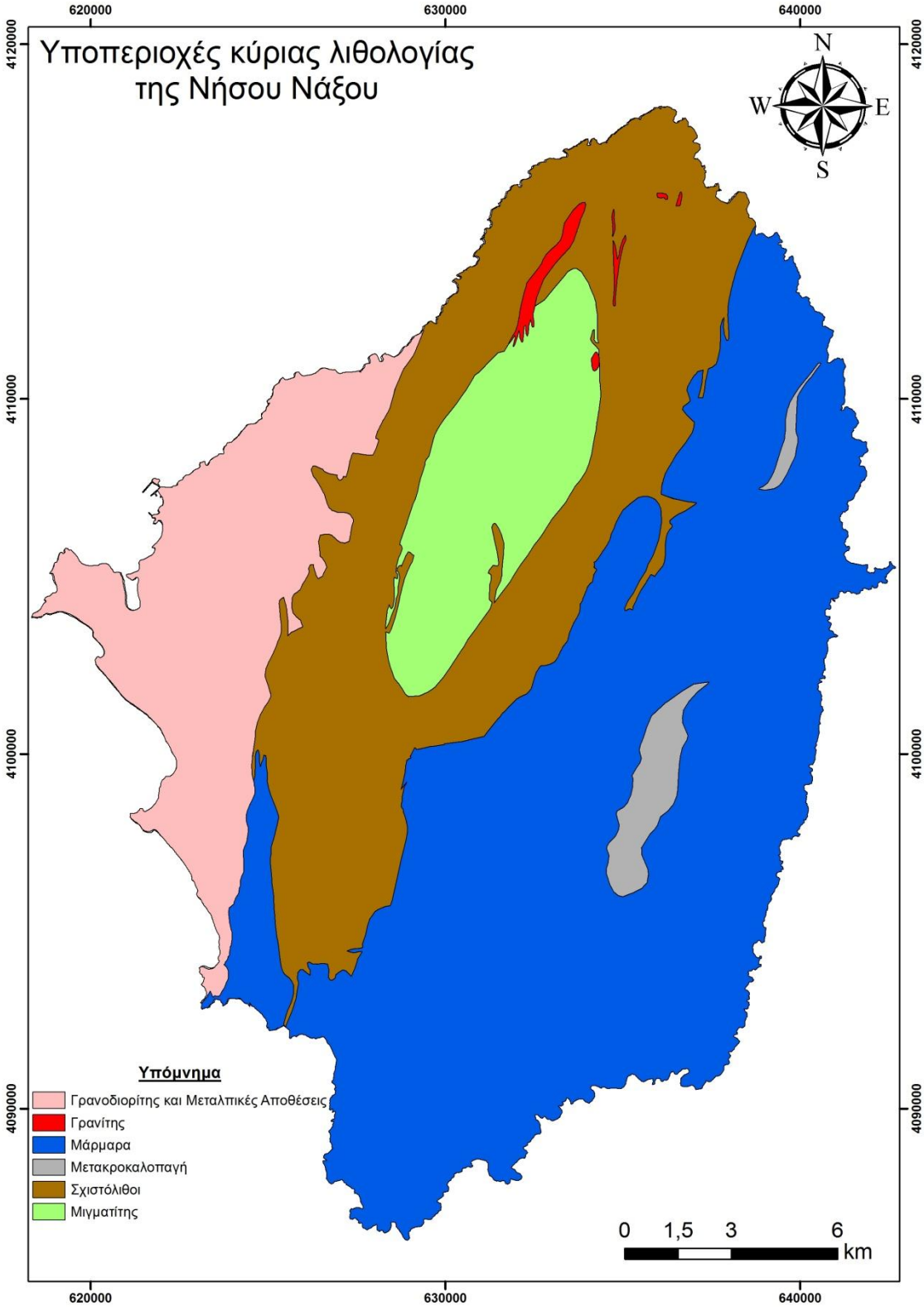
Στις προηγούμενες ενότητες ακολουθήθηκε ένα σύνολο εργασιών, με σκοπό την όσο δυνατόν αξιόπιστη αποτύπωση του καθεστώτος του μέσου ασυνεχειών της περιοχής μελέτης.

Το επόμενο στάδιο στο γενικότερο πλαίσιο της ανάλυσης του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος είναι η μελέτη και ανάλυση των παραμέτρων που ορίζουν το καθεστώς της υπόγειας ροής του νερού στο μέσο ασυνεχειών. Η μελέτη αυτή είναι σημαντική, αφού υπάρχουν συγκεκριμένες παράμετροι, οι ποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της τελικής υδρογεωλογικής κατάστασης της περιοχής μελέτης. Οι παράμετροι αυτές είναι (Botsialas et al., 2005, Μποτσιαλάς, 2007):

- Η γεωγραφική κατανομή των ασυνεχειών
- Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών.
- Οι διαστάσεις των ασυνεχειών.
- Η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών.
- Ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών.

Για τη σύγκριση της κάθε μιας από τις παραπάνω παραμέτρους με τη λιθολογία της νήσου Νάξου, καθορίστηκαν έξι υποπεριοχές στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με την κύρια λιθολογία, ως εξής (Εικόνα 5.5):

1. Η υποπεριοχή του γρανοδιορίτη και των μεταλπικών αποθέσεων. Στην περίπτωση αυτή συγχωνεύτηκαν οι δύο αυτές λιθολογίες, καθώς οι μεταλπικές αποθέσεις καταλαμβάνουν ένα αρκετά μικρό μέρος καλύπτοντας το γρανοδιορίτη.
2. Η υποπεριοχή του γρανίτη.
3. Η υποπεριοχή των μαρμάρων. Τα όρια της συγκεκριμένης υποπεριοχής καθορίστηκαν σύμφωνα με την επικράτηση των μαρμάρων έναντι των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, καθώς στην περιοχή αυτή έχουμε την εμφάνιση έντονων εναλλαγών μεταξύ μαρμάρων και μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων.
4. Η υποπεριοχή των μετακροκαλοπαγών.
5. Η υποπεριοχή των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και των γνεύσιων. Τα όρια της υποπεριοχής αυτής καθορίστηκαν με παρόμοιο τρόπο με τον οποίο καθορίστηκε η υποπεριοχή των μαρμάρων.
6. Η υποπεριοχή του μιγματίτη.



Εικόνα 5.5: Καθορισμός των έξι υποπεριοχών στη νήσο Νάξο, σύμφωνα με τις κύριες λιθολογίες που παρατηρούνται στο νησί.

5.2.2 Γεωγραφική κατανομή των ασυνεχειών

Σύμφωνα με το χάρτη φωτογραμμώσεων που κατασκευάστηκε, φαίνεται ότι η κατανομή των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης είναι ανομοιογενής. Το μεγαλύτερο μέρος του νησιού, ανεξαρτήτου λιθολογίας, χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό ασυνεχειών. Εξαίρεση αποτελεί μέρος του δυτικού τμήματος του νησιού, όπου παρατηρούνται χαλαρές μεταλπικές αποθέσεις και το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό αριθμό ασυνεχειών. Επίσης, μεγάλος αριθμός ασυνεχειών παρατηρείται σε μέσα προς υψηλά υψόμετρα, κυρίως σε περιοχές κλιτύων, γεγονός που συνδέει άμεσα την τεκτονική με τη μορφολογία της νήσου.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω κατανομή, είναι εμφανές ότι η πλειοψηφία των ασυνεχειών εμφανίζεται σε λιθολογίες, οι οποίες ανταποκρίνονται στον ορισμό των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, μιας και το μεγαλύτερο μέρος της νήσου Νάξου καλύπτεται πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα (κρυσταλλικά πετρώματα). Η πλειοψηφία των ασυνεχειών στα πετρώματα αυτά δικαιολογείται άμεσα από το γεγονός ότι τα συγκεκριμένα πετρώματα είναι αποδέκτες σύνθετων εφελκυστικών και εκτατικών κινήσεων από το Μειόκαινο μέχρι και σήμερα. Επίσης, πληθώρα των ασυνεχειών αυτών αποτελούν αποτέλεσμα του τελευταίου στάδιου ανύψωσης του μιγματιτικού δόμου και στην τοποθέτηση της αλλόχθονης σειράς πετρωμάτων (τεκτονοϊζηματογενή σειρά) πάνω στο γρανοδιορίτη και στο μεταμορφωμένο σύμπλεγμα.

5.2.3 Προσανατολισμός των ασυνεχειών

Η διερεύνηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών αφορά τον προσδιορισμό της διεύθυνσης, της κλίσης και της φοράς μεγίστης κλίσης των επιπέδων τους. Ο προσανατολισμός είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος, αφού σχετίζεται άμεσα με τη διεύθυνση της εκλεκτικής κίνησης του νερού εντός των ασυνεχειών. Ο πλήρης καθορισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών επιτυγχάνεται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων, με πιο γνωστή αυτή των ροδοδιαγραμμάτων.

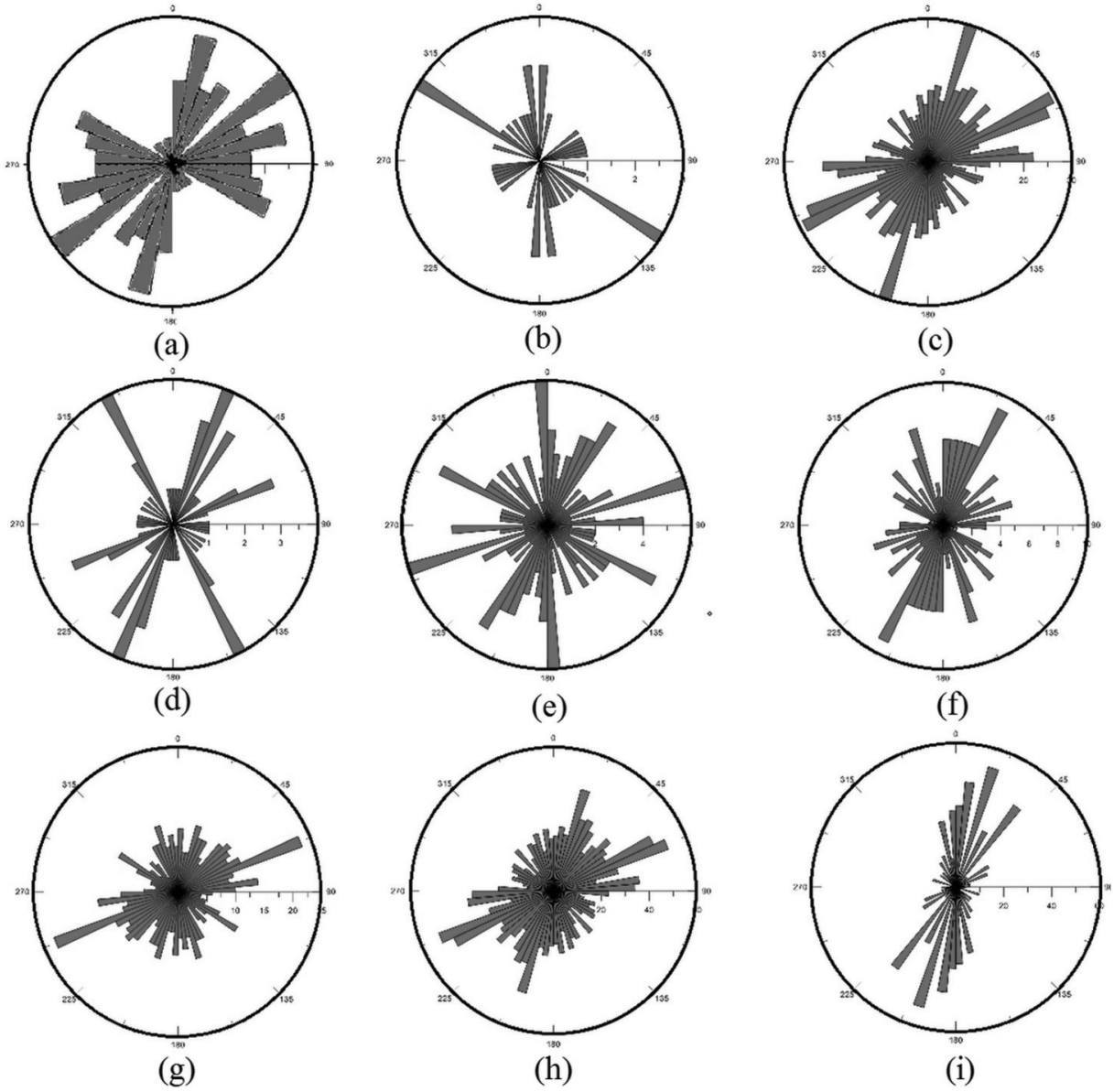
Τα στοιχεία προσανατολισμού είναι δυνατόν να μετρηθούν τόσο μέσω εργασιών υπαίθρου, όσο και μέσω μεθόδων τηλεπισκόπισης. Όμως, μια ολοκληρωμένη έρευνα, πρέπει να περιλαμβάνει μετρήσεις και από τις δυο παραπάνω προσεγγίσεις, μιας και αποτελούν επιβεβαίωση και συμπλήρωση των αποτελεσμάτων της άλλης.

Όσον αφορά τις μετρήσεις υπαίθρου, πάρθηκαν 624 μετρήσεις κλίσεως και Φ.Μ.Κ. (φορά μέγιστης κλίσης) σε όλη την επιφάνεια του νησιού. Όσον αφορά τις μετρήσεις που προέκυψαν

μέσω μεθόδων τηλεπισκόπισης, χρησιμοποιώντας την επέκταση GOGO Tools του ArcGIS, υπολογίστηκαν οι διευθύνσεις των ασυνεχειών σε κάθε κύρια λιθολογία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων προβλήθηκαν σε ροδοδιαγράμματα διεύθυνσης και παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.6.

Από το ροδοδιάγραμμα των διευθύνσεων των ρηγμάτων είναι δυνατόν να αναγνωριστούν τόσο κύριες, όσο και δευτερεύουσες διευθύνσεις αυτών. Πιο συγκεκριμένα, τα ρήγματα εμφανίζουν τρεις επικρατούσες διευθύνσεις, ΒΒΑ-ΝΝΔ, ΒΑ-ΝΔ και ΑΒΑ-ΔΝΔ, και δύο δευτερεύουσες διευθύνσεις, Α-Δ και Β-Ν (Galanos & Rokkos, 1999). Τις ίδιες κύριες και δευτερεύουσες διευθύνσεις εμφανίζει και το ροδοδιάγραμμα των φωτογραμμώσεων, γεγονός που τις συνδέει με τα ρήγματα της περιοχής μελέτης. Η σχέση αυτή μεταξύ των ρηγμάτων και των φωτογραμμώσεων είναι εμφανής και μεταξύ των ροδοδιαγραμμάτων των διευθύνσεων των ασυνεχειών της κάθε υποπεριοχής και του ροδοδιαγράμματος των διευθύνσεων που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας υπαίθρου, καθώς και εκεί οι κύριες και δευτερεύουσες διευθύνσεις είναι πάλι ίδιες.

Όμως, εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαίρεση στη παραπάνω συσχέτιση αποτελούν οι υποπεριοχές του γρανίτη, των μετακροκαλοπαγών και του γρανοδιορίτη με τις μεταλπικές αποθέσεις, καθώς οι κύριες διευθύνσεις διαφέρουν. Πιο συγκεκριμένα εμφανίζουν τις διευθύνσεις Β-Ν, ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ ως επικρατούσες. Οι συγκεκριμένες διαφορές μπορούν να μη ληφθούν υπόψη, καθώς το πλήθος των φωτογραμμώσεων στις συγκεκριμένες λιθολογίες είναι πολύ μικρός και δεν είναι αντιπροσωπευτικός του συνόλου αυτών.



Εικόνα 5.6: Ροδοδιαγράμματα διευθύνσεων των ασυνεχειών, όπου (a) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων των ρηγμάτων που χαρτογραφήθηκαν από τον Jansen, (b) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών στο γρανίτη, (c) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών στα μάρμαρα, (d) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών στα μετακροκαλοπαγή, (e) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών στο γρανοδιορίτη και τις μεταλπικές αποθέσεις, (f) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών στο μιγματίτη, (g) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, (h) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων των φωτογραμμώσεων και (i) ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια εργασίας υπαίθρου (Partsinevelou et al., 2011).

5.2.4 Διαστάσεις των ασυνεχειών

Σε γενικές γραμμές, οι διαστάσεις των ασυνεχειών δεν είναι εύκολα μετρήσιμες εκτός εξαιρέσεων. Διαστάσεις, όπως το άνοιγμα και το φαινόμενο άνοιγμα είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν και να υπολογιστούν σε επίπεδο χωρικής ανάλυσης. Επιπρόσθετα, η επίδραση του βάθους επί του ανοίγματος είναι καταλυτική και καθιστά τη διαδικασία υπολογισμού αδύνατη.

Ακόμη, η μεταβολή των διαστάσεων των ασυνεχειών σε βάθος παραμένει τις περισσότερες φορές άγνωστη, καθώς οι ασυνέχειες στο βάθος μειώνουν τόσο τον αριθμό τους, όσο και τα χαρακτηριστικά τους. Κυριότερη αιτία για την αλλαγή των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών είναι οι λιθοστατικές πιέσεις που ασκούνται σε βάθος, ενώ παράλληλα οι συνθήκες επιφάνειας ευνοούν τη δημιουργία νέων ασυνεχειών ή διευρύνουν και τροποποιούν προϋπάρχουσες ασυνέχειες με τη δράση εξωγενών παραγόντων (Στουρνάρας, 1996).

Όμως, υπό κανονικές συνθήκες, αυτό που μπορεί να μετρηθεί είναι το μήκος του ίχνους της ασυνέχειας στην επιφάνεια παρατηρήσεως, το οποίο και αποτελεί ένα κατώτερο όριο της μεγαλύτερης διαστάσεως. Αυτό προκύπτει από το περιορισμένο μήκος της επιφάνειας αυτής που σπανίως τέμνει την ασυνέχεια κατά την πιο μεγάλη της διάσταση (Στουρνάρας, 1996).

Σε κάθε περίπτωση πάντως, η συμβολή του μήκους στον καθορισμό του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος είναι καθοριστική, τόσο με έμμεσο, όσο και άμεσο τρόπο, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος των ασυνεχειών, τόσο επηρεάζεται η υπόγεια ροή. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος επηρεάζει εμμέσως την υπόγεια ροή, αφού καθορίζει το βαθμό διάρρηξης της βραχομάζας αλλά και το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών, έτσι ώστε η ροή κατά μήκος μιας ασυνέχειας να μπορεί να καθορίζει τη ροή κατά μήκος της άλλης. Η άμεση επίδραση του μήκους εστιάζεται στον όγκο του νερού που μπορεί να μεταφερθεί, αφού αποτελεί μια ένδειξη για τις διαστάσεις των ασυνεχειών συνολικά.

Η μέτρηση του μήκους των ασυνεχειών είναι μια διαδικασία εύκολη, ιδιαίτερα με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, όπου η μέτρηση μηκών γίνεται αυτόματα. Μια πρώτη στατιστική προσέγγιση του μήκους των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης, έδειξε ότι μήκη που επικρατούν κυμαίνονται μεταξύ 600 m και 2000 m (Εικόνα 5.7). Υπολογίζοντας στη συνέχεια το συνολικό μήκος των ασυνεχειών και το μήκος τους ανά μονάδα επιφάνειας σε κάθε υποπεριοχή (Πίνακας 5.1), έδειξε ότι τα μεγέθη αυτά είναι αντιστρόφως ανάλογα. Επίσης παρατηρήθηκε μεγάλη ομοιομορφία όσον αφορά τον κατακερματισμό της κάθε

λιθολογίας, καθώς το μήκος των ασυνεχειών ανά μονάδα επιφάνειας δεν διαφέρει πολύ σε κάθε υποπεριοχή (Partsinevelou et al., 2011).

Εικόνα 5.7: Κατανομή των τάξεων του μήκους των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 5.1: Συνολικό μήκος ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.

Λιθολογία	Μήκος ασυνεχειών (km)	Εμβαδόν (km^2)	Μήκος ασυνεχειών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (km^{-1})
Μάρμαρα	552,36	207,2	2,66
Μαρμαρυγιακοί Σχιστόλιθοι και Γνεύσιοι	362,75	117,3	3,09
Μιγματίτης	120,82	35,7	3,38
Γρανοδιορίτης και Μεταλπικές Αποθέσεις	112,12	60,2	1,86
Μετακροκαλοπαγές	55,83	7,2	7,75
Γρανίτης	27,47	3,7	7,42

5.2.5 Χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών

Η χωρική πυκνότητα αναφέρεται στην κλίμακα περιοχής και μπορεί να εκφραστεί ως το μέσο συνολικό μήκος των ασυνεχειών ανά μονάδα επιφάνειας (Greenbaum, 1985). Ο τρόπος αυτός βοηθά στον καθορισμό περιοχών με μικρό ή μεγάλο πλήθος ασυνεχειών, ενώ συγχρόνως αποτελεί και έναν τρόπο ποσοτικοποίησης της εμμονής των ασυνεχειών σε κλίμακα περιοχής (Μποτσιαλάς, 2007).

Η κατασκευή χάρτη της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών (Εικόνα 5.8), έγινε με τη βοήθεια γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, όπου η περιοχή μελέτη αρχικά χωρίζεται σε τετραγωνικό κάναβο. Στη συνέχεια σε κάθε σημείο του κάναβου ορίζεται κύκλος συγκεκριμένης ακτίνας, όπου μετριέται το συνολικό μήκος των ασυνεχειών που βρίσκονται εντός του κύκλου, και το αποτέλεσμα αυτό, διαιρείται με τη συνολική επιφάνεια του κύκλου. Στην περίπτωση που μια ασυνέχεια τέμνει τον κύκλο, τότε ως μήκος ασυνέχειας υπολογίζεται η απόσταση από το ένα άκρο της ασυνέχειας έως το σημείο τομής κύκλου και ασυνέχειας. Στο τελικό στάδιο υπολογίζεται η χωρική κατανομή της πυκνότητας στην περιοχή μελέτης με τη χρήση ενσωματωμένου αλγορίθμου χωρικής ανάλυσης (Spatial Analyst). Το μήκος της πλευράς του κελιού, καθώς και η ακτίνα του κάθε κύκλου, ορίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα στα 90 m και στα 750 m αντίστοιχα. Δεν επιλέχθηκαν διαφορετικές τιμές, καθώς η περιοχή μελέτης είναι αρκετά μεγάλη και οι τιμές αυτές έδωσαν μια αξιόπιστη εικόνα της χωρικής κατανομής της πυκνότητας.

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο χάρτη, παρατηρούνται μεγάλες τιμές πυκνότητας σε περιοχές όπου οι εναλλαγές μεταξύ μαρμάρων, μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και αμφιβολιτών είναι πολύ έντονες, υποδεικνύοντας ότι μεταξύ των λιθολογιών αυτών υπάρχει υδραυλική σύνδεση, καθώς το επιφανειακό νερό κυκλοφορεί μέσω αυτών των ασυνεχειών. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών. Από την άλλη πλευρά, μικρές τιμές χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών, παρατηρείται στους γρανοδιορίτες και στις μεταλπικές αποθέσεις και σε περιοχές όπου κυριαρχεί η εμφάνιση μίας μόνο λιθολογίας. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι περιοχές αυτές δεν έχουν επηρεαστεί από την τεκτονική δραστηριότητα της περιοχής.

5.2.6 Βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών

Ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την υδραυλική συμπεριφορά του μέσου ασυνεχειών, αφού όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο η ροή του νερού εντός του πετρώματος είναι ομαλή και ενιαία. Η παράμετρος αυτή, σε

συνδυασμό με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, προσδιορίζουν το βαθμό της ανισοτροπίας της υπόγειας ροής στο μέσο ασυνεχειών. Η επίδραση της παραμέτρου είναι τέτοια, που στην ακραία περίπτωση του πολύ υψηλού βαθμού διασύνδεσης, το μέσο ασυνεχειών είναι δυνατόν να συμπεριφέρεται ως ομογενές και ισότροπο πορώδες μέσο (Στουρνάρας, 2005).

Για την κατασκευή του χάρτη κατανομής του βαθμού διασύνδεσης, ακολουθήθηκαν τα εξής δύο στάδια (Εικόνα 5.9):

- Στο πρώτο στάδιο ψηφιοποιήθηκαν όλα τα σημεία τομής δύο ή περισσότερων ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.
- Στο δεύτερο στάδιο υπολογίστηκε με τη βοήθεια γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, ομοίως με τη χωρική διασύνδεση, ο αριθμός των σημείων τομής ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

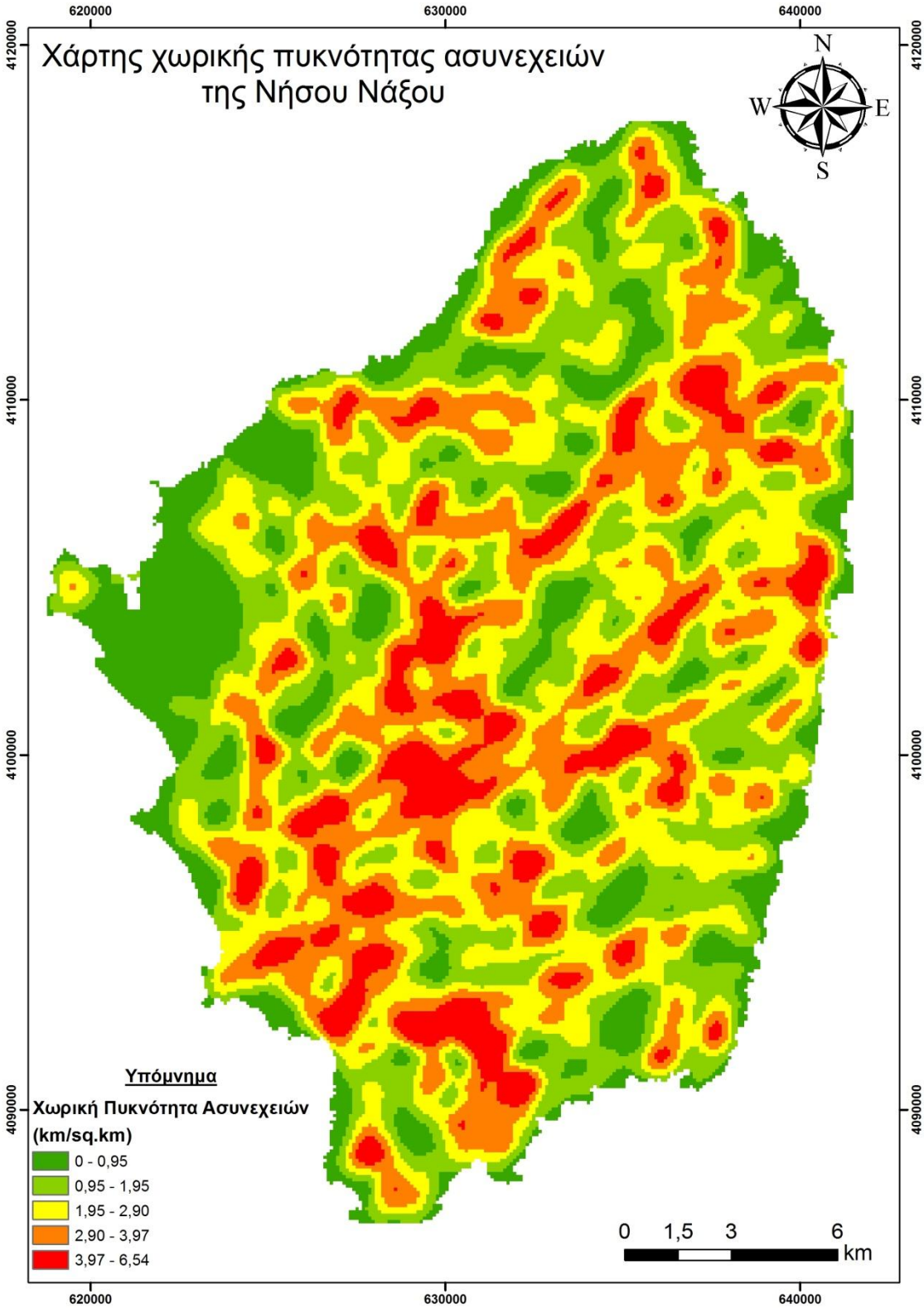
Σκοπός της κατασκευής του συγκεκριμένου χάρτη είναι ο προσδιορισμός περιοχών, οι οποίες εμφανίζουν διάφορες διευθύνσεις ασυνεχειών. Σε περιπτώσεις περιοχών, όπου δεν υπάρχουν ασυνέχειες ή δεν τέμνονται, αλλά είναι παράλληλες ή υποπαράλληλες, το αποτέλεσμα του χάρτη είναι κενό χωρίς τιμές ή εμφανίζονται πολύ μικρές τιμές πυκνότητας.

Συνδυάζοντας τους χάρτες της χωρικής πυκνότητας και του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών, επιβεβαιώνεται η ανομοιογενής χωρική κατανομή των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης, ενώ ταυτόχρονα αποκαλύπτεται ότι περιοχές με διαφορετικά λιθολογικά χαρακτηριστικά, εμφανίζουν ίδιες τιμές χωρικής πυκνότητας, αλλά και ίδιες τιμές βαθμού διασύνδεσης. Επίσης, παρατηρείται μεγάλες τιμές του βαθμού διασύνδεσης στις ίδιες περιοχές όπου παρατηρούνται και υψηλές τιμές χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών.

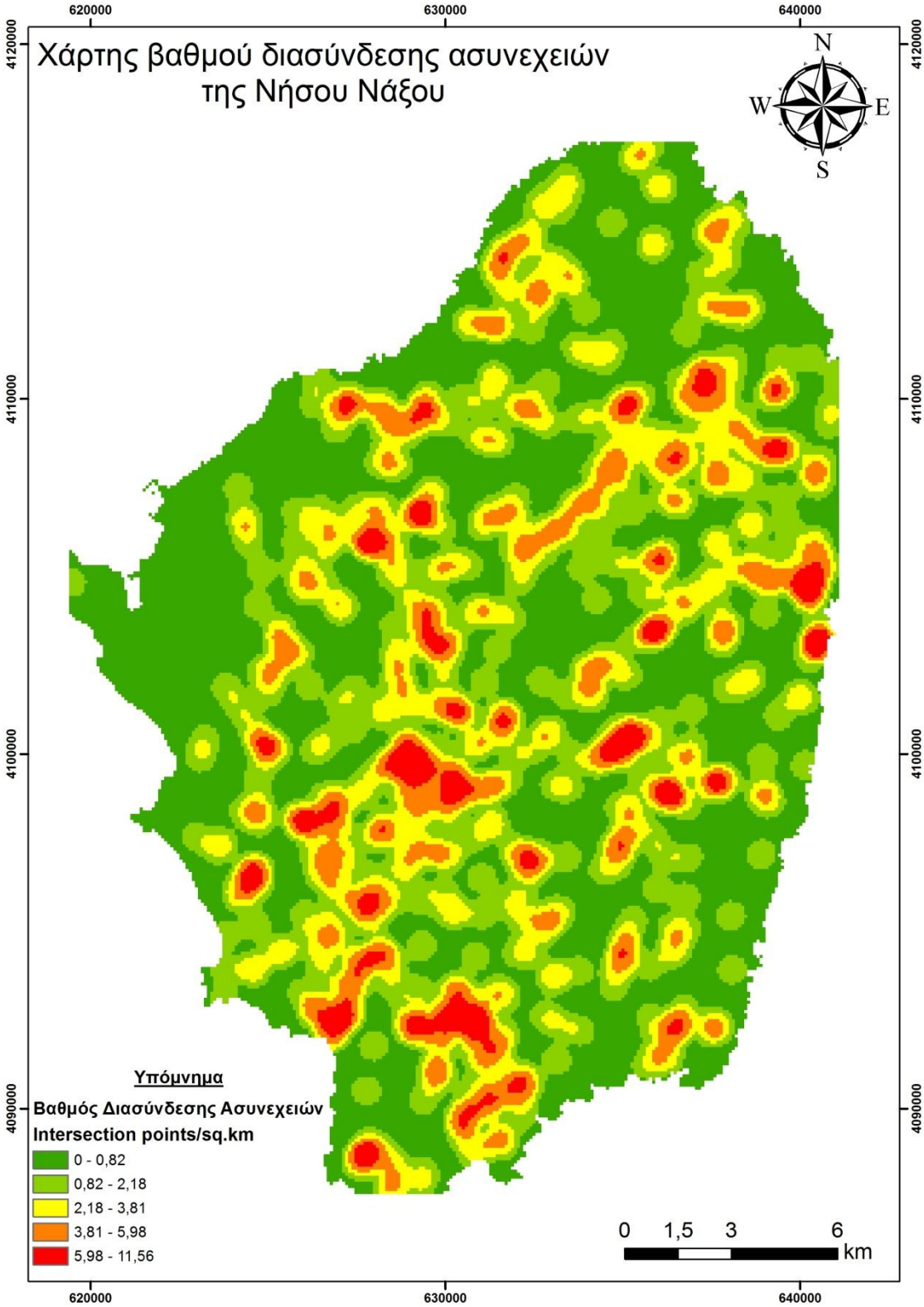
Το γεγονός ότι παρατηρείται όμοιος βαθμός διάρρηξης σε περιοχές με διαφορετική λιθολογία, ενισχύει την άποψη ότι ο βαθμός διάρρηξης, και κατά συνέπεια και το υδραυλικό δυναμικό του μέσου ασυνεχειών, είναι ανεξάρτητος της λιθολογίας και ταυτόχρονα εξαρτώμενος από το βαθμό της πλαστικής και εύθραυστης παραμόρφωσης των περιοχών αυτών.

Τέλος, τονίζεται ότι, από τα αποτελέσματα της μελέτης του μέσου ασυνεχειών, είναι δυνατή η εκτίμηση ζωνών μεγαλύτερης κατείσδυσης, ώστε να χρησιμοποιηθούν στο υδρογεωλογικό μοντέλο. Η εκτίμηση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι όσο πιο κατακερματισμένο είναι ένα πέτρωμα, τόσο μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα θα εμφανίζει, ενώ δεν χρησιμοποιούνται

τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που προκύπτουν από δοκιμαστικές αντλήσεις, καθώς δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις.



Εικόνα 5.8: Χάρτης χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών στη νήσο Νάξο.



Εικόνα 5.9: Χάρτης βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών στη νήσο Νάξο.

Κεφάλαιο 6ο - Γεωμορφολογία

6. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

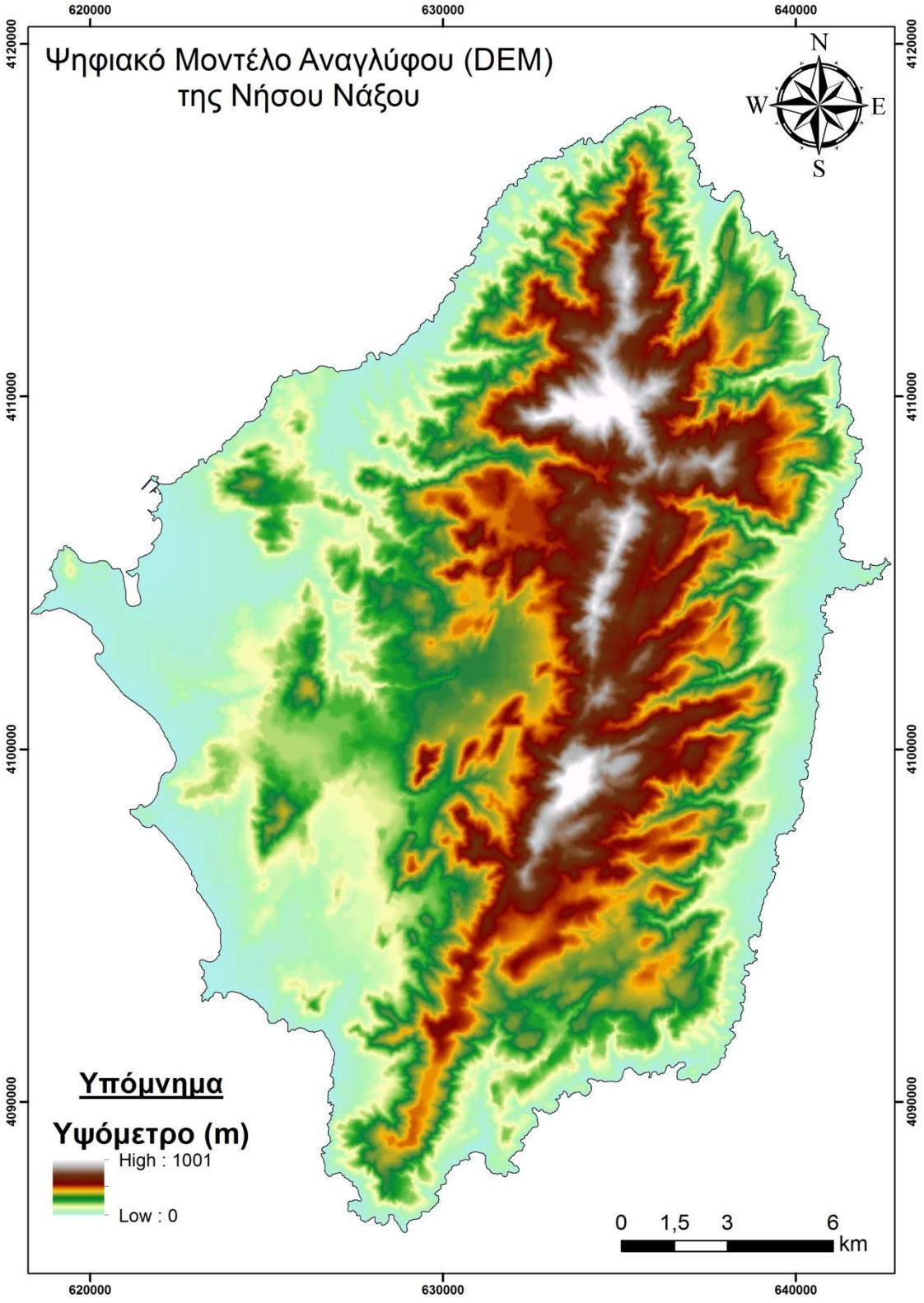
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΝΑΞΟΥ

Η μορφολογία της νήσου Νάξου, όπως και των υπόλοιπων Κυκλάδων, εξαρτάται άμεσα από τη λιθολογία, τη δράση του τεκτονισμού και το κλίμα. Το σχήμα της είναι επίμηκες, με μέγιστο άξονα μήκους 32,77 km και μέγιστο άξονα πλάτους 23,86 km (Ευελπίδου, 2001, Evelpidou et al., 2005). Το ανάγλυφό της είναι ορεινό, με μια ορεινή ράχη σχεδόν ενιαία, γυμνή και βραχώδη, να την κατατέμνει από το βόρειο άκρο της μέχρι το νότιο. Το μέγιστο υψόμετρο του νησιού παρατηρείται σχεδόν στο κέντρο της ράχης αυτής, στο όρος Ζευς (ή Ζα), και ισούται με 1001 m (Εικόνα 6.1).

Οι ακτές της Νάξου φτάνουν σε μήκος τα 148 km, είναι πολυσχιδείς και σχηματίζουν ένα μεγάλο αριθμό κόλπων και ορμών. Χαρακτηρίζονται ως απότομες στα νότια και υπήνεμες στα δυτικά, με πολλούς κόλπους και αμμουδερές παραλίες. Η ποικιλία αυτή των ακτών οφείλεται κυρίως στις λιθολογικές εναλλαγές και στην τεκτονική που έχει επηρεάσει την ευρύτερη περιοχή, μιας και η διεύθυνση και το σχήμα των ακτών είναι αποτέλεσμα είτε ρηγμάτων, είτε αποτέλεσμα της θαλάσσιας διάβρωσης πάνω σε ρηξιγενείς ζώνες ή ζώνες διακλαδώσεων. Πλήρως ανεπτυγμένες κολπώσεις και ασφαλείς φυσικοί λιμένες δεν παρουσιάζονται στο νησί, με αποτέλεσμα οι κάτοικοι να ασχολούνται περισσότερο με γεωργικές και κτηνοτροφικές εργασίες και πολύ λιγότερο με αλιευτικές.

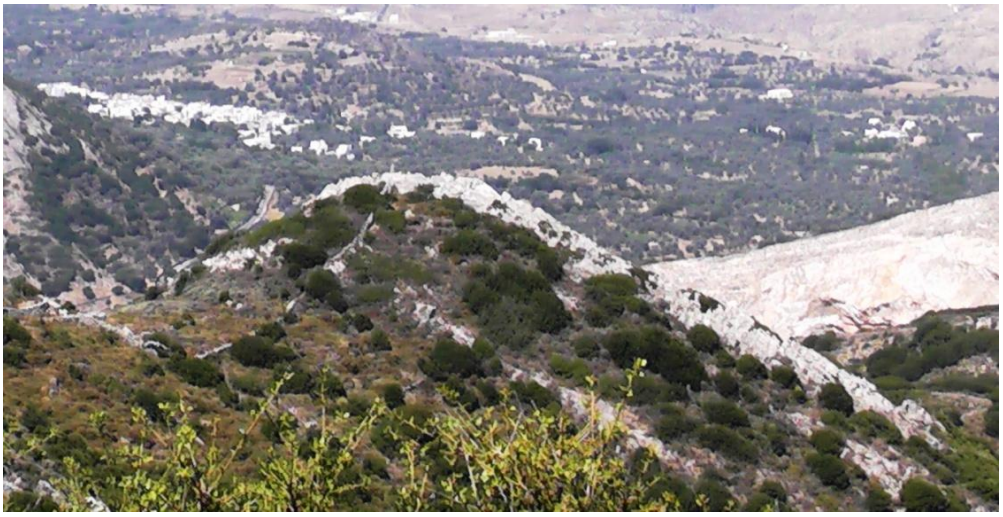
Η Νάξος αποτελείται από ποικίλους σχηματισμούς διαφορετικής αντίστασης στη διάβρωση, ενώ το εύκρατο θαλάσσιο κλίμα που πρακτικά επιβάλλει τη σχεδόν πλήρη ανυπαρξία φυτοκάλυψης, η οποία σε συνδυασμό με τη δράση του υδρογραφικού δικτύου και της τεκτονικής δραστηριότητας, έχουν σχηματίσει εντυπωσιακές γεωμορφές σε όλο το νησί. Η διάβρωση στη Νάξο λαμβάνει χώρα κυρίως μέσω των όμβριων υδάτων, τα οποία, σε συνδυασμό με το μεταφερόμενο υλικό, διευρύνουν προϋπάρχουσες ασυνέχειες δημιουργώντας ποικιλία γεωμορφών.

Οι γεωμορφές που παρατηρούνται στο νησί μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τις μορφές διάβρωσης και τις μορφές απόθεσης. Στις μορφές διάβρωσης συμπεριλαμβάνονται γεωμορφές όπως οι μορφές κυψελοειδούς αποσάθρωσης (tafoni) στο δυτικό τμήμα της νήσου (Εικόνα 6.2) και τα hogbacks στο κεντρικό τμήμα της νήσου (Εικόνα 6.3), ενώ στις μορφές απόθεσης συμπεριλαμβάνονται οι πεδιάδες και οι αποθέσεις των αλλουβιακών ριπιδίων και των κώνων κορημάτων (Ευελπίδου, 2001).



Εικόνα 6.1: Το ανάγλυφο της νήσου Νάξου.

Εικόνα 6.2: Μορφή κυψελοειδούς αποσάθρωσης (tafoni) σε γρανοδιοριτικό πέτρωμα στη νήσο Νάξο (Evelpidou et al., 2010).



Εικόνα 6.3: Hogback στο κεντρικό τμήμα της νήσου Νάξου.

Κυριότερος όμως μορφογενετικός παράγοντας για την περιοχή είναι ο τεκτονισμός, καθώς όπως έχει αναφερθεί, λόγω της γεωτεκτονικής της τοποθέτησης, η Νάξος έχει υποστεί τη δράση πολλών διαδοχικών, παλαιών και νέων, τεκτονικών φάσεων. Σύμφωνα με το Σαμπώ (1991), το σχήμα των νησιών των Κυκλάδων, αλλά και η διευθέτησή τους στο χώρο, οφείλεται αποκλειστικά στη δράση του τεκτονισμού, πτυχογόνου ή ρηγματογόνου. Επίσης η κύρια έκφραση του ανάγλυφου οφείλεται σχεδόν ολοκληρωτικά στη δράση του τεκτονισμού, ο οποίος εκδηλώνεται κύρια σαν ένας τεκτονισμός κατά τεμάχη (block-faulting).

Όμως η τεκτονική δραστηριότητα μπορεί να επηρεάσει διάφορες παραμέτρους, οι οποίες συνθέτουν το ανάγλυφο μιας περιοχής. Μελετώντας την κατανομή των τιμών κλίσης κατά μήκος μιας τομής μεταξύ Άνδρου, Τήνου, Μύκονου και Νάξου, έδειξαν την ύπαρξη μιας αναθόλωσης (doming), η οποία οφείλεται πιθανά στις κινήσεις μεταξύ των λιθοσφαιρικών πλακών (Sabot & Papanikolaou, 1976, Sabot, 1978). Επίσης, γεωμορφολογική έρευνα στα νησιά Νάξο, Σίφνο, Σύρο, Πάρο και Μύκονο (Σαμπώ, 1991), κατέληξε στον προσδιορισμό τεσσάρων κύριων επιφανειών ισοπέδωσης, οι οποίες έχουν διαφορετική ηλικία και βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα (Πίνακας 6.1). Αυτές οι επιφάνειες ισοπέδωσης σχηματίστηκαν με διαβρωτικές διεργασίες που έδρασαν στην επιφάνεια κάτω από ειδικές παλαιοκλιματικές συνθήκες και ανυψώθηκαν κατά τη διάρκεια κατακόρυφων τεκτονικών κινήσεων στο Νεοτριτογενές, οι οποίες εναλλάσσονταν με φάσεις σχετικής τεκτονικής ηρεμίας (Riedl et al., 1982). Η τελευταία ανοδική φάση άρχισε το Παλαιοπλειστόκαινο και η μεγαλύτερη ανύψωση παρατηρείται στη Νάξο με σταδιακή μείωση στα άλλα νησιά.

Σύμφωνα με τους Riedl et al. (1982), η μέγιστη διάβρωση έλαβε χώρα κατά το Τορτόνιο, ενώ όσον αφορά τις επιφάνειες ισοπέδωσης, το σύστημα των χαμηλότερων υψομέτρων (100 m) αντιπροσωπεύει πεδία υπωρειών, το σύστημα των επιφανειών στα 230 m αντιπροσωπεύουν το ανάγλυφο της βάσης αποσάθρωσης, ενώ τα συστήματα επιφανειών ισοπέδωσης που βρίσκονται σε μεγάλα υψόμετρα, αντιστοιχούν σε περιθώρια κλιτύων και έχουν την ίδια ηλικία με τα προηγούμενα.

Πίνακας 6.1: Οι τέσσερις κύριες επιφάνειες ισοπέδωσης στις Κυκλάδες (Riedl et al., 1982, Σαμπώ, 1991).

Ηλικία επιφανειών ισοπέδωσης	Υψόμετρο (m)
Μεσσήνιο – Κάτω Πλειόκαινο	800 - 1000
Μεσσήνιο – Κάτω Πλειόκαινο	450 – 600
Μεσσήνιο – Κάτω Πλειόκαινο	230
Πλειοπλειστόκαινο - Παλαιοπλειστόκαινο	100

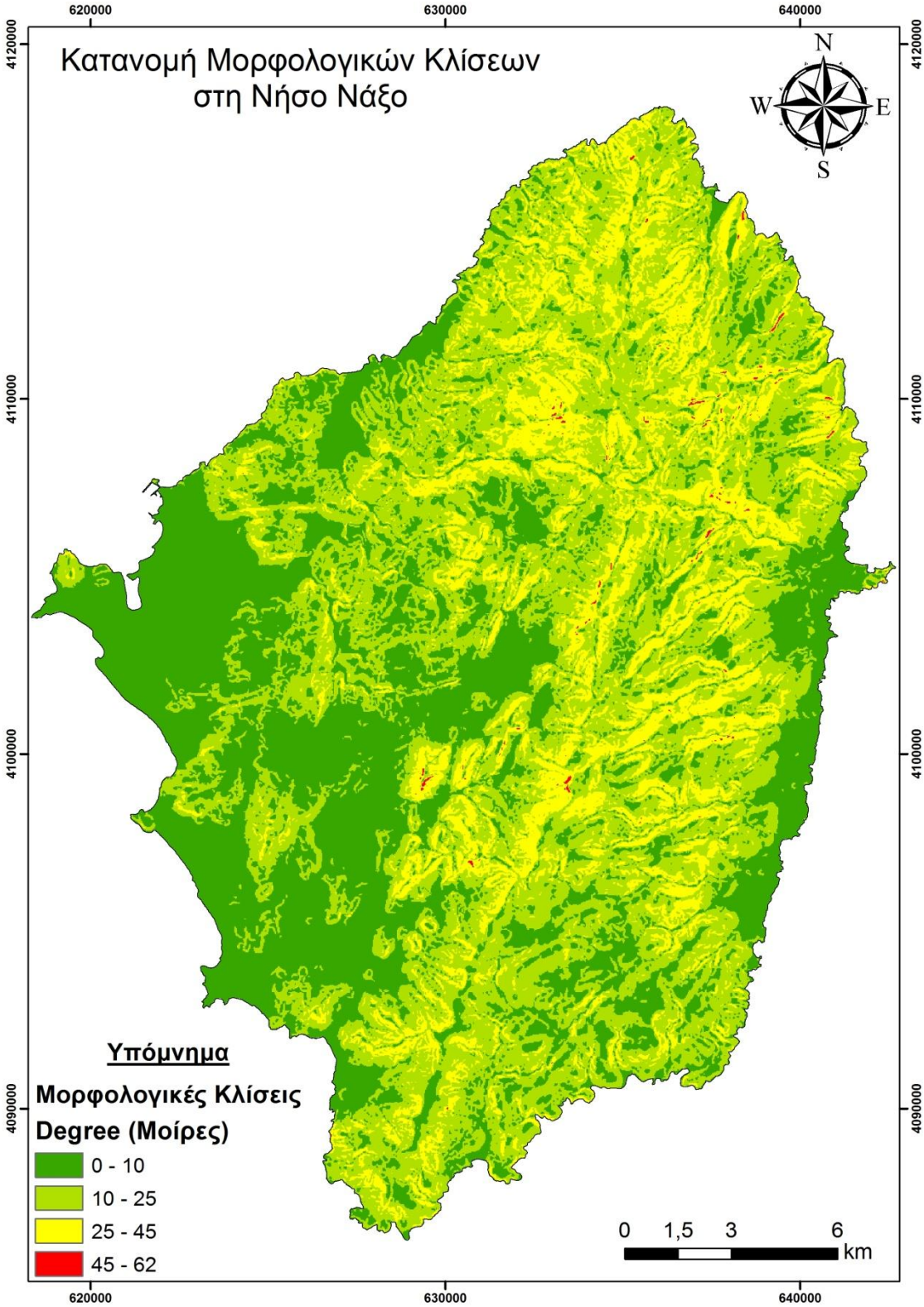
Ακόμη, στους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τις διαβρωτικές διαδικασίες περιλαμβάνονται και οι μορφολογικές κλίσεις. Κατασκευάζοντας ένα χάρτη κατανομής των μορφολογικών κλίσεων, είναι δυνατόν να αναγνωριστούν διαφοροποιημένες γεωμορφολογικές ενότητες λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό ανάγλυφο του εδάφους. Στη

δυτική πεδινή ζώνη, η οποία αντιπροσωπεύει το 30% περίπου της συνολικής έκτασης του νησιού, το ανάγλυφο είναι ήπιο και οι κλίσεις του εδάφους μικρές της τάξεως του 5%, όπου λιθολογικά κυριαρχούν πρόσφατες ιζηματογενείς σχηματισμοί. Το ανάγλυφο στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νησιού, παρουσιάζει κλίσεις άνω του 35%, ιδιαίτερα στο ορεινό τμήμα του νησιού, όπου λιθολογικά κυριαρχούν οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, τα μάρμαρα και ο μιγματίτης (Εικόνες 6.4 & 6.5). Επίσης, μέσω των απότομων μορφολογικών κλίσεων, γίνεται εμφανής η διαφορική διάβρωση και τα όρια των τοπογραφικών κάμψεων. Τα όρια των τοπογραφικών κάμψεων εμφανίζονται κυρίως στην ανατολική Νάξο, στη λιθολογική ενότητα μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων-μαρμάρων, ενώ απότομες αλλαγές στην τοπογραφία παρατηρούνται μεταξύ διαφορετικών λιθολογικών σχηματισμών, όπως μεταξύ του μιγματίτη, των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και των μαρμάρων και συνδέονται με τα ρήγματα της περιοχής (Ευελπίδου, 2003). Έτσι, η μεγάλη διασπορά των κλίσεων που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης συνδέεται όχι μόνο με τα τεκτονικά χαρακτηριστικά, αλλά και με τα λιθολογικά, τα οποία καθόρισαν με τη σειρά τους την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου και της μορφολογίας γενικότερα.

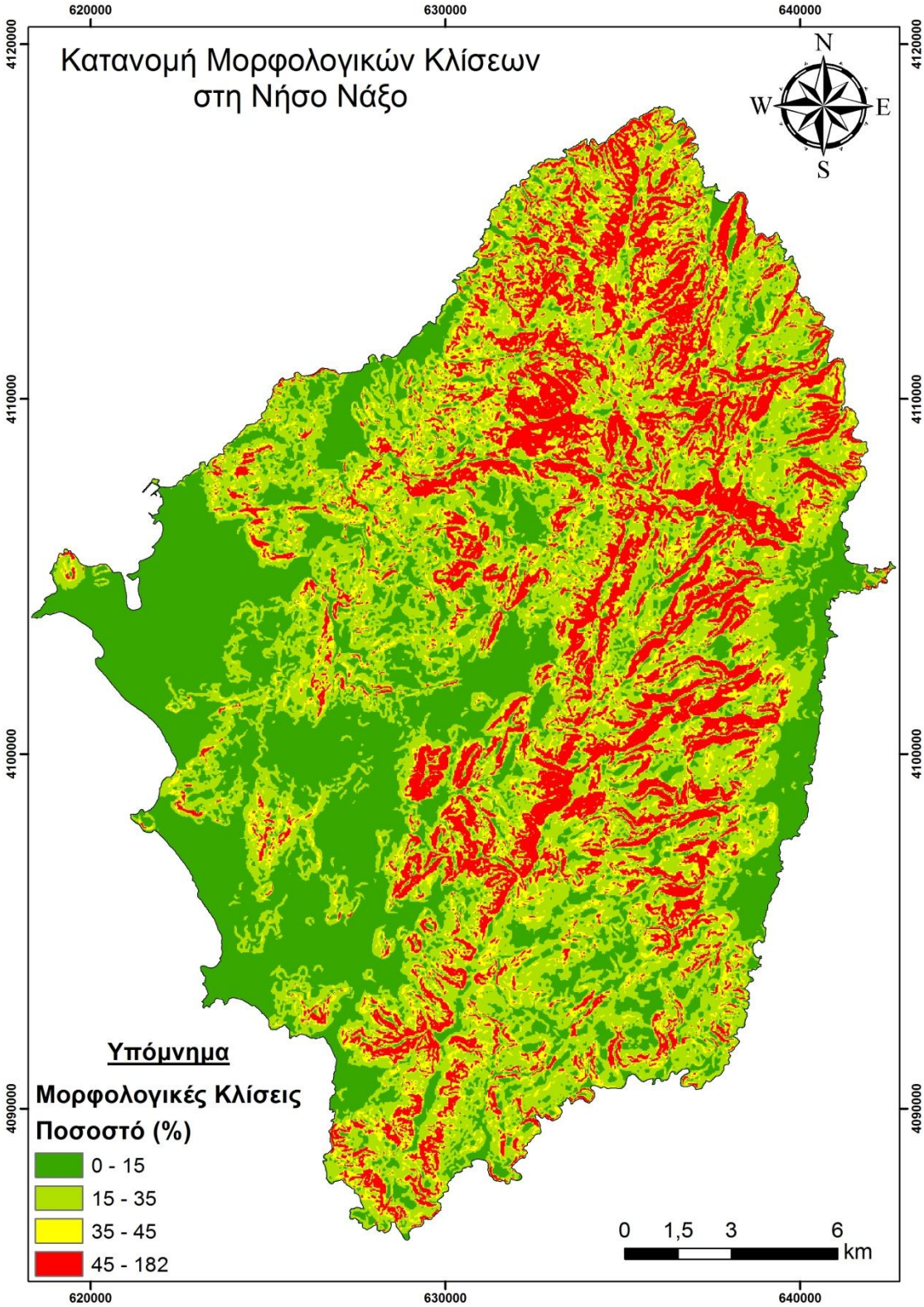
Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι η τοπογραφία έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του υδρολογικού και υδρογεωλογικού περιβάλλοντος. Όσο πιο μεγάλη παρατηρείται η μορφολογική κλίση σε μια περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιφανειακή απορροή. Κατά συνέπεια μειώνεται δραματικά η κατείσδυση, με αποτέλεσμα η αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων να είναι εξίσου μικρή.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η καρστικοποίηση στη νήσο δεν είναι σημαντική (Evelpidou et al., 2005). Οι ελάχιστες επιφανειακές και υπόγειες καρστικές μορφές που συναντώνται, έχουν σχηματιστεί σε παλιότερες γεωλογικές περιόδους, όπου το κλίμα ήταν πιο υγρό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η έκταση των συμπαγών ανθρακικών πετρωμάτων μεγάλου πάχους είναι μικρή, ενώ η έντονη εναλλαγή τους με γνεύσιους και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, δεν επιτρέπει την κατείσδυση του νερού σε μεγάλο βάθος. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει και το κλίμα, καθώς λόγω των πολύ μικρό αριθμό βροχοπτώσεων, η χημική αποσάθρωση των ανθρακικών πετρωμάτων να είναι αμελητέα (Ευελπίδου, 2001).

Επιφανειακές καρστικές μορφές που παρατηρούνται είναι δακτυλογλυφές, γλυφές και αμαξοτροχιές μικρής κλίμακας, ενώ υπόγειες καρστικές μορφές που παρατηρούνται είναι ένας μικρός αριθμός μικρών σπηλαίων, όπως το σπήλαιο του Ζα στην ομώνυμη οροσειρά.



Εικόνα 6.4: Χάρτης κατανομής των μορφολογικών κλίσεων (σε μοίρες) της νήσου Νάξου.



Εικόνα 6.5: Χάρτης κατανομής των επί τοις εκατό μορφολογικών κλίσεων της νήσου Νάξου.

6.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί μορφογενετικό παράγοντα και αποστραγγιστικό σύστημα, ενώ το σχήμα του αντικατοπτρίζει σχεδόν πάντα τις γεωλογικές, τεκτονικές και κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στη συγκεκριμένη περιοχή. Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου σε κάθε λεκάνη απορροής εξαρτάται από τη λιθολογία, το μορφολογικό ανάγλυφο, τις βροχοπτώσεις, την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων και από τη διάβρωση και την αποσάθρωση.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου, έγινε καταρχήν η ταξινόμησή του κατά Strahler (1957). Σύμφωνα με αυτήν, κάθε κλάδος που δεν δέχεται νερά άλλων μικρότερων ρευμάτων ονομάζεται κλάδος 1ης τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη σύνδεση δύο κλάδων 1ης τάξης, ονομάζεται κλάδος 2ας τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση που συνδέονται δύο κλάδοι διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει εξακολουθεί να έχει την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συνδεόμενους κλάδους.

Από την ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της Νάξου σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Strahler, προκύπτει ότι αποτελείται από 878 κλάδους, από τους οποίους οι 668 είναι 1ης τάξης, οι 163 είναι 2ας τάξης, οι 40 είναι 3ης τάξης και οι 7 είναι 4ης τάξης (Πίνακας 6.2, Εικόνα 6.6).

Πίνακας 6.2: Ταξινόμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler της νήσου Νάξου.

Τάξη (u)	Αριθμός Κλάδων (Nu)
1	668
2	163
3	40
4	7
Σύνολο	878

Η γεωγραφική κατανομή των κλάδων δείχνει να είναι ασύμμετρη, καθώς στο νότιο και στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, το μήκος των κλάδων όλων των τάξεων είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με το υπόλοιπο νησί. Στο βόρειο τμήμα, το μήκος των κλάδων είναι επίσης μικρότερο από το κεντρικό τμήμα του νησιού, ενώ συγχρόνως το υδρογραφικό δίκτυο είναι καλύτερα ανεπτυγμένο σε σχέση με το νότιο τμήμα του νησιού. Επίσης το μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου συνδέεται άμεσα με τις μορφολογικές κλίσεις, καθώς στο

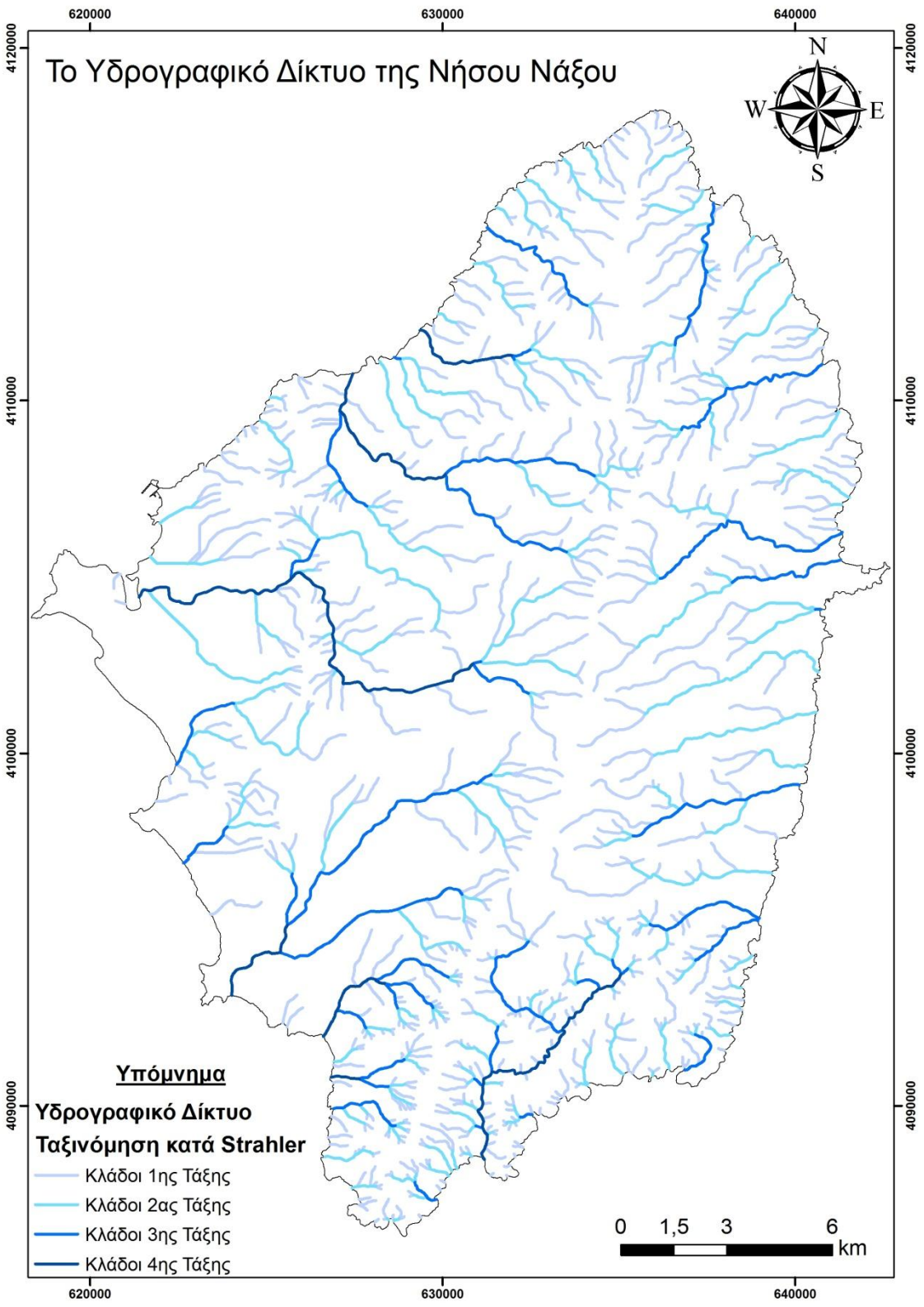
βόρειο τμήμα όπου οι κλίσεις είναι μεγαλύτερες, το μήκος των κλάδων είναι μεγαλύτερο, ενώ το ακριβώς αντίθετο ισχύει για το νότιο τμήμα του νησιού.

Όσον αφορά την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, παρατηρείται μεγαλύτερη πυκνότητα των υδατορεμάτων στα δυτικά και τα ανατολικά και μικρότερη στα βόρεια και νότια του νησιού. Για το λόγο αυτό παρατηρείται επίσης ότι το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζει κατανομή περίπου ακτινωτή και κάθετη προς τον κύριο υδροκρίτη.

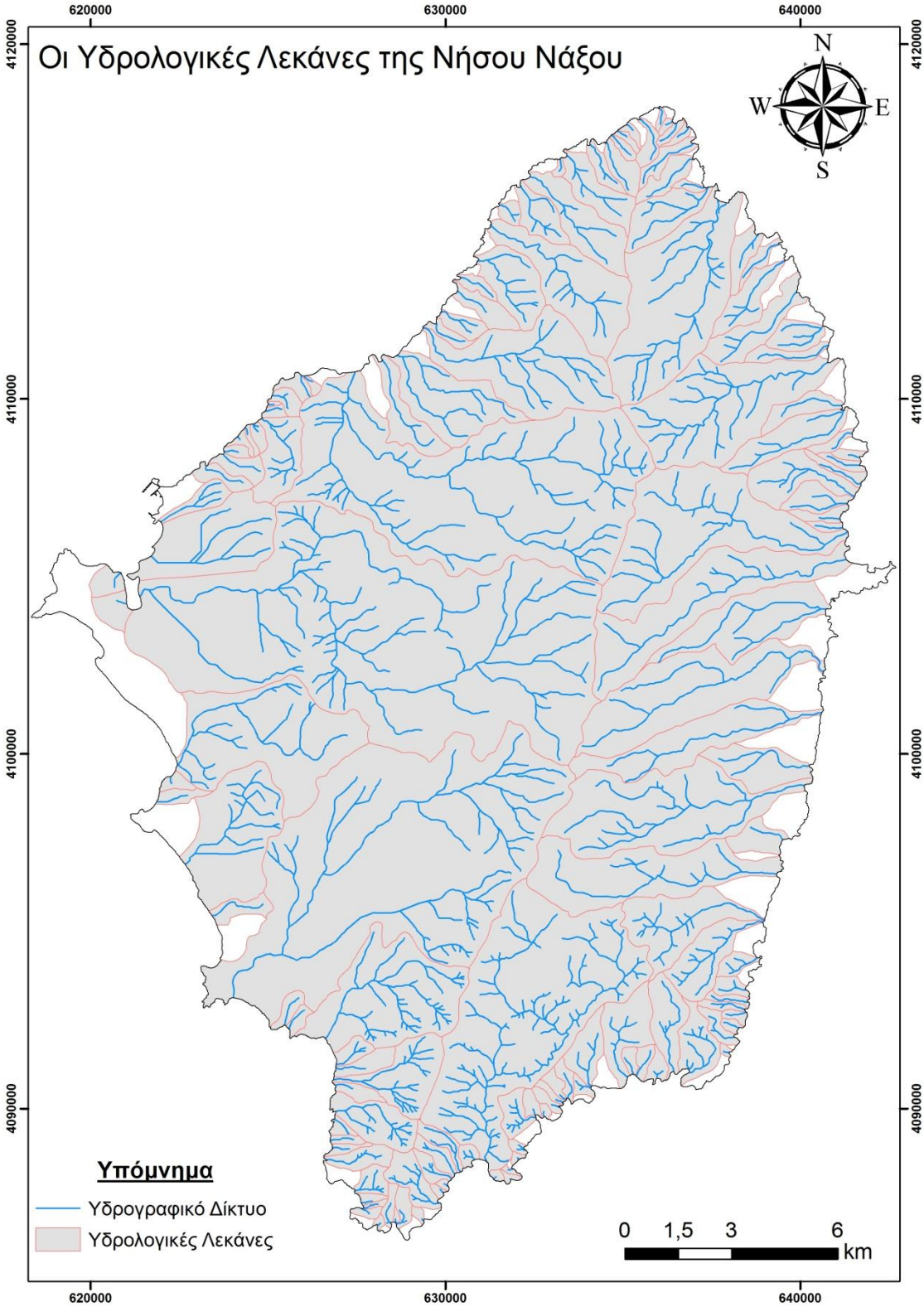
Σε γενικές γραμμές, τα κύρια χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου της Νάξου είναι ότι παρουσιάζει δενδριτική μορφή, συνδέεται άμεσα με τη γενική αντικλινική δομή του νησιού (Sabot, 1978, Ευελπίδου, 2001) και αναπτύσσεται και από τις δύο πλευρές της υδροκριτικής γραμμής του νησιού, η οποία ταυτίζεται με την κορυφογραμμή του ορεινού συγκροτήματος. Επίσης, το σύνολο των υδατορεμάτων χαρακτηρίζεται από μεγάλες κατά μήκος κλίσεις, μικρά πλάτη και σχετικά μεγάλα βάθη, ενώ η ροή τους είναι εποχιακή και εστιάζεται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα τους χειμερινούς μήνες. Οι ταχύτητες ροής σε αυτά είναι μεγάλες και οι χρόνοι παραμονής του νερού στο ίδιο σημείο πολύ μικροί, με ανάλογο εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Επίσης, ένας μεγάλος αριθμός των υδατορεμάτων ξεκινούν από τον κύριο υδροκρίτη του νησιού και καταλήγουν στη θάλασσα.

Λόγω των χαρακτηριστικών αυτών του υδρογραφικού δικτύου σε συνδυασμό με τις συχνές καταιγίδες που εκδηλώνονται στο νησί κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η γρήγορη απορροή διευκολύνεται, ενώ η διάβρωση ευνοείται σε περιοχές με αποσαθρωμένα τμήματα των σχηματισμών, σε αντίθεση με τα τμήματα εκείνα των βραχωδών-συμπαγών σχηματισμών (γρανίτες, μιγματίτες, μάρμαρα). Επίσης, σύνηθες φαινόμενο είναι η συσσώρευση κροκάλων και λεπτόκοκκου ιζήματος στις περιοχές εκβολής των ρεμάτων προς τη θάλασσα. Στα τμήματα αυτά, καθώς οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου διαμορφώνονται κυρίως μέσα σε χαλαρές εδαφικές αποθέσεις (αλλούβια), το φαινόμενο της διάβρωσης των πρανών τους είναι συνηθισμένο (Σ.Χ.Ο.Α.Π. Δήμου Δρυμαλίας, 2010).

Για την ποσοτική μελέτη του υδρογραφικού δικτύου κατασκευάστηκαν οι υδρολογικές λεκάνες της νήσου, σύμφωνα με τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και την τοπογραφία της περιοχής μελέτης (Εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.6: Χάρτης του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου κατά τάξη, σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Strahler.



Εικόνα 6.7: Χάρτης των υδρολογικών λεκανών της νήσου Νάξου.

6.3 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΝΑΞΟΥ

6.3.1 Γενικά

Για την ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου, μελετήθηκαν διάφορες μορφομετρικές παράμετροι, οι κυριότερες των οποίων είναι η υδρογραφική πυκνότητα και η υδρογραφική συχνότητα (Πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.3: Μορφομετρικές παράμετροι που μελετήθηκαν και αφορούν το υδρογραφικό δίκτυο και τις λεκάνες απορροής της νήσου Νάξου.

Μορφομετρική Παράμετρος	Συμβολισμός	Διάσταση
Τάξη Κλάδου	u	-
Αριθμός Κλάδων Τάξης u	Nu	-
Μήκος Κλάδων	Lu	km
Εμβαδόν Λεκάνης Απορροής	Au	km^2
Υδρογραφική Πυκνότητα	Du	km^{-1}
Υδρογραφική Συχνότητα	Fu	km^{-2}

Εκτός από τις παραπάνω μορφομετρικές παραμέτρους, μελετήθηκε επίσης η σχέση του υδρογραφικού δικτύου με τους λιθολογικούς σχηματισμούς της Νάξου, καθώς και η σχέση του με το ρηγματογόνο τεκτονισμό της νήσου.

6.3.2 Ανάλυση του Υδρογραφικού Δικτύου της Νήσου Νάξου

6.3.2.1 Μελέτη της Υδρογραφικής Υφής

Η υδρογραφική υφή μιας περιοχής εξαρτάται από τη συχνότητα και την πυκνότητα των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Η υδρογραφική υφή μπορεί να είναι λεπτή, στην περίπτωση που η πυκνότητα και η συχνότητα των κλάδων είναι μεγάλη, ή τραχεία, στην περίπτωση που η συχνότητα και η πυκνότητα των κλάδων είναι μικρή. Η κατάσταση του υδρογραφικού δικτύου μιας περιοχής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι (Μαρουκιάν κ.α., 2007):

- Η δομή του πετρώματος, η οποία με τη σειρά της μπορεί να επηρεάσει άμεσα την επιφανειακή ροή των κατακρημνισμάτων.
- Η διηθητικότητα του αποσαθρωμένου καλύμματος, οι διακλάσεις, οι διαρρήξεις, τα ρήγματα, η διαλυτότητα του πετρώματος, κ.α.

- Το κλίμα της περιοχής, που επιδρά έμμεσα επί της υφής, δεδομένου ότι τα κατακρημνίσματα, η θερμοκρασία και ο άνεμος αυξάνουν ή μειώνουν την ποσότητα του επιφανειακού νερού που βρίσκεται στο υδρογραφικό δίκτυο σε μια ορισμένη στιγμή. Εκτός αυτού, το κλίμα επηρεάζει το είδος και την πυκνότητα της βλάστησης που θα δημιουργηθεί σε μια περιοχή. Η πυκνή βλάστηση αυξάνει τη διηθητικότητα του εδάφους και των πετρωμάτων, αν αυτά είναι υδροπερατά.
- Το αρχικό ανάγλυφο πάνω στο οποίο δημιουργείται και εξελίσσεται ένα υδρογραφικό δίκτυο, μπορεί να επηρεάσει την αρχική υφή του δικτύου.
- Ο χρόνος είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην εξέλιξη της υδρογραφικής υφής σε μια περιοχή.

Μέσω της υδρογραφικής υφής, εξετάζεται τον αν υπάρχει καλή σχέση ισορροπίας μήκους και αριθμών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, σε σχέση με το εμβαδόν της υδρογραφικής λεκάνης που αποστραγγίζουν.

Η υδρογραφική πυκνότητα ισούται με το συνολικό μήκος των κλάδων μιας υδρολογικής λεκάνης απορροής προς τη συνολική επιφάνεια αυτής. Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει την υδρογραφική πυκνότητα είναι:

$$D_u = \frac{\sum L_u}{\sum A_u}$$

Επιπλέον, η υδρογραφική πυκνότητα (σε km^{-1}) υποδεικνύει την απόσταση μεταξύ των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και τη φύση του επιφανειακού υλικού (λιθολογία), ενώ όσο μεγαλύτερη υπολογίζεται η υδρογραφική πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη υπολογίζεται να είναι και η επιφανειακή απορροή. Συνεπώς, η υδρογραφική πυκνότητα χαρακτηρίζει την επιφανειακή απορροή σε μια περιοχή και δίνει μια εκτίμηση του ποσοστού του βρόχινου νερού που ενδέχεται να κατεισδύσει στην περιοχή. Ως αποτέλεσμα όσο μικρότερη είναι η υδρογραφική πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ανανέωσης των υπαρχόντων υδροφορέων ή η πιθανότητα ύπαρξης δυνητικής ζώνης υπογείων υδάτων (Prasad et al., 2008).

Η κατανομή της υδρογραφικής πυκνότητας στη νήσο Νάξο είναι ασύμμετρη (Εικόνα 6.8). Οι λεκάνες απορροής της νήσου Νάξου παρουσιάζουν ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών υδρογραφικής πυκνότητας, από 0,36 km^{-1} έως 4,50 km^{-1}, γεγονός που οφείλεται στην ποικιλία

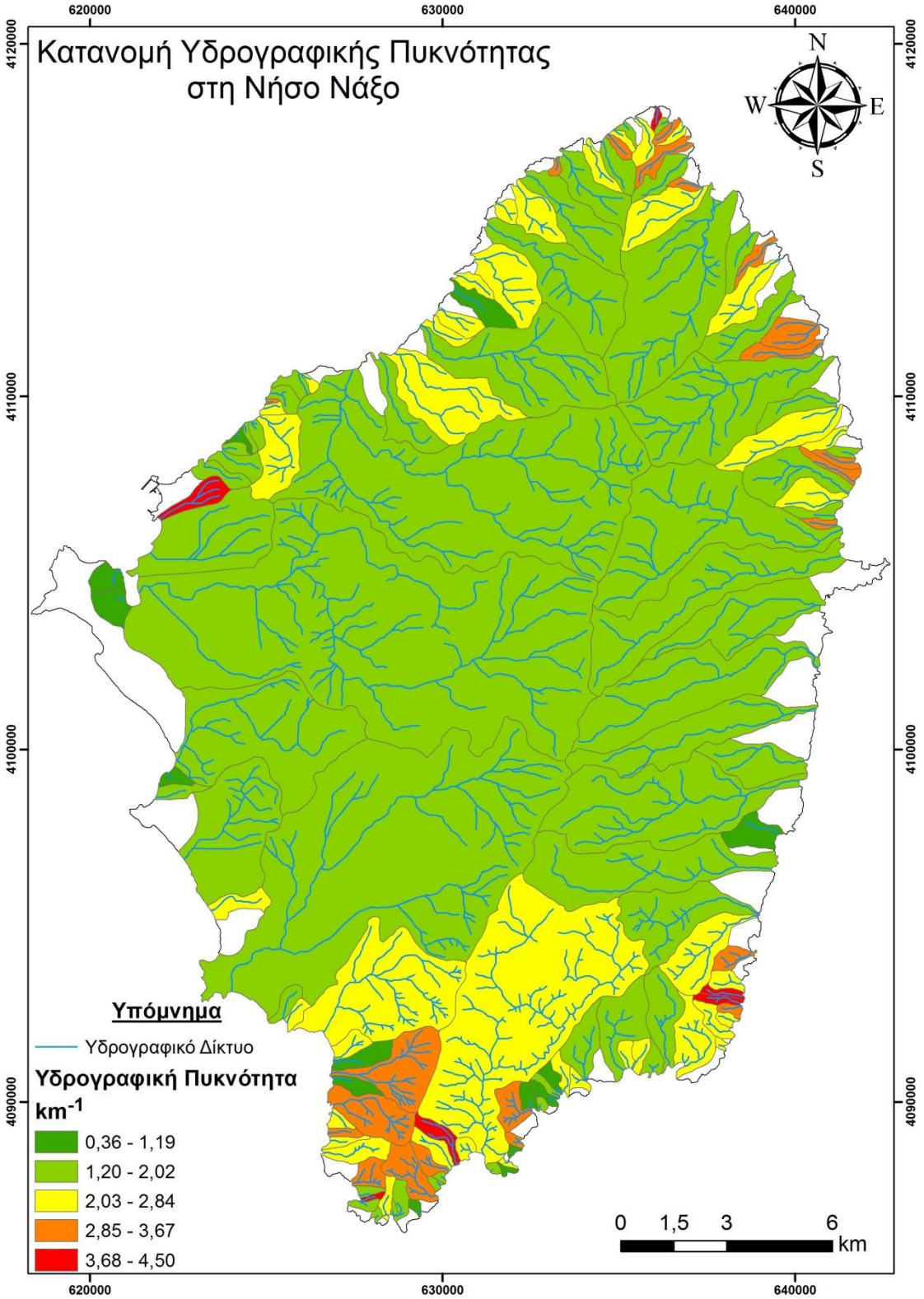
των λιθολογικών σχηματισμών. Οι μεγαλύτερες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας εμφανίζονται στο νότιο τμήμα του νησιού.

Η υδρογραφική συχνότητα ισούται με τον συνολικό αριθμό των κλάδων μιας συγκεκριμένης υδρολογικής λεκάνης προς τη συνολική επιφάνεια αυτής. Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει την υδρογραφική συχνότητα είναι:

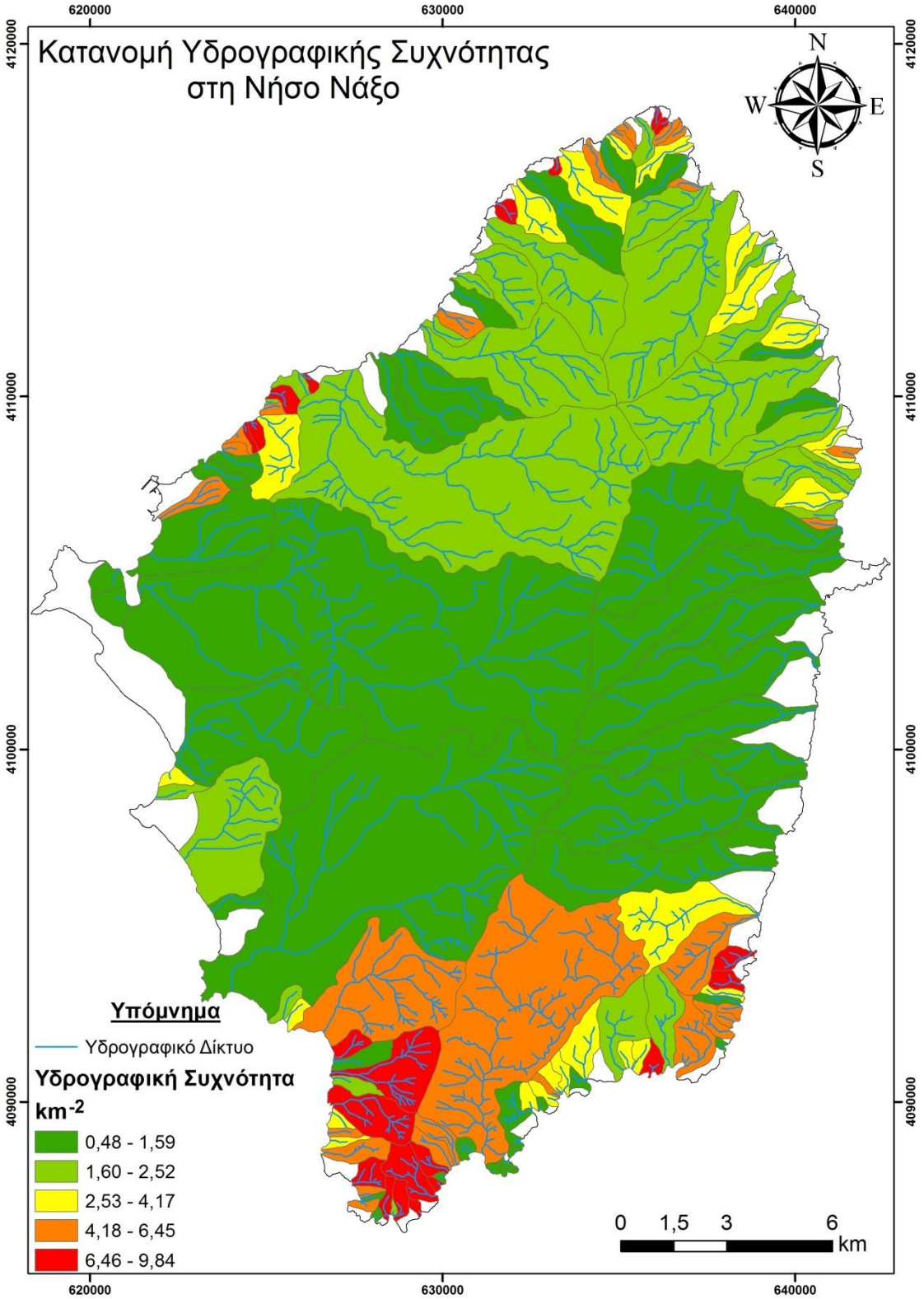
$$F_u = \frac{\sum N_n}{\sum A_u}$$

Η κατανομή της υδρογραφικής συχνότητας στη νήσο είναι επίσης ασύμμετρη (Εικόνα 6.9) και εμφανίζει μεγάλο εύρος τιμών, από 0,48 km^{-2} έως και 9,84 km^{-2}. Οι ελάχιστες τιμές εμφανίζονται στο βόρειο τμήμα του νησιού, ενώ οι μέγιστες τιμές στο νότιο τμήμα.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι τόσο η υδρογραφική πυκνότητα, όσο και η υδρογραφική συχνότητα παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους στο νότιο τμήμα του νησιού.



Εικόνα 6.8: Χάρτης κατανομής της υδρογραφικής πυκνότητας στις υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.



Εικόνα 6.9: Χάρτης κατανομής της υδρογραφικής συχνότητας στις υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.

6.3.2.2 Συσχέτιση του Υδρογραφικού Δικτύου με τους Λιθολογικούς Σχηματισμούς

Για τη συσχέτιση του υδρογραφικού δικτύου και της λιθολογίας, υπολογίστηκε ο αριθμός και το συνολικό μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου που βρίσκονται σε κάθε λιθολογία. Επίσης, έχοντας υπολογίσει το εμβαδόν εμφάνισης του κάθε λιθολογικού σχηματισμού, υπολογίστηκε επίσης σε κάθε έναν από αυτούς η πυκνότητα και η συχνότητα του υδρογραφικού δικτύου. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης παρατίθενται παρακάτω στους Πίνακες 6.4 και 6.5.

Όσον αφορά τον αριθμό των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.4, οι περισσότεροι εμφανίζονται στα μάρμαρα (Εικόνα 6.10), τα οποία παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη υδρογραφική πυκνότητα. Αντίθετα, ο γρανίτης εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή υδρογραφικής συχνότητας.

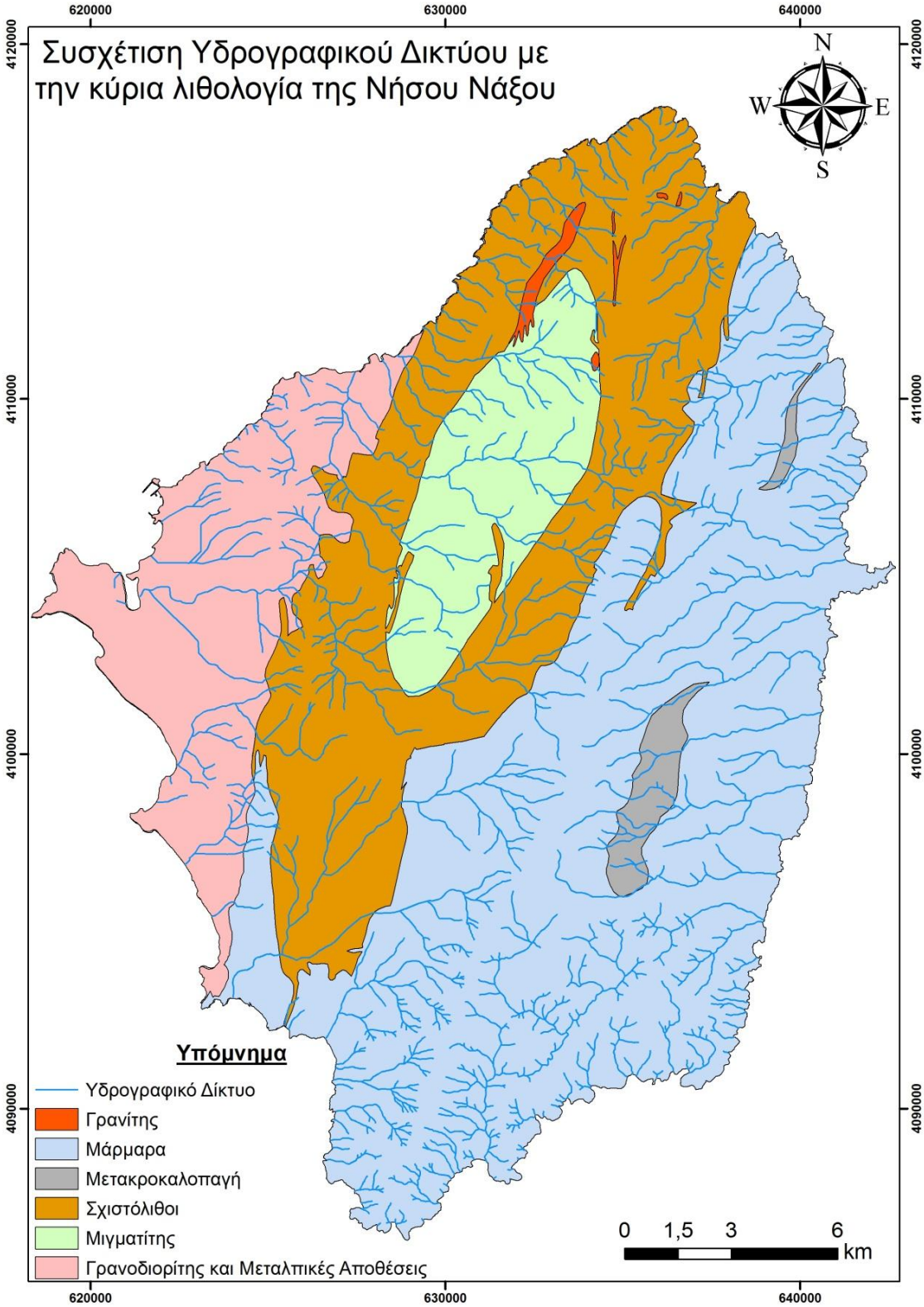
Ακόμη, στα μάρμαρα απαντώνται κλάδοι όλων των τάξεων (Πίνακας 6.5) όπως και στους σχιστόλιθους, με τη διαφορά ότι στους τελευταίους παρουσιάζεται το μέγιστο μήκος κλάδων όσον αφορά τους κλάδους 4ης τάξης. Αντίθετα, ο γρανίτης, τα μετακροκαλοπαγή και ο μιγματίτης δεν παρουσιάζουν κλάδους όλων των τάξεων, ενώ συγχρόνως εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές μήκους κλάδων στις τάξεις που εμφανίζουν.

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου σε σχέση με τη λιθολογία της νήσου Νάξου.

Λιθολογία	Κλάδοι Υ.Δ.	Μήκος Κλάδων (km)	Εμβαδόν Εμφάνισης Λιθολογίας (km^2)	Πυκνότητα (km^{-1})	Συχνότητα (km^{-2})
Γρανίτης	4	5,22	1,9	2,11	2,75
Μάρμαρα	528	359,14	207,25	2,55	1,73
Μετακροκαλοπαγή	13	7,64	7,21	1,80	1,06
Μεταλπικές Αποθέσεις	82	79,59	59,87	1,37	1,33
Μιγματίτης	47	48,03	35,74	1,32	1,34
Σχιστόλιθοι	204	213,36	117,28	1,74	1,82

Πίνακας 6.5: Μήκος κλάδων ανά τάξη και ανά λιθολογικό σχηματισμό.

Λιθολογία	Μήκος Κλάδων 1ης Τάξης (km)	Μήκος Κλάδων 2ας Τάξης (km)	Μήκος Κλάδων 3ης Τάξης (km)	Μήκος Κλάδων 4ης Τάξης (km)
Γρανίτης	0,98	-	4,24	-
Μάρμαρα	207,1	89,09	47,9	15,05
Μετακροκαλοπαγή	5,35	2,29	-	-
Μεταλπικές Αποθέσεις	42,44	22,18	9,51	5,46
Μιγματίτης	30,77	7,24	10,02	-
Σχιστόλιθοι	123,24	51,14	22,28	16,7



Εικόνα 6.10: Χάρτης του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου, σε σχέση με την κύρια λιθολογία.

6.3.2.3 Συσχέτιση του Υδρογραφικού Δικτύου με το Μέσο Ασυνεχειών

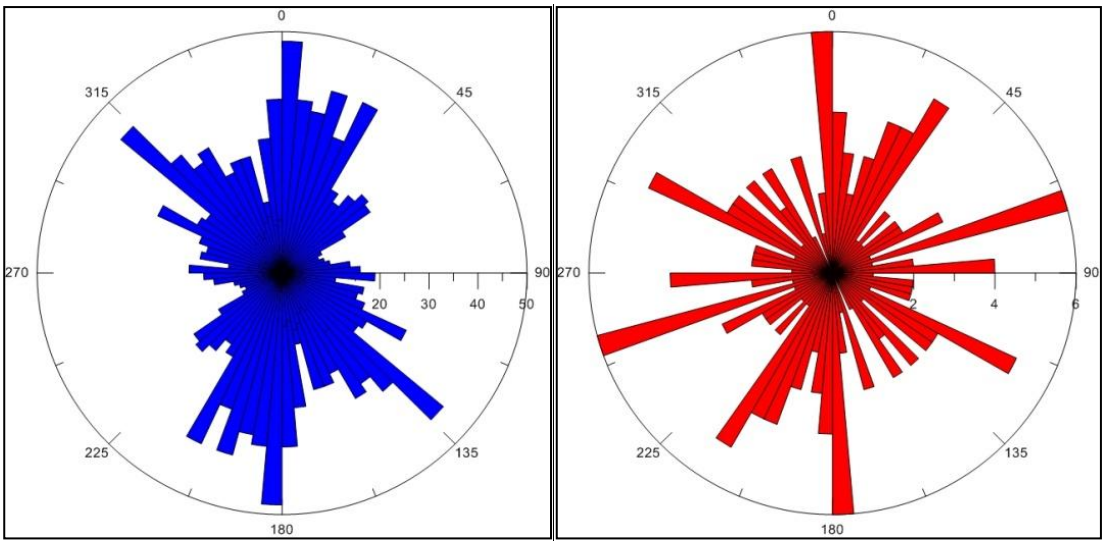
Είναι γνωστό, ότι τα ρήγματα και οι διακλάσεις αποτελούν ζώνες μειωμένης αντίστασης στη διάβρωση και οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου ακολουθούν συχνά τις τεκτονικές διευθύνσεις, καθώς το νερό ρέει ευκολότερα κατά μήκος των ασυνεχειών. Έτσι, και το υδρογραφικό δίκτυο της νήσου Νάξου αναμένεται να είναι κατά ένα αρκετά μεγάλο μέρος επηρεασμένο από τις ασυνέχειες της περιοχής μελέτης.

Για να είναι δυνατή η συσχέτιση των ασυνεχειών της περιοχής μελέτης με την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, είναι απαραίτητο να μελετηθούν οι διευθύνσεις τόσο των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου όσο και των ασυνεχειών, οι οποίες χαρτογραφήθηκαν μέσω μεθόδων τηλεπισκόπισης και εργασιών υπαίθρου.

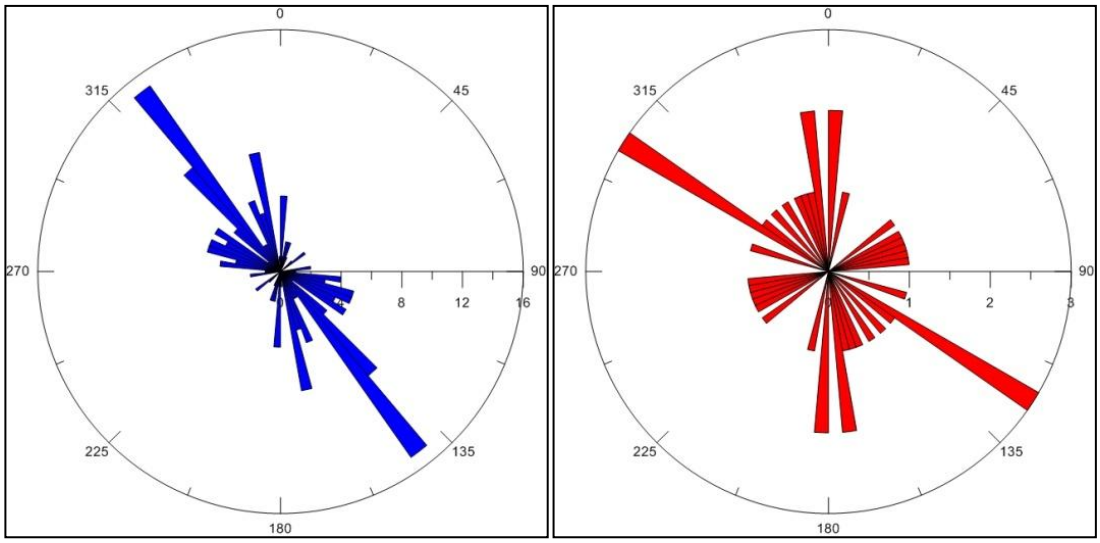
Για το λόγο αυτό, με τη βοήθεια γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, υπολογίστηκαν οι διευθύνσεις των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου όλων των τάξεων σε κάθε κύρια λιθολογία, κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα ροδοδιαγράμματα και συσχετίστηκαν με τα αντίστοιχα ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των ασυνεχειών (Εικόνες 6.11 – 6.16).

Από τα παρακάνω ροδοδιαγράμματα, προκύπτει ότι οι κύριες διευθύνσεις των ασυνεχειών σε κάθε κύρια λιθολογία της Νάξου ταυτίζονται με τις κύριες διευθύνσεις των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το υδρογραφικό δίκτυο είναι έντονα επηρεασμένο από τις νεοτεκτονικές διεργασίες που έχουν λάβει χώρα στη νήσο Νάξο.

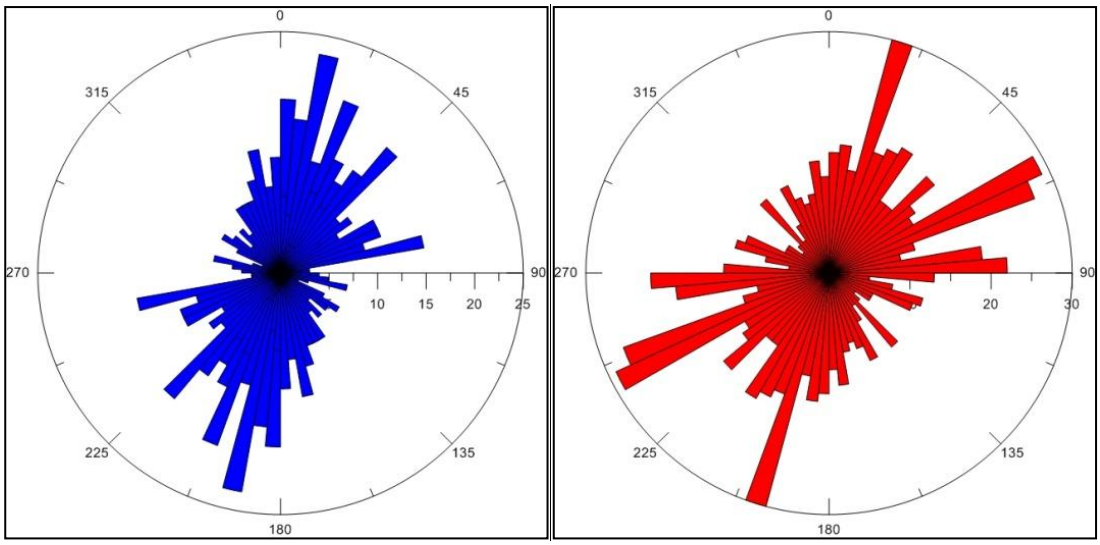
Ένα ακόμη στοιχείο, το οποίο υποδηλώνει την άμεση επιρροή του ρηγματογόνου τεκτονισμού στο υδρογραφικό δίκτυο της νήσου, είναι το γεγονός ότι το πλήθος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου βρίσκονται σε περιοχές όπου παρατηρούνται αυξημένες τιμές της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών, ενώ σε πολλές περιπτώσεις, κλάδοι μεγαλύτερης τάξης αναπτύσσονται κατά μήκος των περιοχών αυτών (Εικόνα 6.17).



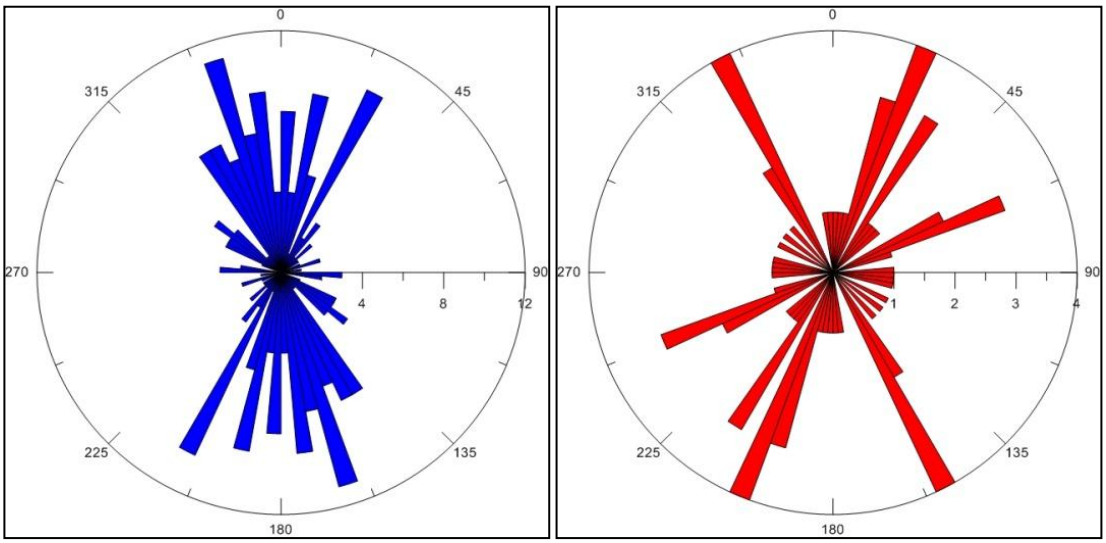
Εικόνα 6.11: Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (μπλε χρώμα) και των ασυνεχειών (κόκκινο χρώμα) στο γρανοδιορίτη και τις μεταλπικές αποθέσεις.



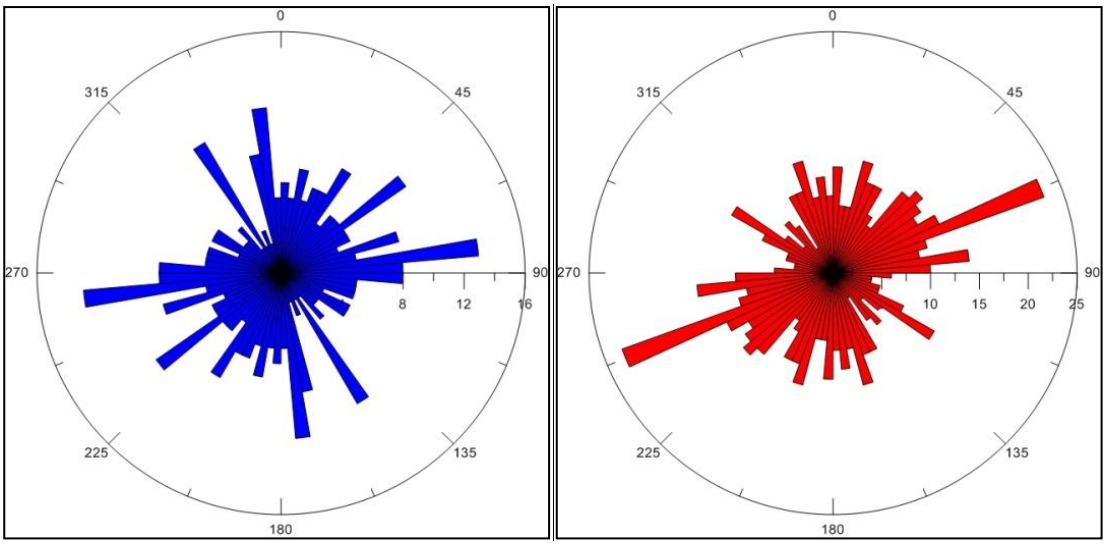
Εικόνα 6.12: Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (μπλε χρώμα) και των ασυνεχειών (κόκκινο χρώμα) στο γρανίτη.



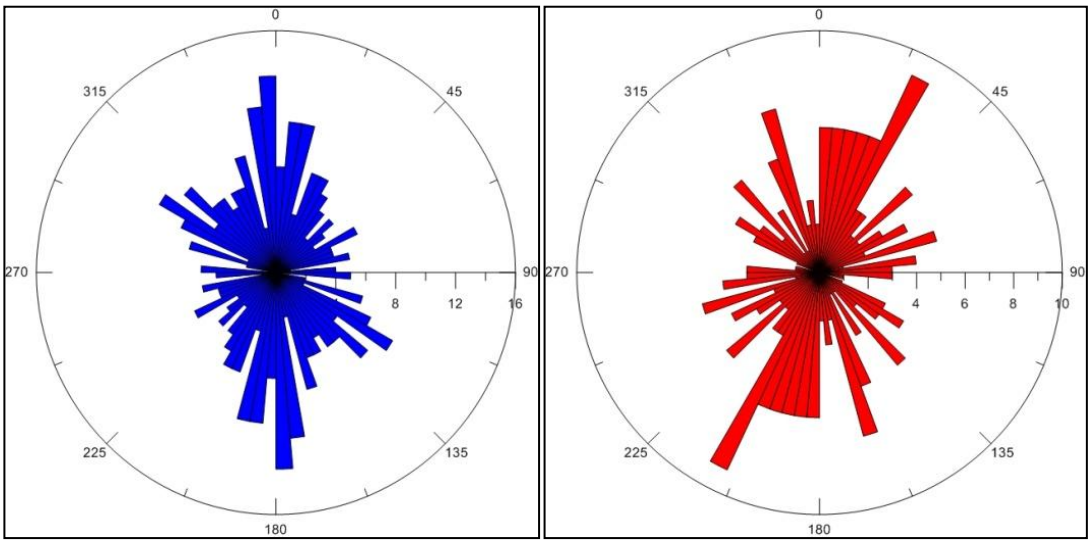
Εικόνα 6.13: Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (μπλε χρώμα) και των ασυνεχειών (κόκκινο χρώμα) στα μάρμαρα.



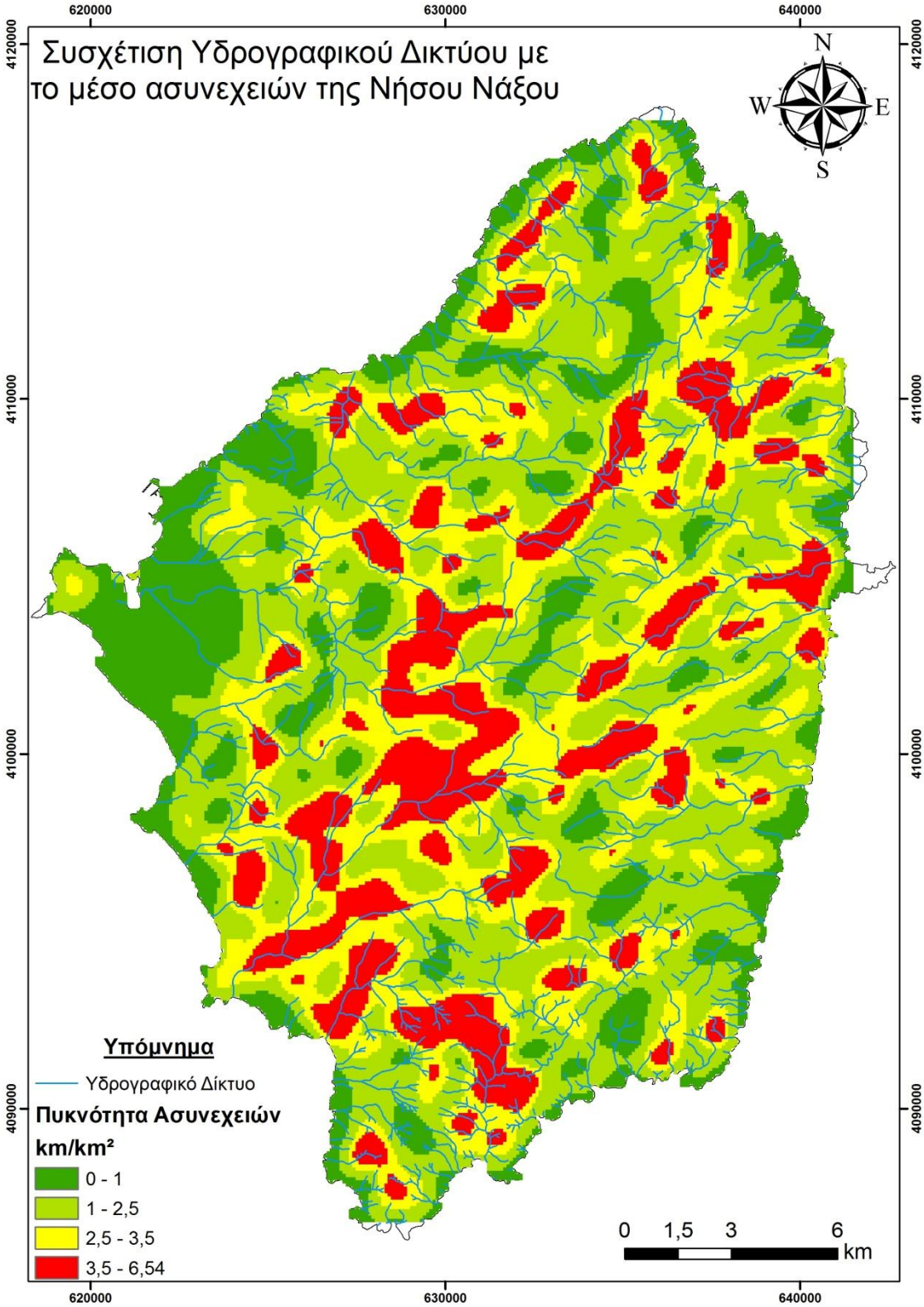
Εικόνα 6.14: Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (μπλε χρώμα) και των ασυνεχειών (κόκκινο χρώμα) στα μετακροκαλοπαγή.



Εικόνα 6.15: Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (μπλε χρώμα) και των ασυνεχειών (κόκκινο χρώμα) στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.



Εικόνα 6.16: Ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (μπλε χρώμα) και των ασυνεχειών (κόκκινο χρώμα) στο μιγματίτη.



Εικόνα 6.17: Συσχέτιση του υδρογραφικού δικτύου της νήσου Νάξου με το μέσο ασυνεχειών. Στο συγκεκριμένο χάρτη απεικονίζεται η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών.

6.4 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΟ ΚΥΚΛΑΔΙΚΟ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

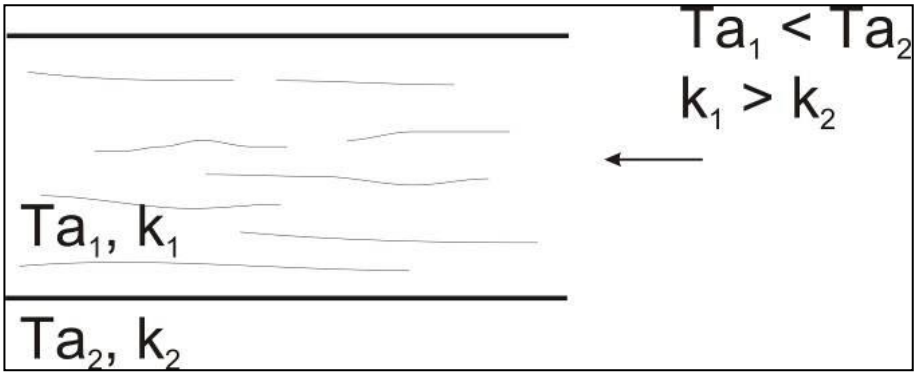
Η γεωμορφολογική ανάλυση τόσο σε πεδινές, όσο και σε ορεινές συνθήκες, προσφέρει πολύτιμα στοιχεία για την κυκλοφορία του επιφανειακού και υπόγειου νερού. Η αναγέννηση των υδρογραφικών δικτύων σε σχέση με τα παλαιά ίχνη τους, είναι καθοδηγητική σε όλες τις κλίμακες θεώρησης και εφαρμογής, ως βασικό στοιχείο αναφοράς (Στουρνάρας, 2007). Επίσης, από τη μελέτη των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών μιας υδρογραφικής λεκάνης μπορούν να εκτιμηθούν οι υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής και άρα να εκτιμηθεί και η τρωτότητα της (Singhal & Gupta, 1999).

Μια από τις πιο σημαντικές μεταβλητές του Κυκλαδικού Υδρογεωλογικού Μοντέλου, είναι οι τιμές των τοπογραφικών κλίσεων. Ο παράγοντας αυτός είναι καθοριστικός για την ποσότητα του νερού που κατεισδύει ή απορρέει επιφανειακά. Η ικανότητα κατείσδυσης εξαρτάται άμεσα από την μορφολογική κλίση, αφού όσο αυξάνει η τοπογραφική κλίση αυξάνει και ο συντελεστής επιφανειακής απορροής, ενώ όσο η κλίση μειώνεται αυξάνει ο συντελεστής κατείσδυσης (ανεξάρτητα του λιθολογικού σχηματισμού). Επιπλέον πρέπει να επισημανθεί ότι, όσο αυξάνει ο συντελεστής κατείσδυσης αυξάνει και ο κίνδυνος έκθεσης του υδροφόρου συστήματος σε ρυπαντικό φορτίο.

Μια άλλη σημαντική μεταβλητή του μοντέλου είναι οι τιμές της υδρογραφικής υφής, δηλαδή η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το ποσοστό της επιφανειακής απορροής αλλά και από την διαπερατότητα των πετρωμάτων. Έτσι, σε όμοιες λιθολογικές συνθήκες και γεωλογική δομή, όταν η υφή είναι λεπτή, δηλαδή οι τιμές της πυκνότητας και συχνότητας αυξημένες, επιφανειακή απορροή είναι μεγάλη και άρα η διαπερατότητα των πετρωμάτων μικρή. Αντίθετα, όταν η υφή είναι τραχεία, δηλαδή οι τιμές της πυκνότητας και συχνότητας είναι μικρές, η επιφανειακή απορροή είναι περιορισμένη και άρα η διαπερατότητα των πετρωμάτων μεγαλύτερη (Λεωνιδοπούλου, 2008).

Όσο αναφορά στην διαμόρφωση της τρωτότητας, όσο αυξημένη είναι η επιφανειακή απορροή και άρα μειωμένη η διαπερατότητα των πετρωμάτων, τόσο μικρότερος ο κίνδυνος έκθεσης του υδροφόρου συστήματος σε ρυπαντικό φορτίο. Το βασικό χαρακτηριστικό των μεταμορφωμένων πετρωμάτων είναι η μεταμόρφωση που προκαλεί μια γραμμική διάταξη των ορυκτών δημιουργώντας ένα ζωνώδη ή σχιστοφυή ιστό ή μια διαφοροποιημένη ορυκτολογική σύσταση. Η διάταξη των ορυκτών προκαλεί μια λιγότερο ή περισσότερο έντονη ανισοτροπία, παράλληλα με τη γραμμική διάταση ή κάθετα σε αυτή. Η ανισοτροπία αφορά τόσο τη

μηχανική, όσο και την υδραυλική συμπεριφορά των πετρωμάτων αυτών. Τα επίπεδα που σχηματίζονται με την παράλληλη διάταξη των ορυκτών αντιπροσωπεύουν επίπεδα αδυναμίας, ιδιαίτερα αν σ' αυτά συγκεντρώνονται ορυκτά μειωμένης αντοχής, όπως μαρμαρυγίες, χλωρίτες κλπ. ή αν η αποσάθρωση ευνοείται κατά μήκος των επιπέδων αυτών (Στουρνάρας, 1989). Έτσι, ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για την κατείσδυση και την κυκλοφορία του υπόγειου νερού είναι η διεύθυνση κλίσης των στρώσεων των σχιστόλιθων σε σχέση με τη διεύθυνση κλίσης των πρανών. Αν η σχιστότητα των σχιστολίθων είναι αντίρροπη με αυτή των πρανών, η κίνηση του νερού διευκολύνεται αρκετά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος ρύπανσης που θα σήμαινε αύξηση της τρωτότητας του υδροφόρου συστήματος.



Εικόνα 6.18: Μηχανική και υδραυλική ανισοτροπία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση (Λεωνιδοπούλου, 2008).

Κεφάλαιο 7^{ο} - Υδρολογία

7. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής εξαρτώνται άμεσα από τα κλιματικά στοιχεία, τη γεωμορφολογία και τη γεωλογία αυτής. Τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα βροχομετρικά δεδομένα, η απορροή και η εξατμισιδιαπνοή, αποτελούν κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα του κλίματος, με τα οποία συνδέεται το υδατικό ισοζύγιο μιας υδρολογικής λεκάνης. Η διακύμανση όλων των προαναφερθέντων κλιματικών παραμέτρων, η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, το μέγεθος της κατείσδυσης και των επιφανειακών απορροών είναι στοιχεία, τα οποία εξαρτώνται από τη γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης, καθώς και από τις μεταβολές του υψομέτρου. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο έντονος είναι ο οριζόντιος και κατακόρυφος διαμελισμός του εδάφους, τόσο πιο έντονες είναι και οι αντιθέσεις, που παρουσιάζουν από σημείο σε σημείο τα κλιματικά στοιχεία και ιδιαίτερα τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, τα οποία παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η γεωλογία μιας περιοχής έχει επίσης σημασία, καθώς επηρεάζει την αντίστοιχη μορφολογία του εδάφους, την απορροή, την κατείσδυση και την εξατμισιδιαπνοή αυτής. Επομένως, οι πιο πάνω παράγοντες επιδρούν άμεσα στις παραμέτρους του υδατικού ισοζυγίου και του υδρολογικού κύκλου του νερού.

Τα επιφανειακά νερά στο νησιωτικό χώρο του Αιγαίου με τη μορφή των μονίμων απορροών είναι κάτι σχεδόν άγνωστο, πλην ελάχιστων εξαιρέσεων. Η μικρή έκταση των λεκανών απορροής, οι μεγάλες κλίσεις αποστράγγισής τους και η περιορισμένη φυτοκάλυψη, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες πηγαίες εκφορτίσεις σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι οι βασικοί αρνητικοί παράγοντες που καθιστούν τις απορροές περιστασιακής μορφής. Η μεγαλύτερη λεκάνη απορροής στο χώρο των Κυκλάδων είναι η λεκάνη Παράτρεχος της Νάξου. Ο μέσος όρος έκτασης των σημαντικότερων λεκανών στις Κυκλάδες δεν ξεπερνά τα 10 km^2, ενώ μόνο 11 λεκάνες έχουν έκταση πάνω από 30 km^2 (ΥΠ.ΑΝ., 2003, Μπάνου, 2007).

Με τα παραπάνω γενικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής και με δεδομένες τις δυσμενείς συνθήκες βροχόπτωσης και εξάτμισης, η εκμετάλλευση των επιφανειακών νερών με τη μορφή ταμιευτήρων στις Κυκλάδες, είναι υπόθεση εμπεριστατωμένης μελέτης, η οποία θα πρέπει να προηγείται πριν από οποιαδήποτε πρόταση κατασκευής σχετικών έργων και θα πρέπει να βασίζεται σε πρωτογενή στοιχεία απορροών, διαφορετικά ο κίνδυνος αστοχίας τέτοιων έργων είναι μεγάλος. Αυτό συμβαίνει καθώς η ταμίευση επιφανειακών νερών

συνδέεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό με τις απορροές περιστασιακού χαρακτήρα, οι οποίες με τη σειρά τους δεν υπακούουν σε καμία περιοδικότητα (Σαμπατακάκης, 2001).

7.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ

7.2.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κύριος στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της υπόγειας υδροφορίας της Νάξου, σε σχέση με το μέσο ασυνεχειών που παρουσιάζει, και η δημιουργία μοντέλου υπόγειας ροής για τη διερεύνηση και προσομοίωση της υδροφορίας σε ετερογενές μέσο ασυνεχειών. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να υπολογιστεί ο όγκος νερού που κατεισδύει σε όλη την επιφάνεια του νησιού, ώστε να είναι δυνατή η συσχέτιση της υπόγειας υδροφορίας με τις τεκτονικές και μικροτεκτονικές συνθήκες της περιοχής μελέτης και την εισαγωγή της σημειακής ποσότητας νερού που κατεισδύει στο μοντέλο προσομοίωσης.

Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο για το μοντέλο προσομοίωσης αποτελεί η μελέτη της υπόγειας ροής στο μέλλον, καθώς οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών θα επιφέρουν, εκτός των άλλων, μείωση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού και το ήδη υπάρχον πρόβλημα της λειψυδρίας στα νησιά των Κυκλάδων, αλλά και στην περιοχή έρευνας θα ενταθεί. Για αυτό, εισήχθησαν σε δεύτερο υδρολογικό μοντέλο οι κλιματικές παράμετροι που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο του κλίματος, για τον υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων σύμφωνα με τις κλιματικές παραμέτρους προσδιορίστηκαν μέχρι το 2100, λαμβάνοντας υπόψη με το κλιματικό σενάριο Α2.

Για τον υπολογισμό της κατείσδυσης, κρίθηκε απαραίτητο να πραγματοποιηθεί προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου στο νησί, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SWAT (Soil and Water Assessment Tool), το οποίο κατασκευάστηκε από το Πανεπιστήμιο A&M του Τέξας. Το πρόγραμμα αν και απαιτεί πληθώρα χωρικών και μετεωρολογικών δεδομένων για την προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου, εντούτοις, η εκτέλεσή του είναι αρκετά εύκολη, καθότι πολλά από τα προβλήματα του παρελθόντος σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις έχουν ξεπεραστεί, ενώ τα διαδοχικά βήματα του μοντέλου εκτελούνται σειριακά. Αυτό σημαίνει πως το πρόγραμμα δεν επιτρέπει στο χρήστη να προχωρήσει στο επόμενο βήμα, αν δεν έχει πραγματοποιήσει επιτυχώς το προηγούμενο (Zheng et al., 2010, Καλογερόπουλος, 2011).

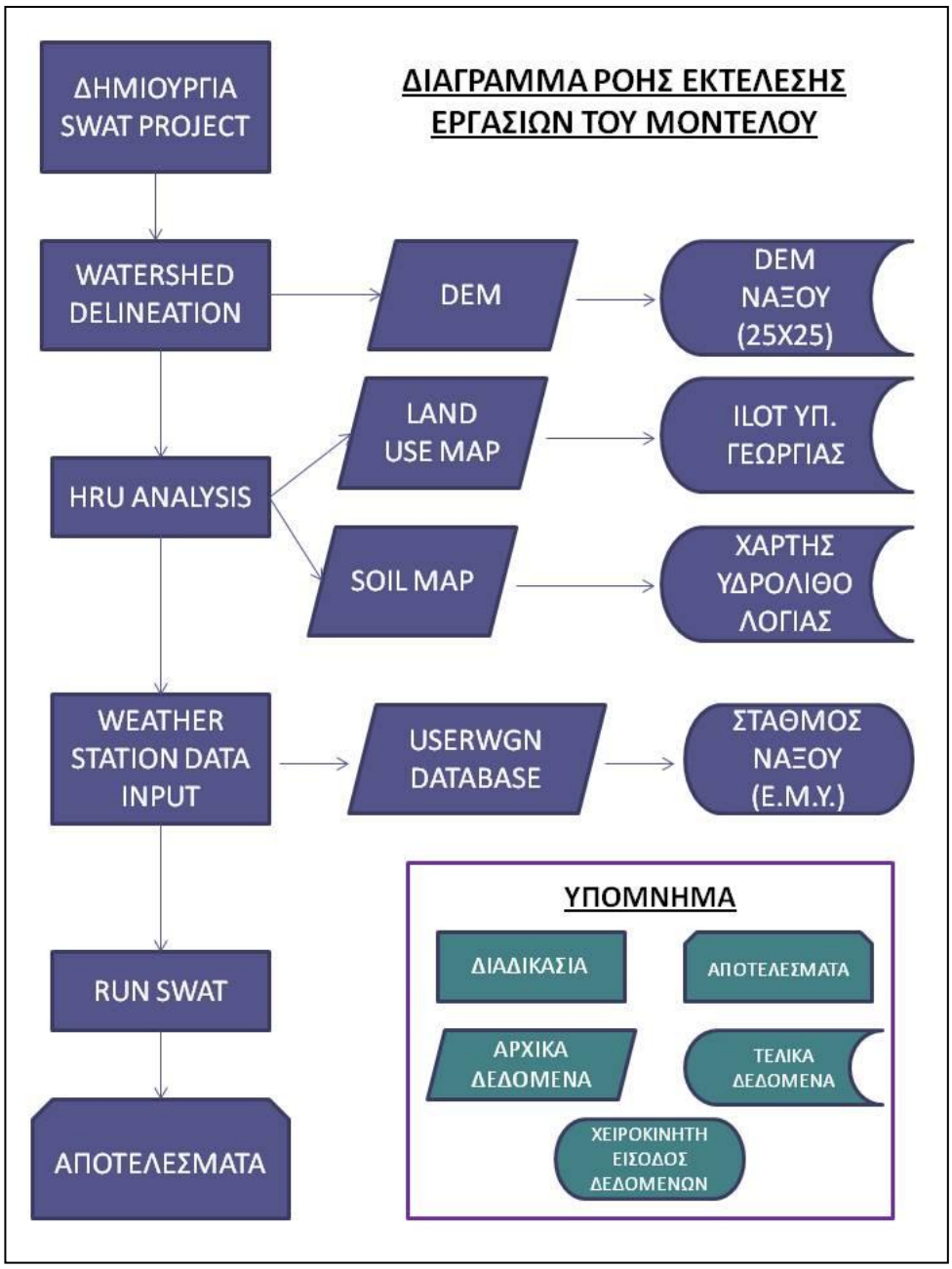
Επίσης η έκδοση του προγράμματος ArcSWAT, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, εκτελείται ως επέκταση του λογισμικού ArcGIS της ESRI. Το γεγονός αυτό διευκολύνει ιδιαίτερα τους χρήστες του προγράμματος αυτού, καθώς η εισαγωγή των χωρικών

και μετεωρολογικών δεδομένων και η εποπτεία των ενεργειών με άμεση απεικόνιση των αποτελεσμάτων, γίνεται σε γνώριμο και σχετικά εύκολο περιβάλλον (Jacobs et al., 2007, Καλογερόπουλος, 2011).

7.2.2 Στάδια εκτέλεσης του υδρολογικού μοντέλου

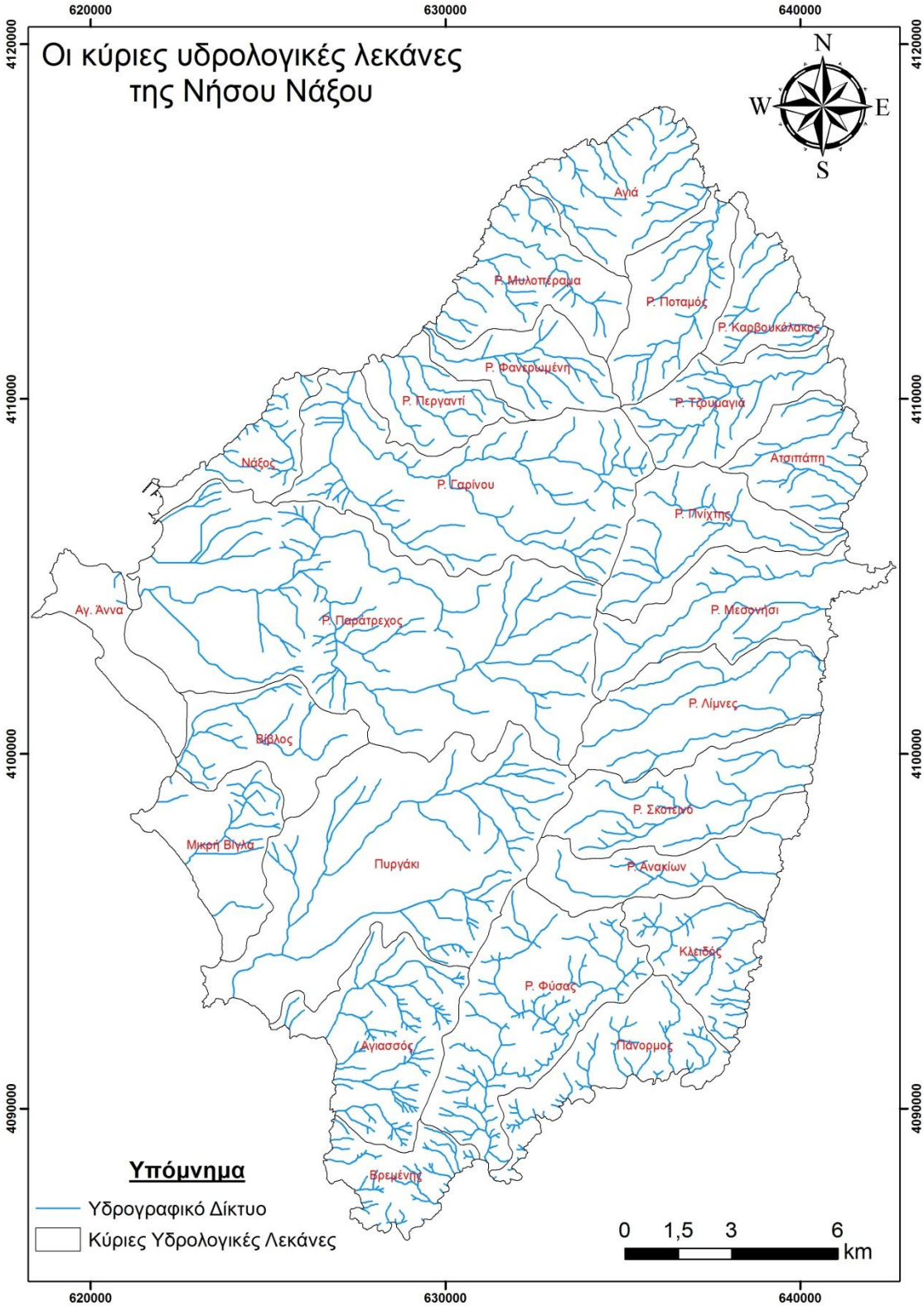
Για την ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου και την επιτυχή εκτέλεσή του χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ArcSWAT, είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί μια σειρά εργασιών (Εικόνα 7.1). Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Δημιουργία φακέλου (project), στον οποίο θα γίνει η επεξεργασία των δεδομένων.
- Υδρολογική ανάλυση με βάση το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου (DEM), το υδρογραφικό δίκτυο και τις υδρογραφικές λεκάνες της Νήσου Νάξου. Το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου προήλθε από τη ψηφιοποίηση ισοϋψών των χαρτών της Γ.Υ.Σ. (Φύλλο Νάξος, Φύλλο Φιλότιον, Φύλλο Σχοινούσα, Φύλλο Δυτική Ηράκλεια), κλίμακας 1:50.000, ενώ η ανάλυση της ψηφίδας του (pixel size) είναι 25 x 25 m.
- Δημιουργία Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (MYA/HRU) με βάση το χάρτη χρήσεων γης του Υπουργείου Γεωργίας και τον υδρολιθολογικό χάρτη που κατασκευάστηκε σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε (Φύλλο Νάξος, κλίμακας 1:50.000) και τους εδαφολογικούς χάρτες του Υπουργείου Γεωργίας (Φύλλο Νάξος, Φύλλο Φιλότιον, Φύλλο Σχοινούσα, Φύλλο Δυτική Ηράκλεια), κλίμακας 1:50.000).
- Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της υγρασίας και της ταχύτητας ανέμου προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου (Ε.Μ.Υ.), ενώ όσον αφορά την ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη βάση δεδομένων του SWAT, από μετεωρολογικό σταθμό με ίδιο γεωγραφικό πλάτος με αυτό του σταθμού της περιοχής μελέτης. Για την εκτίμηση των παραμέτρων μέχρι το 2100, εισήχθησαν τα δεδομένα από το κλιματικό σενάριο Α2.
- Εκτέλεση του μοντέλου.
- Εμφάνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 7.1: Διάγραμμα ροής της εκτέλεσης των εργασιών του υδρολογικού μοντέλου.

Όλα τα παραπάνω στάδια εκτέλεσης του μοντέλου, καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, αναλύονται στα παρακάτω κεφάλαια. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για τη σωστή εκτέλεση του μοντέλου, καθορίστηκαν οι 25 κύριες υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου με βάση τα κύρια ρέματα και εκτελέστηκε το υδρολογικό μοντέλο ξεχωριστά για κάθε μία από αυτή (Εικόνα 7.2), καθώς σε άλλη περίπτωση, θα θεωρείτο ότι το σύνολο των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ανήκει σε μία υδρογραφική λεκάνη, και τα αποτελέσματα δεν θα ήταν δυνατό να είναι συγκρίσιμα.



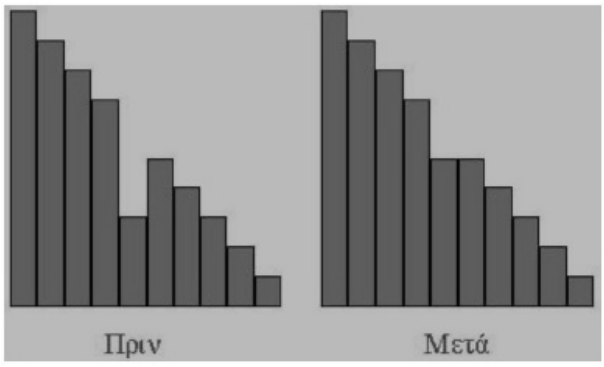
Εικόνα 7.2: Οι κύριες υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου.

7.2.2.1 Υδρολογική Ανάλυση

Έχοντας δημιουργήσει το φάκελο στον οποίο θα γίνει η επεξεργασία όλων των δεδομένων, το πρώτο στάδιο εκτέλεσης του μοντέλου είναι η υδρολογική ανάλυση (watershed delineation) της περιοχής μελέτης. Κατά το στάδιο αυτό, χρησιμοποιώντας το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου (DEM), το υδρογραφικό δίκτυο και τα όρια των υδρογραφικών λεκανών της περιοχής μελέτης, το μοντέλο υπολογίζει και περιγράφει αναλυτικά την κάθε υδρογραφική λεκάνη.

Το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου (DEM) που χρησιμοποιείται είναι αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης ισοϋψών καμπυλών, υψομετρικών σημείων και τριγωνομετρικών σημείων από τους χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, κλίμακας 1:50.000. Η ανάλυση ψηφίδας του DEM είναι ένα κρίσιμο μέγεθος για τη προσομοίωση, καθώς όσο πιο μεγαλύτερη είναι, τόσο πιο ακριβή θα είναι τα αποτελέσματα που παρέχει το μοντέλο (Geza & McGray, 2008). Για το λόγο αυτό, η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 25x25 pixel, η οποία καλύπτει τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, αφού τρισδιάστατα μοντέλα εδάφους της ανάλυσης αυτής δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα (Chaplot, 2005).

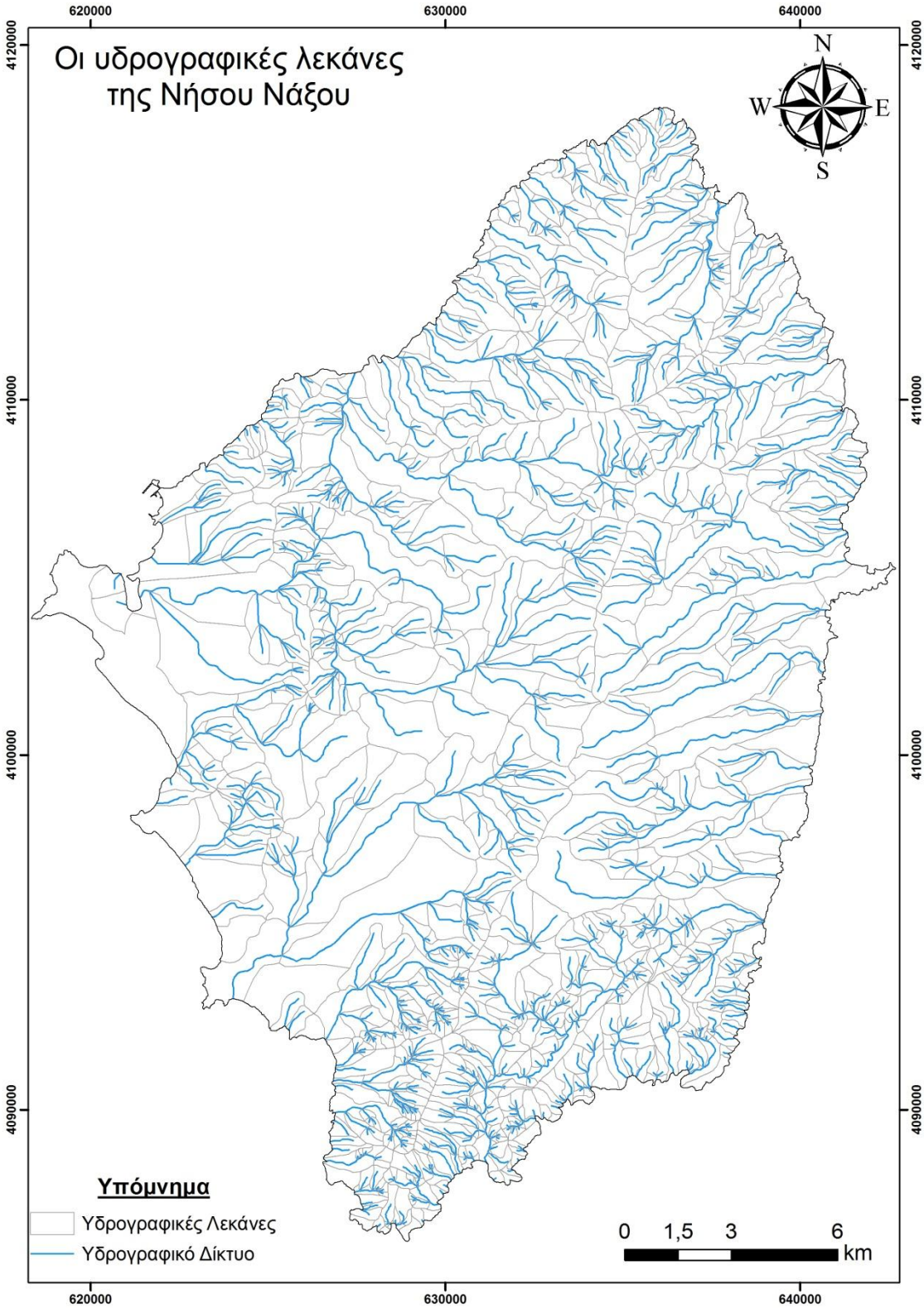
Όμως, πριν πραγματοποιηθεί η υδρολογική ανάλυση, πρέπει να διορθωθούν κάποιες αστοχίες του DEM, και πιο συγκεκριμένα να επιλυθεί το πρόβλημα των ψευδών ταπεινώσεων ή υπέρμετρων ανυψώσεων, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν αποκλίσεις στα αποτελέσματα, καθώς μπορεί να θεωρηθεί ότι στα βυθίσματα αυτά παγιδεύεται νερό (Εικόνα 7.3). Το «γέμισμα» των βυθισμάτων -filling sinks- (Schäuble et al., 2008), γίνεται αυτόματα με τη χρήση του Spatial Analyst, από το ίδιο το πρόγραμμα.



Εικόνα 7.3: Πλήρωση του DEM με το εργαλείο Spatial Analyst (Καλογερόπουλος, 2011).

Κατόπιν, έχοντας εισάγει τα όρια των υδρογραφικών λεκανών για κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης (Εικόνα 7.4),

υπολογίζονται αυτόματα οι παράμετροι της κάθε λεκάνης. Οι παράμετροι που υπολογίζονται είναι το μέσο υψόμετρο κάθε λεκάνης, το ποσοστό της επιφάνειας των λεκανών για κάθε υψομετρική τιμή και το μέγιστο ίχνος της επιφανειακής ροής του νερού σε κάθε λεκάνη.



Εικόνα 7.4: Το σύνολο των υδρογραφικών λεκανών της νήσου Νάξου.

7.2.2.2 Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης (Μ.Υ.Α.)

Το επόμενο στάδιο εκτέλεσης του μοντέλου αφορά τη δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU Analysis). Ως μονάδες υδρολογικής απόκρισης (Μ.Υ.Α.) θεωρούνται γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, οι οποίες αναπαριστούν συνήθως διαφορετικούς τύπους εδαφών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητα τα δεδομένα χρήσεων γης, κλίσεων και εδάφους για την κάθε υδρολογική λεκάνη.

Όσον αφορά τα δεδομένα χρήσεων γης, χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης κάλυψης γης από το πρόγραμμα ILOTING του Υπουργείου Γεωργίας, όπως και για την περιγραφή των χρήσεων γης στο νησί. Όμως για να είναι δυνατή η αναγνώριση των ILOTS από το ArcSWAT, έγινε αντιστοίχιση των χρήσεων γης με τη βάση δεδομένων του (Πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.1: Αντιστοιχία κατηγοριών ILOT χρήσεων γης και ArcSWAT.

ILOTS	Περιγραφή	Αντιστοίχιση (ArcSWAT)
10	Δασικές εκτάσεις	FRSE (Forest Evergreen)
11	Μεικτές δασικές εκτάσεις	FRST (Forest Mixed)
20	Οικιστικές περιοχές	URMD (Residential Medium Density)
21	Μεικτές οικιστικές περιοχές	URML (Residential Med-Low Density)
30	Λιβάδια – βοσκότοποι	PAST (Pasture)
31	Μεικτά λιβάδια - βοσκότοποι	PAST (Pasture)
40	Αρόσιμες καλλιέργειες	AGRR (Agricultural Land – Row Crops)
41	Μεικτές αρόσιμες καλλιέργειες	AGRR (Agricultural Land – Row Crops)
50	Μόνιμες καλλιέργειες	AGRL(Agricultural Land – Generic)
51	Μεικτές μόνιμες καλλιέργειες	AGRC (Agricultural Land – Close Grown)
52	Ελαιώνες	OLIV (Olives)
53	Μεικτοί ελαιώνες	OLIV (Olives)
55	Μεικτοί αμπελώνες	GRAP (Vineyard)
60	Λίμνη	WATR (Water)
61	Ποτάμι	WATR (Water)
70	Μη παραγωγικές εκτάσεις	BROS (Smooth Bromegrass)
90	Άλλου είδους εκτάσεις	URBN (Residential)

Όσον αφορά τα εδαφολογικά στοιχεία, έγινε αντιστοίχιση της υδροπερατότητας των πετρωμάτων της περιοχής μελέτης με την υδροπερατότητα των εδαφών στη βάση δεδομένων του μοντέλου. Η συγκεκριμένη παραδοχή έγινε προκειμένου να εφαρμοστεί το μοντέλο στα ελληνικά δεδομένα.

Η παραπάνω διασύνδεση έγινε με τη χρήση των εδαφολογικών χαρτών της Δασικής Υπηρεσίας του Υπουργείου Γεωργίας και της υδρολιθολογίας, καθώς στα νησιά του Αιγαίου, το εδαφικό κάλυμμα παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά με το μητρικό πέτρωμα από το οποίο

προήλθε. Αυτό συμβαίνει καθώς όλα τα νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό πάχος εδαφικού καλύμματος, λόγω του έντονου αναγλύφου σε συνδυασμό με το ξηρό σχετικά κλίμα και των έντονων ανέμων που πνέουν καθόλη τη διάρκεια του έτους.

Για τους παραπάνω λόγους, χρησιμοποιήθηκε για την αντιστοίχιση αυτή τα στοιχεία που προκύπτουν από τη λιθολογία, σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. και τα χαρακτηριστικά των εδαφών που προκύπτουν από τους εδαφολογικούς χάρτες. Η πιο απλή και συγχρόνως πιο αντικειμενική αντιστοίχιση γίνεται μέσω της κατηγοριοποίησης της υδροπερατότητας σύμφωνα με το συντελεστή κατείσδυσης της κάθε λιθολογίας, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Αντιστοίχιση υδρολιθολογίας με το ArcSWAT.

Συντελεστής κατείσδυσης	**Υδροπερατότητα**	**Αντιστοίχιση (ArcSWAT)**
0%≤Σ.Κ.≤8%	Ελάχιστη	WINDSOR
8%<Σ.Κ.≤20%	Μέτρια	VERGENNES
Σ.Κ.>20%	Υψηλή	COVINGTON

Τέλος, όσον αφορά τα δεδομένα κλίσεων, χρησιμοποιήθηκε το ήδη υπάρχον DEM. Στη φάση αυτή ήταν απαραίτητη η κατηγοριοποίηση των κλίσεων σε τρεις κλάσεις, ώστε να δυνατή η δημιουργία των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (Πίνακας 7.3).

Πίνακας 7.3: Οι τρεις κλάσεις κλίσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.

Κλάση	**Κλίση (%)**
1	0-5
2	1-15
3	15-9999

Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω διαδικασιών, δημιουργούνται οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης και ολοκληρώνεται η εισαγωγή χωρικών δεδομένων στην προσομοίωση. Το ArcSWAT με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής, δημιουργεί μια αναφορά σχετικά με τις Μ.Υ.Α. που δημιουργήθηκαν, ώστε ο χρήστης να έχει πρόσβαση στα

χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτής (κάλυψη γης, έδαφος, κλίση και εμβαδόν). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η δημιουργία των Μ.Υ.Α. στηρίχθηκε ως προς την επικρατούσα τιμή κλίσης, χρήση γης και εδάφους, ούτως ώστε κάθε υδρογραφική λεκάνη κλάδου του υδρογραφικού δικτύου του νησιού να θεωρηθεί ως μία μονάδα υδρολογικής απόκρισης.

7.2.2.3 Εισαγωγή μετεωρολογικών παραμέτρων

Στο συγκεκριμένο στάδιο της προσομοίωσης, είναι αναγκαίο να εισαχθούν οι μετεωρολογικές παράμετροι της περιοχής μελέτης. Τα στοιχεία αυτά προστίθενται στη βάση δεδομένων του ArcSWAT, όπου εκτός από το υψόμετρο και τις συντεταγμένες του μετεωρολογικού σταθμού από τον οποίο προέρχονται τα δεδομένα, εισάγονται τα εξής:

- Μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία.
- Μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία.
- Τυπική απόκλιση μηνιαίας μέγιστης θερμοκρασίας.
- Τυπική απόκλιση μηνιαίας ελάχιστης θερμοκρασίας.
- Μέση μηνιαία βροχόπτωση.
- Τυπική απόκλιση μηνιαίας βροχόπτωσης.
- Συντελεστής λοξότητας μηνιαίας βροχόπτωσης.
- Πιθανότητα να ακολουθεί υγρή μέρα μετά από ξηρή μέρα.
- Πιθανότητα να ακολουθεί υγρή μέρα μετά από υγρή μέρα.
- Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών βροχόπτωσης.
- Μέγιστη καταγραφή 30λεπτης βροχόπτωσης.
- Μέση μηνιαία ηλιοφάνεια.
- Μέση μηνιαία θερμοκρασία δρόσου.
- Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμων.

Τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου, προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου, ενώ τα δεδομένα της ηλιοφάνειας προήλθαν από τη βάση δεδομένων του ArcSWAT, και πιο συγκεκριμένα, από μετεωρολογικό σταθμό που έχει το ίδιο γεωγραφικό πλάτος με το σταθμό της Νάξου. Επίσης λόγω έλλειψης αναλυτικών δεδομένων, παραλείφθηκε ο υπολογισμός των πιθανοτήτων να ακολουθεί υγρή μέρα μετά από ξηρή και από υγρή μέρα αντίστοιχα, καθώς θεωρήθηκε ότι δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τους υπολογισμούς.

7.2.2.4 Εκτέλεση του μοντέλου

Μετά το πέρας της εισαγωγής των χωρικών και μετεωρολογικών δεδομένων, ακολουθεί η εκτέλεση των σεναρίων προσομοίωσης. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το χρονικό διάστημα προσομοίωσης για όλες τις υδρολογικές λεκάνες ορίστηκε από το 1958 μέχρι και το 2010 (53 χρόνια), το οποίο αντιστοιχεί στην περίοδο των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων για το σταθμό της Νάξου. Για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής στο υδατικό δυναμικό, εισήχθησαν ξανά σε δεύτερο μοντέλο, τα μετεωρολογικά δεδομένα από τον ίδιο σταθμό, αλλά με την ποσοστιαία αλλαγή που έχει προβλεφθεί σύμφωνα με το Σενάριο Α2 της μελέτης των κλιματικών επιπτώσεων στην Ελλάδα από το 2010 που σταματά η προηγούμενη προσομοίωση μέχρι το 2100 (Πίνακας 7.4).

Πίνακας 7.4:Αποτελέσματα προσομοίωσης των 6 κλιματικών παραμέτρων για τις Κυκλάδες, σύμφωνα με το Κλιματικό Σενάριο Α2 (Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011).

Κλιματική Παράμετρος	Περίοδοι	Τιμή	Διαφορά	Ποσοστό
Βροχόπτωση (mm/έτος)		mm/έτος	ΔΒ	(%)
	1961-1990	400,6±106,0		
	2071-2080	334,3±89,6	-66,3±32,3	-16,4±5,5
	2081-2090	313,4±95,8	-87,3±27,0	-22,4±6,3
	2091-2100	361,9±106,7	-38,7±36,9	-10,3±10,1
Σχετική Υγρασία (%)		Υ	ΔΥ	(%)
	1961-1990	73,78±3,70		
	2071-2080	73,22±3,52	-0,56±0,48	-0,7±0,6
	2081-2090	73,02±3,57	-0,76±0,56	-1,0±0,7
	2091-2100	72,83±3,70	-0,95±0,57	-1,3±0,7
Θερμοκρασία (ºC)		Τ	ΔΤ	(%)
	1961-1990	17,98±0,35		
	2071-2080	20,97±0,44	3,00±0,18	16,7±1,0
	2081-2090	21,20±0,40	3,22±0,26	17,9±1,6
	2091-2100	21,91±0,45	3,93±0,33	21,9±2,0
Ακτινοβολία (W/m^2)		S	ΔS	(%)
	1961-1990	204,1±22,4		
	2071-2080	206,5±21,6	2,4±3,9	1,2±2,2
	2081-2090	208,0±21,2	3,8±5,0	2,0±2,9
	2091-2100	207,0±21,6	2,8±4,7	1,5±2,7
Ταχύτητα Ανέμου (m/sec)		V	ΔV	(%)
	1961-1990	6,64±0,92		
	2071-2080	6,73±0,94	0,10±0,12	1,5±1,8
	2081-2090	6,83±1,00	0,20±0,12	2,8±1,7
	2091-2100	6,87±1,00	0,23±0,17	3,4±2,3
Κλάσμα Νεφοκάλυψης (%)		C	ΔC	(%)
	1961-1990	32,6±4,3		
	2071-2080	28,5±4,4	-4,1±1,5	-12,9±4,9
	2081-2090	27,4±4,5	-5,2±1,6	-16,3±5,5
	2091-2100	27,7±4,5	-4,9±1,6	-15,3±5,3

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

7.3.1 Γενικά

Μετά το πέρας της εκτέλεσης του υδρολογικού μοντέλου για τις 25 κύριες υδρολογικές λεκάνες της νήσου Νάξου, είναι δυνατή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων υπό μορφή πινάκων. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται ο υπολογισμός διαφόρων παραμέτρων για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη και για κάθε υπολεκάνη, για τις δύο περιόδους που ορίστηκαν (1958-2010 & 2010-2100). Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν από το υδρολογικό μοντέλο είναι οι εξής:

- Ύψος κατακρημνισμάτων (mm)
- Επιφανειακή απορροή (mm)
- Πλευρική εισροή (mm)
- Βασική απορροή (mm)
- Κατείσδυση (mm)
- Αποστράγγιση (mm)
- Ποσότητα νερού στο εδαφικό προφίλ (mm)
- Πραγματική εξατμισιδιαπνοή (mm)
- Δυνητική εξατμισιδιαπνοή (mm)
- Απόδοση (mm)
- Φερτά υλικά (t/ha)
- Επιφανειακή απορροή NO_3 (kg nutrient/ha)
- Πλευρική εισροή NO_3 (kg nutrient/ha)
- Κατείσδυση NO_3 (kg nutrient/ha)
- NO_3 προερχόμενο από καλλιέργειες (kg nutrient/ha)
- Οργανικό άζωτο (kg nutrient/ha)
- Διαλυμένος φώσφορος (kg nutrient/ha)
- Οργανικός φώσφορος (kg nutrient/ha)
- Βιομάζα (kg/ha)

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για όλες τις παραπάνω παραμέτρους, έχει υπολογιστεί αυτόματα από το SWAT, τόσο η μέση μηνιαία τιμή τους, όσο και η μέση ετήσια τιμή τους για τις δύο περιόδους προσομοίωσης.

Για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα αποτελέσματα που αφορούν το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής, δηλαδή το ύψος κατακρημνισμάτων, η επιφανειακή

απορροή (στην οποία συμπεριλαμβάνεται και η πλευρική εισροή και η βασική απορροή), η κατείσδυση και η πραγματική εξατμισιδιαπνοή, ούτως ώστε να συσχετιστεί η ποσότητα νερού που κατεισδύει σε σχέση με το μέσο ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης και η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά αποθέματα της νήσου Νάξου.

Είναι γνωστό ότι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν την πλέον σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου μιας λεκάνης, δεδομένου ότι αυτά συνιστούν τη μοναδική πηγή τροφοδοσίας σε νερό σε αυτή.

Στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα περιλαμβάνονται η βροχή, το χιόνι, το χιονόνερο και το χαλάζι. Όμως, η βροχόπτωση αποτελεί για πολλούς και διάφορους λόγους η πιο ενδιαφέρουσα παράμετρος από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, δεδομένου ότι και οι χιονοπτώσεις εκφράζονται σε ύψος βροχής.

Από τη στιγμή που το νερό των κατακρημνισμάτων φτάσει στην επιφάνεια της γης έχει τις εξής τρεις δυνατότητες:

- Να διαπεράσει την επιφάνεια του εδάφους και να διεισδύσει στο υπέδαφος, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς. Η ποσότητα αυτή συνιστά την κατείσδυση (I). Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζεται και η δευτερογενής κατείσδυση κατά την απορροή.
- Να ρέει επιφανειακά μέσω του υδρογραφικού δικτύου, καταλήγοντας στη θάλασσα ή σε κάποια λίμνη. Αυτή η ποσότητα συνιστά την επιφανειακή απορροή (R). Στην ποσότητα αυτή συνυπολογίζεται η δευτερογενής απορροή από τις πηγαίες εκφορτίσεις της κατεισδύσεως.
- Να εξατμιστεί από την επιφάνεια του εδάφους και του υδρογραφικού δικτύου ή να διαπνεύσει από τα φυτά. Η ποσότητα αυτή αποτελεί την εξατμισιδιαπνοή (E). Στην ποσότητα αυτή συνυπολογίζεται και η δευτερογενής εξάτμιση κατά την απορροή.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι κατανοητό ότι προκύπτει η σχέση:

$$\mathbf{P = E + R + I + \Delta W + \Delta q + q} \quad \text{(Castany, 1968)}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου, όπου:

- **P:** το ποσό των κατακρημνισμάτων που δέχεται ετησίως μια λεκάνη.
- **E:** το ετήσιο ποσό νερού που εξατμίζεται από την επιφάνεια του εδάφους και διαπνέει από τα φυτά.

- **R:** το ετήσιο ποσό που απορρέει επιφανειακά από τη λεκάνη.
- **I:** το ποσό του νερού που κατεισδύει ετησίως στα υδροφόρα στρώματα.
- **ΔW:** η διαφορική αλλαγή στην αποθήκευση του νερού στη γη.
- **Δq:** το αποτέλεσμα της ανθρώπινης παρέμβασης.
- **q:** η εξωτερική τροφοδοσία.

Όμως, δεχόμενοι ότι η περιοχή αποτελεί ένα αυτοτελές σύστημα και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις είναι αμελητέες, οι παράγοντες ΔW (μεταβολές των αποθεμάτων), Δq και q της εξίσωσης παραλείπονται και παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{P = E + R + I}$$

Τα δεύτερα μέλη της εξίσωσης, είναι γνωστά σαν φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου και εκφράζονται είτε σε χιλιοστά, είτε σε μονάδες όγκου, είτε σε εκατοστιαία ποσοστά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Οι φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου για την περιοχή μελέτης υπολογίστηκαν από το μοντέλο SWAT, και τα αποτελέσματα περιγράφονται στα αμέσως επόμενα κεφάλαια.

7.3.2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να είναι δυνατή η εκτέλεση του μοντέλου SWAT στην περιοχή μελέτης, ήταν απαραίτητη η εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων, στα οποία περιλαμβανόταν η μέση μηνιαία βροχόπτωση, η μέση μηνιαία τυπική απόκλιση της βροχόπτωσης και ο μέσος μηνιαίος συντελεστής λοξότητας της βροχόπτωσης για την περίοδο προσομοίωσης (Πίνακας 7.5)

Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, υπολογίστηκε από το μοντέλο, η μέση ετήσια βροχόπτωση για όλες τις κύριες υδρολογικές λεκάνες, η οποία ισούται με 372,46 mm. Το γεγονός ότι για όλες τις υδρογραφικές λεκάνες το ύψος των κατακρημνισμάτων είναι το ίδιο, οφείλεται στη χρήση ενός μόνο μετεωρολογικού σταθμού στην εκτέλεση του μοντέλου. Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω μετεωρολογικοί σταθμοί, παρότι υπάρχουν συνολικά τέσσερις, καθώς μόνο αυτός της Νάξου διαθέτει τα περισσότερα και συνεχόμενα κλιματικά δεδομένα.

Έχοντας υπολογίσει την τιμή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης σε mm για όλες τις κύριες υδρογραφικές λεκάνες της Νάξου, και γνωρίζοντας το εμβαδόν της κάθε λεκάνης, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος νερού που δέχεται κάθε μία από αυτή (Πίνακας 7.6).

Πίνακας 7.5: Βροχομετρικά στοιχεία της περιοχής μελέτης.

Μήνας	**Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) 1958-2010**	**Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) 2010-2100**	**Τυπική απόκλιση βροχόπτωσης (mm)**	**Συντελεστής λοξότητας βροχόπτωσης**
Ιανουάριος	69	58	46,5	1,1
Φεβρουάριος	53,6	45	40,6	1,4
Μάρτιος	47	39,5	37,8	1,7
Απρίλιος	18	15,1	18	1,5
Μάιος	9,2	7,7	11,7	1
Ιούνιος	2,2	1,8	13,4	3,8
Ιούλιος	0,5	0,4	9	0,6
Αύγουστος	1,7	1,4	21,2	3,4
Σεπτέμβριος	7	5,9	18,5	1,5
Οκτώβριος	34,7	29,1	41,3	1,8
Νοέμβριος	52,6	44,2	35,7	1,2
Δεκέμβριος	70,3	59,1	37,7	0,98

Πίνακας 7.6: Μέσος ετήσιος όγκος νερού που δέχεται κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.

Α/Α	**Όνομα Λεκάνης**	**Εμβαδόν (km^2)**	**Όγκος νερού ($x\ 10^6\ m^3$) 1958-2010**	**Όγκος νερού ($x\ 10^6\ m^3$) 2010-2100**
1	Αγιά	14,14	5,27	4,38
2	Ρ. Ποταμός	12,64	4,71	3,92
3	Ρ. Καρβουκόλακος	8,14	3,03	2,52
4	Ρ. Τζουμαγιά	12,24	4,56	3,79
5	Ατσιπάπη	10,03	3,74	3,11
6	Ρ. Πνίχτης	13,7	5,1	4,25
7	Ρ. Μεσονήσι	17,33	6,45	5,37
8	Ρ. Λίμνες	17,52	6,53	5,43
9	Ρ. Σκοτεινό	16,19	6,03	5,02
10	Ρ. Ανακίων	12,46	4,64	3,86
11	Κλειδός	10,6	3,95	3,29
12	Πάνορμος	12,92	4,81	4,01
13	Ρ. Φύσας	24,51	9,13	7,60
14	Βρεμένης	8,15	3,04	2,53
15	Αγιασσός	18,16	6,76	5,63
16	Πυργάκι	45,54	16,96	14,12
17	Μικρή Βίγλα	12,24	4,56	3,79
18	Βίβλος	12,31	4,58	3,82
19	Αγία Άννα	7,67	2,86	2,38
20	Ρ. Παράτρεχος	67,22	25,04	20,84
21	Νάξος	6,86	2,55	2,13
22	Ρ. Γαρίνου	36,34	13,54	11,27
23	Ρ. Περγαντί	8,23	3,07	2,55
24	Ρ. Φανερωμένη	9,46	3,52	2,93
25	Ρ. Μυλοπέραμα	14,39	5,36	4,46

7.3.3 Εξατμισιδιαπνοή

Για την κατάρτιση του υδρολογικού ισοζυγίου μιας περιοχής, απαιτείται η γνώση της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής. Η εξατμισιδιαπνοή είναι συναρτήσει της υγρασίας του εδάφους και επηρεάζεται από τους παράγοντες που λειτουργούν ρυθμιστικά επί της εξάτμισης και της διαπνοής. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Ατμοσφαιρικοί, όπως η υγρομετρική κατάσταση της ατμόσφαιρας, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η βροχομετρική πίεση, κ.τ.λ.
- Υδρογεωλογικοί παράγοντες, όπως η κοκκομετρία, το πορώδες, η λιθολογία και η υγρασία του εδάφους.
- Γεωγραφικοί παράγοντες, όπως είναι το υψόμετρο, οι κλιματικές ζώνες, κ.τ.λ.
- Φυσιογραφικοί παράγοντες, ο οποίοι επιδρούν κυρίως επί της διαπνοής, όπως το είδος της χλωρίδας, η ανάπτυξη του φυλλώματος, το βάθος των ριζών, κ.τ.λ.

Από την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου SWAT, έχει υπολογιστεί η πραγματική εξατμισιδιαπνοή για κάθε υδρολογική λεκάνη του υδρογραφικού δικτύου (Πίνακας 7.7). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η εξατμισιδιαπνοή είναι αρκετά μεγάλη στην περιοχή, πράγμα που δικαιολογείται επαρκώς από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Επίσης από τα εκτιμώμενα μετεωρολογικά δεδομένα μέχρι το έτος 2100, προκύπτει ότι η μέση τιμή της εξατμισιδιαπνοής στη νήσο Νάξο θα αυξηθεί κατά 3%, ενώ η ποσότητα του νερού που συμμετέχει στην εξατμισιδιαπνοή θα αυξηθεί από 112,58 mm/έτος κατά μέσο όρο σε 116,16 mm/έτος.

7.3.4 Επιφανειακή απορροή

Η επιφανειακή απορροή στην περιοχή έρευνας αντιστοιχεί στις ποσότητες νερού, τις οποίες συλλέγει το υδρογραφικό δίκτυο της νήσου από την επιφάνεια των λεκανών απορροής. Οι κυριότεροι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή, κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τους κλιματικούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν την εξατμισιδιαπνοή, την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων, την έντασή τους, κ.τ.λ.
- Τους φυσιογραφικούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν τους μορφολογικούς χαρακτήρες της λεκάνης απορροής και εκείνους του υδρογραφικού δικτύου.

Η επιφανειακή απορροή στη νήσο Νάξο, όπως και στα υπόλοιπα νησιά του Αιγαίου, συντελείται κατά τρόπο επεισοδιακό, μέσω του σχετικά πυκνού υδρογραφικού δικτύου, προσδίδοντας χειμαρρώδη λειτουργία στα υδρορέματα του νησιού. Την ταχεία απορροή την προκαλούν γεωμορφολογικοί παράγοντες, όπως οι μικρού μήκους και έκτασης λεκάνες απορροής με τις σχετικά μεγάλες κλίσεις, καθώς και υδρογεωλογικοί παράγοντες, καθώς η παρουσία σχηματισμών χαμηλής υδροπερατότητας, όπως οι σχιστόλιθοι, οι γρανοδιορίτες και ο μιγματίτης, οι οποίοι καλύπτουν μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας του νησιού.

Τα υδρορέματα μόνιμης ροής που λειτουργούν είναι ελάχιστα, τα οποία στο σύνολό τους συνδέονται με τις πηγαίες αναβλύσεις, από τις οποίες τροφοδοτούνται, όπως για παράδειγμα τα υδρορέματα Εγγαρών, Φανερωμένης και Ποταμός, τα οποία τροφοδοτούνται από τις πηγές Γαρινού και Σκουληκαριάς, Ερυνιές και Χάσκα αντίστοιχα.

Επιτόπου μετρήσεις της επιφανειακής απορροής είναι σχεδόν ανέφικτο να πραγματοποιηθούν λόγω του επεισοδιακού χαρακτήρα της, αλλά και του πολυσχιδούς υδρογραφικού δικτύου. Όμως, μέσω της εκτέλεσης του υδρολογικού μοντέλου SWAT ήταν δυνατό να υπολογιστεί η μέση ετήσια επιφανειακή απορροή για κάθε κύρια υδρογραφική λεκάνη (Πίνακας 7.8).

Επίσης, από τις συγκεκριμένες τιμές απορροής, ήταν δυνατόν να υπολογιστεί και ο συντελεστής απορροής C (Πίνακας 7.8), ο οποίος εκφράζεται ως ο λόγος του όγκου της απορροής προς τον όγκο της βροχόπτωσης. Ο συντελεστής απορροής εξαρτάται άμεσα από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και για τον προσδιορισμό του πρέπει να ληφθούν υπόψη η χρήση και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η διαπερατότητα και η φυτοκάλυψη, παράγοντες που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου. Οι συντελεστής απορροής εξαρτάται επίσης από την ένταση και τη συχνότητα της βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα μεγάλες τιμές του συντελεστή απορροής προκύπτουν σε περιπτώσεις μεγάλης έντασης βροχοπτώσεων και περιόδου επαναφοράς (Μπέλλος, 2005).

Σύμφωνα με τον παρακάνω πίνακα, προκύπτει η νήσος Νάξος δεν εμφανίζει μεγάλες τιμές όγκου επιφανειακής απορροής, γεγονός που δικαιολογείται άμεσα από το χαμηλό ύψος των βροχοπτώσεων. Σχετικά μεγάλες τιμές όγκου επιφανειακής απορροής εμφανίζουν μόνο οι λεκάνες Παράτρεχος και Γαρίνου, γεγονός που οφείλεται αποκλειστικά στη μεγάλη έκτασή τους. Επίσης, όσον αφορά το συντελεστή απορροής, εμφανίζει μέσες προς μικρές τιμές, γεγονός που οφείλεται τόσο στη μικρή ένταση και συχνότητα των βροχοπτώσεων, όσο και στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης πρόκειται για μια αγροτική και αραιοκατοικημένη περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρή φυτοκάλυψη. Τέλος, από την προσομοίωση για την

περίοδο 2010-2100, παρατηρείται μια μείωση της επιφανειακής απορροής κατά 15%, λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων και της αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης, ενώ ο συντελεστής απορροής C παρουσιάζει όμοιες τιμές, καθώς εξαρτάται από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της νήσου.

Πίνακας 7.7: Τιμές μέσης ετήσιας εξατμισιδιαπνοής για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.

Α/Α	**Όνομα Λεκάνης**	**Εμβαδόν (km^2)**	**Εξατμισιδιαπνοή (mm) 1958-2010**	**Όγκος νερού (x 10^6 m^3)**	**Εξατμισιδιαπνοή (mm) 2010-2100**	**Όγκος νερού (x 10^6 m^3)**
1	Αγιά	14,14	179,14	2,53	185,19	2,62
2	Ρ. Ποταμός	12,64	179,14	2,53	185,19	2,34
3	Ρ. Καρβουκόλακος	8,14	333,11	2,71	344,37	2,80
4	Ρ. Τζουμαγιά	12,24	280,21	3,43	289,68	3,55
5	Ατσιπάπη	10,03	331,33	3,32	342,53	3,44
6	Ρ. Πνίχτης	13,7	284,76	3,9	294,38	4,03
7	Ρ. Μεσονήσι	17,33	295,59	5,12	305,58	5,30
8	Ρ. Λίμνες	17,52	319,34	5,59	330,13	5,78
9	Ρ. Σκοτεινό	16,19	334,32	5,41	345,62	5,60
10	Ρ. Ανακίων	12,46	347,44	4,33	359,18	4,48
11	Κλειδός	10,6	331,3	3,51	342,50	3,63
12	Πάνορμος	12,92	322,82	4,17	333,73	4,31
13	Ρ. Φύσας	24,51	332,29	8,14	343,52	8,42
14	Βρεμένης	8,15	336,42	2,74	347,79	2,83
15	Αγιασσός	18,16	317,67	5,77	328,41	5,96
16	Πυργάκι	45,54	280,62	12,78	290,10	13,21
17	Μικρή Βίγλα	12,24	242,15	2,96	250,33	3,06
18	Βίβλος	12,31	239,48	2,95	247,57	3,05
19	Αγία Άννα	7,67	307,34	2,36	317,73	2,44
20	Ρ. Παράτρεχος	67,22	220,62	14,83	228,08	15,33
21	Νάξος	6,86	187,53	1,27	193,87	1,33
22	Ρ. Γαρίνου	36,34	184,32	6,7	190,55	6,92
23	Ρ. Περγαντί	8,23	196,06	1,61	202,69	1,67
24	Ρ. Φανερωμένη	9,46	159,96	1,51	165,37	1,56
25	Ρ. Μυλοπέραμα	14,39	167,65	2,41	173,32	2,49

Πίνακας 7.8: Τιμές μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής και του συντελεστή απορροής (C) για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.

Α/Α	**Όνομα Λεκάνης**	**Εμβαδόν (km^2)**	**Επιφανειακή Απορροή (mm) 1958-2010**	**Όγκος νερού (x 10^6 m^3)**	**Συντελεστής Απορροής (C)**	**Επιφανειακή Απορροή (mm) 2010-2100**	**Όγκος νερού (x 10^6 m^3)**	**Συντελεστής Απορροής (C)**
1	Αγιά	14,14	192,89	2,73	0,52	163,96	2,32	0,53
2	Ρ. Ποταμός	12,64	198,95	2,51	0,53	169,11	2,14	0,55
3	Ρ. Καρβουκόλακος	8,14	36,91	0,3	0,10	31,37	0,26	0,10
4	Ρ. Τζουμαγιά	12,24	89,2	1,09	0,24	75,82	0,93	0,25
5	Ατσιπάπη	10,03	38,24	0,38	0,10	32,50	0,33	0,11
6	Ρ. Πνίχτης	13,7	83,44	1,14	0,22	70,92	0,97	0,23
7	Ρ. Μεσονήσι	17,33	74,04	1,28	0,20	62,93	1,09	0,20
8	Ρ. Λίμνες	17,52	49,78	0,87	0,13	42,31	0,74	0,14
9	Ρ. Σκοτεινό	16,19	35,89	0,58	0,10	30,51	0,49	0,10
10	Ρ. Ανακίων	12,46	27,08	0,34	0,07	23,02	0,29	0,07
11	Κλειδός	10,6	38,96	0,41	0,10	33,12	0,35	0,11
12	Πάνορμος	12,92	47,36	0,61	0,13	40,26	0,52	0,13
13	Ρ. Φύσας	24,51	37,62	0,92	0,10	31,98	0,78	0,10
14	Βρεμένης	8,15	33,87	0,28	0,09	28,79	0,23	0,09
15	Αγιασσός	18,16	52,41	0,95	0,14	44,55	0,81	0,14
16	Πυργάκι	45,54	91,16	4,15	0,24	77,49	3,53	0,25
17	Μικρή Βίγλα	12,24	127,5	1,56	0,34	108,38	1,33	0,35
18	Βίβλος	12,31	128,81	1,59	0,35	109,49	1,35	0,36
19	Αγία Άννα	7,67	61,86	0,47	0,16	52,58	0,40	0,17
20	Ρ. Παράτρεχος	67,22	150,06	10,08	0,40	127,55	8,57	0,42
21	Νάξος	6,86	183,71	1,26	0,49	156,15	1,07	0,51
22	Ρ. Γαρίνου	36,34	186,84	6,79	0,50	158,81	5,77	0,52
23	Ρ. Περγαντί	8,23	176,09	1,45	0,47	149,68	1,23	0,49
24	Ρ. Φανερωμένη	9,46	212,32	2,01	0,57	180,47	1,71	0,59
25	Ρ. Μυλοπέραμα	14,39	204,55	2,9	0,54	173,87	2,50	0,57

7.3.5 Κατείσδυση

Η κατείσδυση είναι η διαδικασία κατά την οποία το νερό εισέρχεται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους και κατόπιν κινείται προς τα βαθύτερα στρώματα. Το ποσό αυτό του νερού κατά πρώτο λόγο συμπληρώνει το έλλειμμα υγρασίας του εδάφους, ενώ αυτό που πλεονάζει κινείται βαθύτερα και τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση είναι η υγρασία του εδάφους, η ένταση και η κατανομή της βροχόπτωσης, η λιθολογία και η βλάστηση.

Μέτρο της ικανότητας της κατείσδυσης αποτελεί ο συντελεστής κατείσδυσης (i), ο οποίος εκφράζεται από τη σχέση:

$$i = \frac{I}{P \times 100\%}$$

Όπου:

- I, η συνολική ποσότητα του νερού σε mm που κατεισδύει σε δοσμένο χρόνο και τόπο.
- P, το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης σε mm.

Η παράμετρος αυτή του υδρολογικού ισοζυγίου εκτιμάται ότι στη Νάξο κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που αποδίδεται στη μεγάλη εξάπλωση των πολύ χαμηλής υδροπερατότητας σχηματισμών (σχιστόλιθοι, μιγματίτης, κ.τ.λ.). Όμως στην περίπτωση αυτή, η κατείσδυση δεν εξαρτάται μόνο από την υδροπερατότητα των σχηματισμών, αλλά εξαρτάται επίσης από τη διεύθυνση και την πυκνότητα των ασυνεχειών, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, εκτιμάται ότι τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η κατείσδυση του νερού.

Από την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου SWAT, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές κατείσδυσης για κάθε υδρογραφική λεκάνη (Πίνακας 7.9). Από τις τιμές αυτές επιβεβαιώνεται ότι η κατείσδυση κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα σε όλο το νησί. Σημαντικό αποτελεί επίσης το γεγονός ότι χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα για την περίοδο 2010-2100, με βάση το σενάριο A2, η κατείσδυση στη νήσο Νάξο, θα μειωθεί κατά μέσο όρο κατά 20%.

Ακόμη, χρησιμοποιώντας τις τιμές κατείσδυσης για τις λεκάνες απορροής όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και κατασκευάζοντας έναν χάρτη κατείσδυσης, μπορεί να γίνει εμφανής πως κατανέμεται χωρικά η κατείσδυση στην περιοχή έρευνας, καθώς και η μείωση αυτής κατά την περίοδο 2010-2100 (Εικόνες 7.5, 7.6).

Επιπρόσθετα με το χάρτη κατείσδυσης είναι εμφανής η άμεση σχέση της κατείσδυσης με το μέσο ασυνεχειών της νήσου Νάξου, καθώς μεγάλες τιμές κατείσδυσης εμφανίζονται σε περιοχές όπου η πυκνότητα και ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών εμφανίζουν επίσης μεγάλες τιμές (Εικόνα 7.7). Εξαίρεση αποτελεί το δυτικό τμήμα του νησιού, όπου παρουσιάζονται μεγάλες τιμές κατείσδυσης σε περιοχές όπου η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών είναι αρκετά μικρή. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται άμεσα από τη λιθολογία, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται από την παρουσία χαλαρών αποθέσεων (αλλουβιακές αποθέσεις και κροκαλοπαγή).

Επίσης σύμφωνα με το χάρτη της Εικόνας 7.7, εμφανίζονται περιοχές όπου ενώ παρουσιάζουν μεγάλη χωρική πυκνότητα ασυνεχειών, παρουσιάζουν μικρές τιμές κατείσδυσης. Στην περίπτωση αυτή, ανασταλτικοί παράγοντες της κατείσδυσης αποτελούν τόσο η λιθολογία, όσο και οι μορφολογικές κλίσεις της περιοχής σε συνδυασμό με την επεισοδιακού χαρακτήρα επιφανειακή απορροή. Όμως, σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ότι η κατείσδυση στο ανατολικό τμήμα της Νάξου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το δυτικό τμήμα, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία των μαρμάρων στο τμήμα αυτό, σε σχέση με την επικράτηση των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων στο δυτικό.

Γενικά πάντως, από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT στην περιοχή μελέτης, φαίνεται ότι το μοντέλο δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά το μέσο ασυνεχειών, καθώς παρόλο που δεν χρησιμοποιήθηκαν χωρικά δεδομένα ώστε να ληφθεί υπόψη το σύνολο των ασυνεχειών στην περιοχή, εντούτοις η κατείσδυση ήταν δυνατόν να συσχετιστεί άμεσα με αυτό.

7.3.6 Υδρολογικό ισοζύγιο

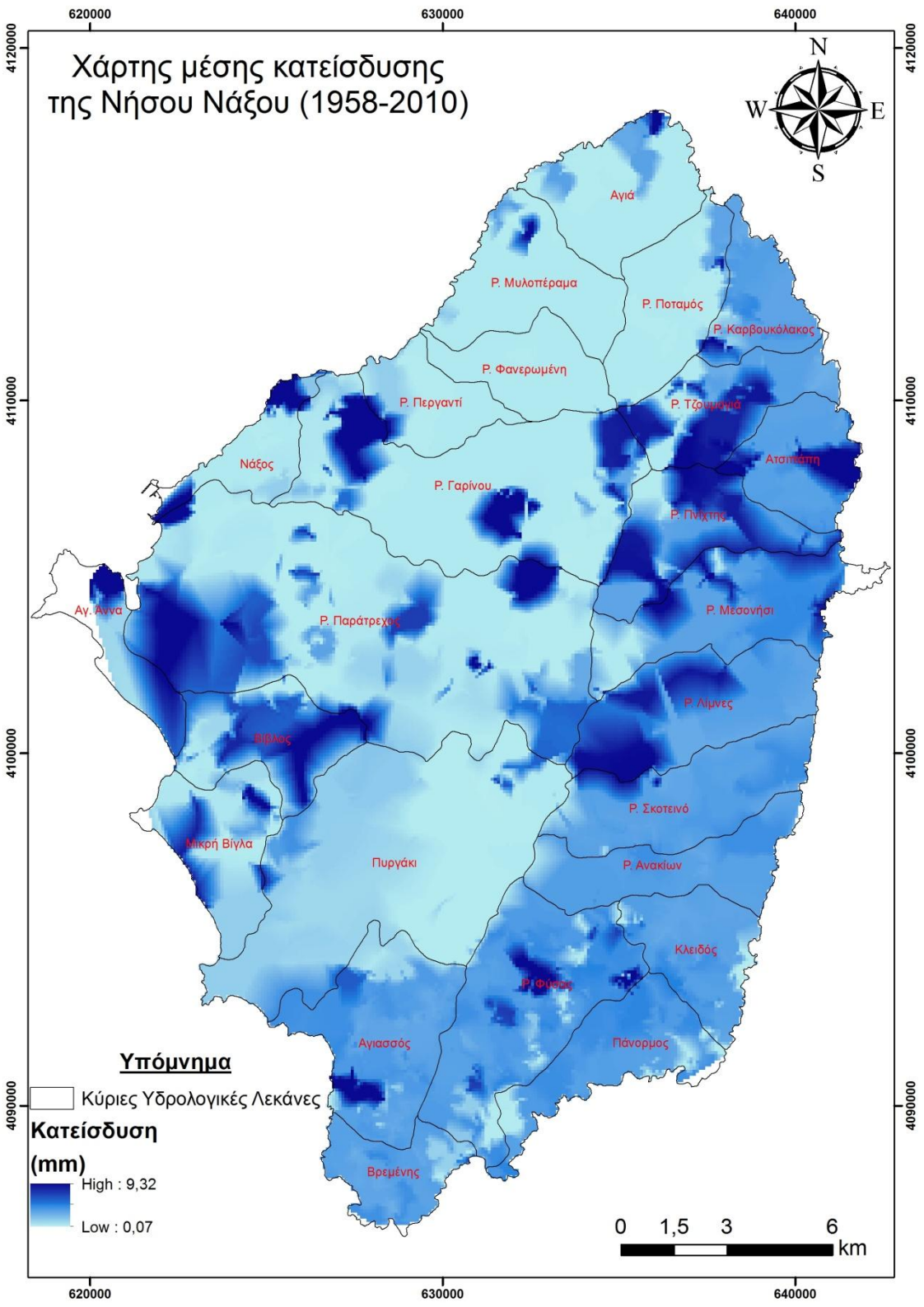
Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι δυνατό να διαμορφωθεί το υδρολογικό ισοζύγιο σε ετήσια βάση για την περίοδο 1958-2010 στη νήσο Νάξο (Πίνακες 7.10 - 7.13). Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η εξατμισιδιαπνοή και η επιφανειακή απορροή είναι αρκετά υψηλές στην περιοχή με ποσοστό 69% και 29% αντίστοιχα επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ η κατείσδυση είναι αρκετά χαμηλή, με ποσοστό 2% επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης έρχεται να προστεθεί το γεγονός ότι για την περίοδο 2010-2100, το υδρολογικό ισοζύγιο βγαίνει αρνητικό, καθώς με την αύξηση της εξατμισιδιαπνοής με ταυτόχρονη μείωση των βροχοπτώσεων, λόγω των κλιματικών αλλαγών, το άθροισμα της μέσης εξατμισιδιαπνοής με την μέση επιφανειακή απορροή και τη μέση κατείσδυση ισούται με 158 mm, ενώ η μέση

βροχόπτωση εκτιμάται στα 133 mm. Επίσης, καθώς το πρόγραμμα υπολογίζει κάθε παράμετρο του υδρολογικού ισοζυγίου ξεχωριστά, δέχεται ότι υπάρχει κατείσδυση, ενώ στην ουσία είναι σχεδόν μηδενική.

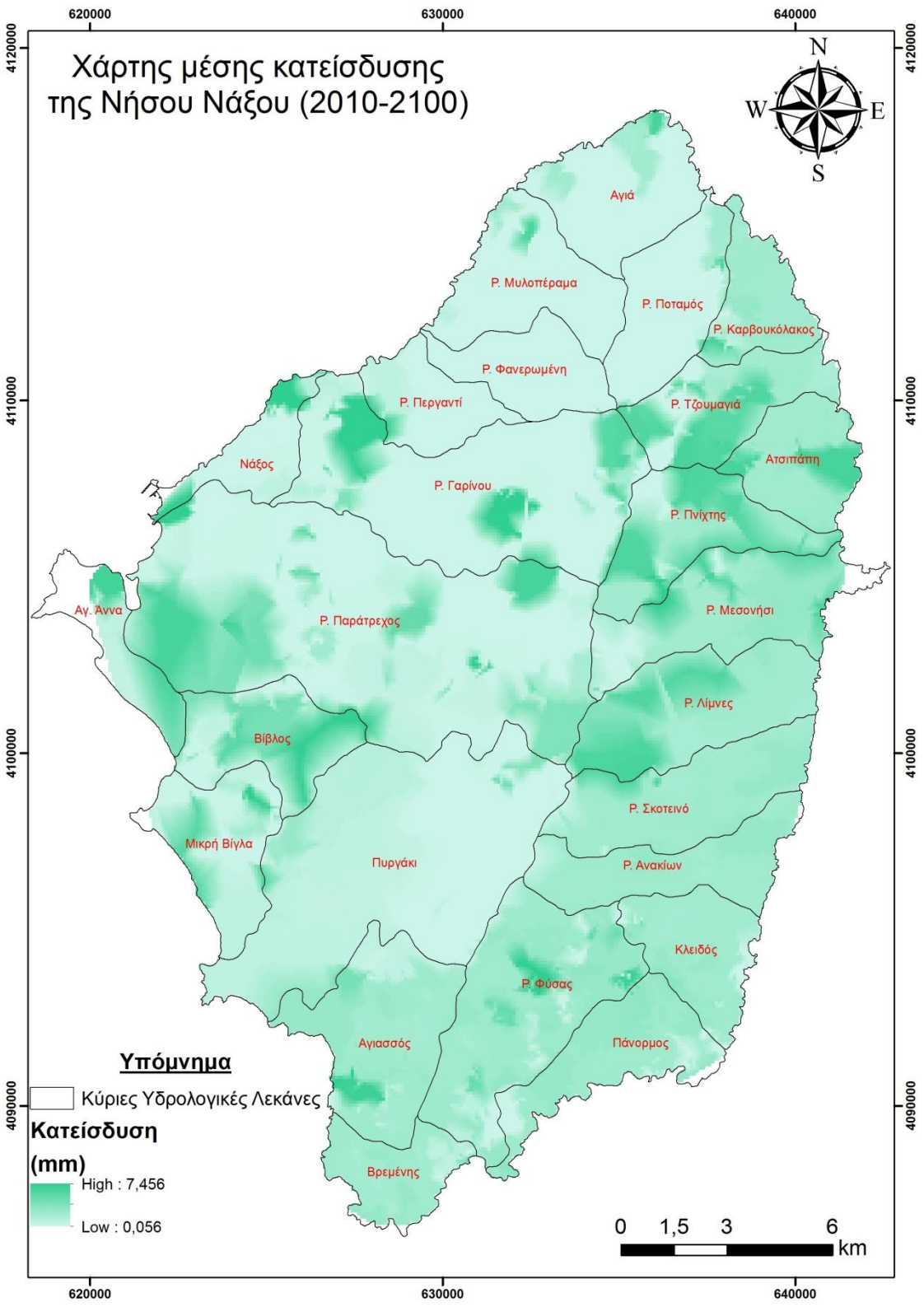
Ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου για τη προσομοίωση της υπόγειας ροής σε μέσο ασυνεχειών είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται προσεγγιστικά ο όγκος νερού που εισρέει στα υπόγεια υδατικά συστήματα της περιοχής έρευνας. Έτσι, ο όγκος νερού που κατεισδύει αποτελεί πλέον την τιμή εισροών στο υδρογεωλογικό μοντέλο, για κάθε περίοδο προσομοίωσης.

Πίνακας 7.9: Τιμές μέσης ετήσιας κατείσδυσης για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη.

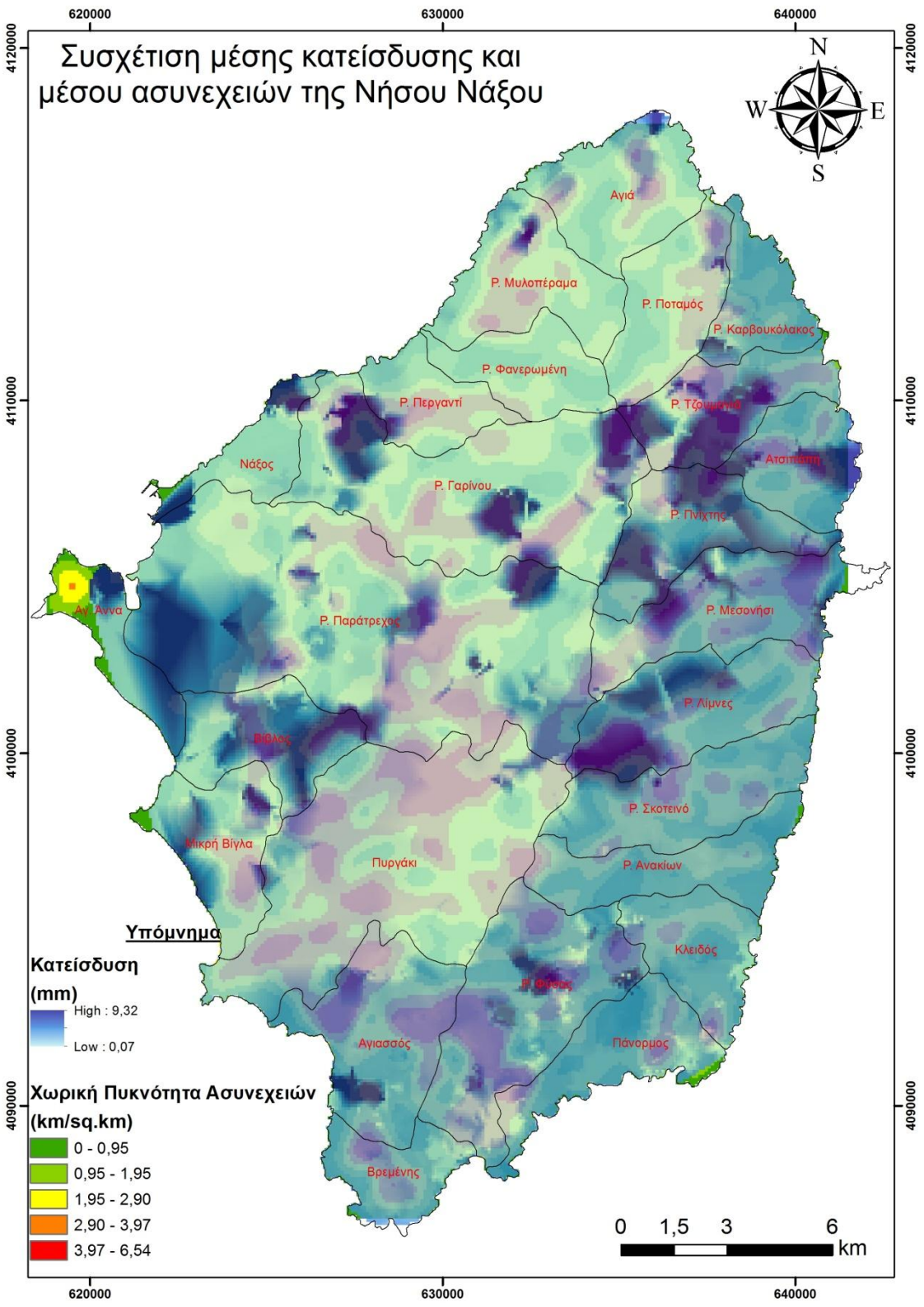
Α/Α	**Όνομα Λεκάνης**	**Εμβαδόν (km^2)**	**Κατείσδυση (mm) 1958-2010**	**Όγκος νερού ($x\ 10^6\ m^3$)**	**Κατείσδυση (mm) 2010-2100**	**Όγκος νερού ($x\ 10^6\ m^3$)**
1	Αγιά	14,14	0,86	0,012	0,69	0,010
2	Ρ. Ποταμός	12,64	0,49	0,006	0,39	0,005
3	Ρ. Καρβουκόλακος	8,14	7,68	0,063	6,14	0,050
4	Ρ. Τζουμαγιά	12,24	11,42	0,139	9,14	0,112
5	Ατσιπάπη	10,03	9,93	0,099	7,94	0,080
6	Ρ. Πνίχτης	13,7	17,94	0,246	14,35	0,197
7	Ρ. Μεσονήσι	17,33	10,72	0,186	8,58	0,149
8	Ρ. Λίμνες	17,52	12,71	0,223	10,17	0,178
9	Ρ. Σκοτεινό	16,19	2,14	0,035	1,71	0,028
10	Ρ. Ανακίων	12,46	7,37	0,092	5,90	0,073
11	Κλειδός	10,6	6,5	0,069	5,20	0,055
12	Πάνορμος	12,92	7,22	0,093	5,78	0,075
13	Ρ. Φύσας	24,51	8,45	0,207	6,76	0,166
14	Βρεμένης	8,15	6,33	0,052	5,06	0,041
15	Αγιασσός	18,16	8,42	0,153	6,74	0,122
16	Πυργάκι	45,54	1,28	0,058	1,02	0,047
17	Μικρή Βίγλα	12,24	13,76	0,168	11,01	0,135
18	Βίβλος	12,31	21,47	0,264	17,18	0,211
19	Αγία Άννα	7,67	16,04	0,123	12,83	0,098
20	Ρ. Παράτρεχος	67,22	8,86	0,596	7,09	0,476
21	Νάξος	6,86	4,52	0,031	3,62	0,025
22	Ρ. Γαρίνου	36,34	5,5	0,2	4,40	0,160
23	Ρ. Περγαντί	8,23	0,24	0,002	0,19	0,002
24	Ρ. Φανερωμένη	9,46	0	0	0,00	0,000
25	Ρ. Μυλοπέραμα	14,39	0,3	0,004	0,24	0,003



Εικόνα 7.5: Χάρτης μέσης κατείσδυσης νερού ανά κύρια υδρολογική λεκάνη στη νήσο Νάξο για την περίοδο 1958-2010.



Εικόνα 7.6: Χάρτης μέσης κατείσδυσης νερού ανά κύρια υδρολογική λεκάνη στη νήσο Νάξο για την περίοδο 2010-2100.



Εικόνα 7.7: Χάρτης συσχέτισης της μέσης κατείσδυσης (1958-2010) με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών ανά κύρια υδρολογική λεκάνη στη νήσο Νάξο.

Πίνακας 7.10: Συνολικές τιμές μέσου ετήσιου όγκου νερού για κάθε παράμετρο του υδρολογικού ισοζυγίου για τη νήσο Νάξο, αλλά και για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη ξεχωριστά, για την περίοδο 1958-2010.

Α/Α	**Όνομα Λεκάνης**	**P (x 10^6 m^3)**	**E (x 10^6 m^3)**	**R (x 10^6 m^3)**	**I (x 10^6 m^3)**
1	Αγιά	5	2,5	2,7	0
2	Ρ. Ποταμός	5	2,5	2,5	0
3	Ρ. Καρβουκόλακος	3	2,7	0,3	0,1
4	Ρ. Τζουμαγιά	5	3,4	1,1	0,1
5	Ατσιπάπη	4	3,3	0,4	0,1
6	Ρ. Πνίχτης	5	3,9	1,1	0,3
7	Ρ. Μεσονήσι	6	5,1	1,3	0,2
8	Ρ. Λίμνες	7	5,6	0,9	0,2
9	Ρ. Σκοτεινό	6	5,4	0,6	0
10	Ρ. Ανακίων	5	4,3	0,3	0,1
11	Κλειδός	4	3,5	0,4	0,1
12	Πάνορμος	5	4,2	0,6	0,1
13	Ρ. Φύσας	9	8,1	0,9	0,2
14	Βρεμένης	3	2,7	0,3	0,1
15	Αγιασσός	7	5,8	1	0,2
16	Πυργάκι	17	12,9	4,2	0,1
17	Μικρή Βίγλα	5	3	1,6	0,2
18	Βίβλος	5	3	1,6	0,3
19	Αγία Άννα	3	2,3	0,5	0,1
20	Ρ. Παράτρεχος	25	14,8	10	0,6
21	Νάξος	3	1,3	1,7	0
22	Ρ. Γαρίνου	14	6,7	6,8	0,2
23	Ρ. Περγαντί	3	1,6	1,5	0
24	Ρ. Φανερωμένη	4	1,5	2	0
25	Ρ. Μυλοπέραμα	5	2,4	2,9	0
Σύνολο:		163	112,5	47,2	3,3

Πίνακας 7.11: Υδρολογικό ισοζύγιο της νήσου Νάξου σε ετήσια βάση, για την περίοδο 1958-2010.

Παράμετρος	**P**	**E**	**R**	**I**
Όγκος νερού (x 10^6 m^3)	163	112,5	47,2	3,3
Ποσοστό (%)	100%	69%	29%	2%

Πίνακας 7.12: Συνολικές τιμές μέσου ετήσιου όγκου νερού για κάθε παράμετρο του υδρολογικού ισοζυγίου για τη νήσο Νάξο, αλλά και για κάθε κύρια υδρολογική λεκάνη ξεχωριστά, για την περίοδο 2010-2100.

Α/Α	**Όνομα Λεκάνης**	**P** **(x 10^6 m^3)**	**E** **(x 10^6 m^3)**	**R** **(x 10^6 m^3)**	**I** **(x 10^6 m^3)**
1	Αγιά	4	3	2	0,01
2	Ρ. Ποταμός	4	2	2	0,005
3	Ρ. Καρβουκόλακος	3	3	0	0,05
4	Ρ. Τζουμαγιά	4	4	1	0,112
5	Ατσιπάπη	3	3	0	0,08
6	Ρ. Πνίχτης	4	4	1	0,197
7	Ρ. Μεσονήσι	5	5	1	0,149
8	Ρ. Λίμνες	5	6	1	0,178
9	Ρ. Σκοτεινό	5	6	0	0,028
10	Ρ. Ανακίων	4	4	0	0,073
11	Κλειδός	3	4	0	0,055
12	Πάνορμος	4	4	1	0,075
13	Ρ. Φύσας	8	8	1	0,166
14	Βρεμένης	3	3	0	0,041
15	Αγιασσός	6	6	1	0,122
16	Πυργάκι	14	13	4	0,047
17	Μικρή Βίγλα	4	3	1	0,135
18	Βίβλος	4	3	1	0,211
19	Αγία Άννα	2	2	0	0,098
20	Ρ. Παράτρεχος	21	15	9	0,476
21	Νάξος	2	1	1	0,025
22	Ρ. Γαρίνου	11	7	6	0,16
23	Ρ. Περγαντί	3	2	1	0,002
24	Ρ. Φανερωμένη	3	2	2	0
25	Ρ. Μυλοπέραμα	4	2	3	0,003
Σύνολο:		133	116	40	2

Πίνακας 7.13: Υδρολογικό ισοζύγιο της νήσου Νάξου σε ετήσια βάση για την περίοδο 2010-2100.

Παράμετρος	**P**	**E**	**R**	**I**
Όγκος νερού (x 10^6 m^3)	133	116	40	2

Κεφάλαιο 8ο - Υδρογεωλογία

8. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΊΑ

8.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΕΣΟ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Το υδρογεωλογικό περιβάλλον στη νήσο Νάξο, αλλά και στις Κυκλάδες γενικότερα, εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται με τη γεωλογία, την υδρολιθολογία, το είδος και το βαθμό τεκτονισμού, τη γεωμορφολογία και την ανθρώπινη δραστηριότητα. Τις περισσότερες φορές οι παράγοντες αυτοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και ασφαλή συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο μέσα από τη σύνθετη ανάλυση όσο το δυνατόν περισσότερων από αυτών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η νήσος Νάξος αποτελείται κυρίως από σκληρά διερρηγμένα πετρώματα. Έτσι, το υδρογεωλογικό περιβάλλον που διαμορφώνεται εξαρτάται γενικά από τη λιθολογία (ανάπτυξη πρωτογενούς πορώδους, ύπαρξη υδατοδιαλυτών συστατικών, κ.τ.λ.) και την τεκτονική τους κατάσταση (ποσοστό διακλάσεων, ρήγματα, κ.τ.λ.), ενώ το νερό επιδρά στο μέσο με μια δευτερογενή διαδικασία διάλυσης υλικού και διεύρυνσης των διακλάσεων, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση ευνοϊκών συνθηκών για τη ροή του. Επιπλέον, δρουν συνδυαστικά οι μικρές υδρολογικές λεκάνες της νήσου, η χαμηλή μέση ετήσια βροχόπτωση, η υψηλή μέση θερμοκρασία, η μεγάλη ηλιοφάνεια και οι μεγάλες ταχύτητες ανέμων. Τέλος, η άμεση επικοινωνία σχετικά διαπερατών σχηματισμών με τη θάλασσα στο δυτικό κομμάτι της νήσου, που έχει επιφέρει την ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδροφορέων, σε συνδυασμό με την υφιστάμενες συνθήκες υπερεκμετάλλευσης αυτών.

Έτσι, σκοποί της ενότητας αυτής που είναι απαραίτητοι για τον κύριο στόχο της παρούσας διατριβής είναι:

- Η μελέτη της υδρογεωλογικής δομής της νήσου και ο συσχετισμός της παρουσίας και της παροχής των πηγών της περιοχής έρευνας με τα χαρακτηριστικά του μέσου ασυνεχειών, όπως είναι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, η απόσταση των πηγών από τις ασυνέχειες, η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών και ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών, όπου είναι δυνατή η εξαγωγή πρώτων συμπερασμάτων σχετικά με την υπόγεια ροή.
- Η μελέτη της παρουσίας και της κατανομής του υπόγειου νερού στην περιοχή έρευνας με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ούτως ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή της παραμέτρου της υδραυλικής αγωγιμότητας στο μοντέλο της υπόγειας ροής, δεχόμενοι ότι ζώνες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. πυκνότητα ασυνεχειών, μορφολογικές κλίσεις, κ.τ.λ.) ευνοούν την κατείσδυση του νερού.

8.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

8.2.1 Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών της Νάξου

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της νήσου Νάξου, ανάλογα με το λιθολογικό τους χαρακτήρα και τη χωρική τους κατανομή, φιλοξενούν κατά θέσεις υπόγεια υδροφορία. Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη, προκύπτει ότι στη δομή του νησιού συμμετέχουν λιθολογικοί σχηματισμοί υψηλής, μέσης και χαμηλής περατότητας, των οποίων η υδρογεωλογική συμπεριφορά και ο ρόλος τους στη διακίνηση των υπογείων νερών αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

8.2.1.1 Αλλουβιακές - Πλειστοκαινικές αποθέσεις

Οι συγκεκριμένες αποθέσεις καταλαμβάνουν τις πεδινές και παράκτιες περιοχές της δυτικής Νάξου. Αποτελούνται κυρίως από άμμους, ιλύ και χαλίκια, αλλά και από αμμώδεις λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, με λεπτά στρώματα κίσσηρη. Περιλαμβάνουν επίσης θίνες και συγκολλημένα κορήματα κλιτύων και κοιλάδων (Jansen, 1977).

Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών είναι μεταβαλλόμενη από χαμηλή έως υψηλή, εξαρτώμενη από την κοκκομετρική σύνθεση της θέσης, ενώ οι υπόγειοι υδροφορείς που διαμορφώνονται είναι αντίστοιχης δυναμικότητας.

Στην πεδιάδα «Λιβάδι», η οποία είναι και η μεγαλύτερη προσχωσιγενής λεκάνη του νησιού, η κύρια υδροφορία διαμορφώνεται σε στρώμα άμμου, το οποίο αναπτύσσεται σε βάθος 6 m έως 10 m από την επιφάνεια του εδάφους. Το στρώμα αυτό της άμμου, που στις παρυφές της λεκάνης μεταβαίνει σε χονδρόκοκκη άμμο και κροκάλες, επικάθεται σε γρανοδιοριτικό υπόβαθρο.

Ο αναπτυσσόμενος προσχωματικός υπόγειος υδροφορέας, που είναι από τους αξιολογότερους του νησιού, είναι μέτριας υδροδυναμικότητας και αποδοτικότητας, που έχει όμως ποιοτικά υποβαθμιστεί λόγω της έντονης εκμετάλλευσής του, για την εξυπηρέτηση αρδευτικών κυρίως, αλλά και υδρευτικών, αναγκών.

8.2.1.2 Νεογενείς αποθέσεις

Στις νεογενείς αποθέσεις περιλαμβάνονται συνεκτικοί και ημισυνεκτικοί γεωλογικοί σχηματισμοί με εναλλαγές στρωμάτων ψαμμιτών, μαργών, ασβεστόλιθων και κροκαλοπαγών. Καταλαμβάνουν σχετικά μικρές εκτάσεις, με κύριες εμφανίσεις στις περιοχές Γαλανάδο, Μέλανες, Γαλήνη και Μουτσούνα.

Η λιθοφασική τους σύσταση και η στρωματογραφική τους διάταξη, όπου μέτρια υδροπερατοί σχηματισμοί (ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθοι) εναλλάσσονται με υδατοστεγανούς σχηματισμούς (μάργες), δημιουργεί ένα σύνολο μεταβαλλόμενης περατότητας. Οι σχηματισμοί αυτοί συμπεριφέρονται συνολικά ως ημιπερατοί σχηματισμοί, πολύ περιορισμένης υδροφορίας και αποθηκευτικής ικανότητας.

8.2.1.3 Διαβάσες, πυροκλαστικά, υπερβασικά και γαββροειδή πετρώματα

Τα ηφαιστειογενή και υπερβασικά αυτά πετρώματα απαντούν στη Νάξο σε πολύ μικρές εμφανίσεις, οι κυριότερες των οποίων βρίσκονται πλησίον του Γαλανάδου, των Μελάνων και των Εγγαρών.

Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών κυμαίνεται γενικά σε πολύ χαμηλά επίπεδα, καθώς παρατηρείται μικρός αριθμός ασυνεχειών (εμφανίζουν την ελάχιστη τιμη πυκνότητας ασυνεχειών). Έτσι, υδρογεωλογικά, λειτουργούν ως φραγμός στην υπόγεια κυκλοφορία του νερού των υδροφόρων που παρατηρούνται στα μάρμαρα, με τους οποίους σε πολλές περιπτώσεις, έρχονται σε επαφή.

8.2.1.4 Γρανοδιορίτες

Οι γρανοδιορίτες καταλαμβάνουν σχετικά μεγάλη έκταση στο δυτικό μέρος του νησιού, οι οποίοι λόγω της έντονης αποσάθρωσής τους, έχουν πληρώσει τις μεγαλύτερες προσχωματικές λεκάνες. Η σύστασή τους ποικίλει από γρανιτική έως γρανοδιοριτική, είναι ελάχιστα διερρηγμένοι και μόνο επιδερμικά εξαλλοιωμένοι.

Ο συγκεκριμένος γεωλογικός σχηματισμός παρουσιάζει πολύ χαμηλή υδροπερατότητα, καθώς θεωρώντας ότι εμφανίζει περατότητα μέσου ασυνεχειών και ότι η χωρική πυκνότητα στο σχηματισμό αυτό παρατηρείται από χαμηλή έως μέση, τον κατατάσσει στους σχηματισμούς με ουσιαστικά μικρή έως ανύπαρκτη υδροφορία.

8.2.1.5 Μάρμαρα και μετακροκαλοπαγή

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ασβεστιτικά - δολομιτικά μάρμαρα (λεπτοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη) και συμπαγών δολομιτών, τα οποία εναλλάσσονται με μαρμαρυγιακούς και αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους. Στον πυρήνα του συστήματος αυτού αναπτύσσεται μετακροκαλοπαγές (κροκαλοπαγές που συμμετείχε σε δύο επεισόδια μεταμόρφωσης M1 και

Μ2 κατά το Ηώκαινο και το Ολιγόκαινο - Κατώτερο Μειόκαινο αντίστοιχα), το οποίο αποτελείται από λατύπες μαρμάρου με ανθρακικό συνδετικό υλικό.

Το συγκεκριμένο σύστημα καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της ανατολικής, κεντρικής και νότιας Νάξου, περιλαμβάνει πλειάδα υδροφόρων, που έχουν διαμορφωθεί από τη στρωματογραφική επαλληλία των υδροπερατών (ανθρακικών μερών) και των σχετικά υδατοστεγανών (σχιστολιθικών) ενστρώσεων. Διαμορφώνεται έτσι μια χαρακτηριστική ζωνώδης ανάπτυξη υδροφόρων, εντός των στρωμάτων μαρμάρων, που διατείνονται σχεδόν παράλληλα προς τον κεντρικό άξονα του αντικλίνου της Νάξου.

Η υδροπερατότητα στο σύστημα αυτό ποικίλει από μέτρια έως υψηλή για τις ζώνες μαρμάρων της δυτικής Νάξου, έως χαμηλή για τις ζώνες των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται τόσο σε τεκτονικά αίτια, όσο και στη λιθοφασική ανομοιογένεια που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο σύστημα.

Στην ανατολική Νάξο, η παρουσία δολομιτικών οριζόντων, φακών και σχιστολιθικών παρεμβολών, παρεμπόδισε την ανάπτυξη ενιαίων και εκτεταμένων καρστικών δικτύων και παρατηρείται εμφάνιση επιπέδων βάσης σε μεγάλα υψόμετρα (πηγές, κ.τ.λ.).
Σε πολλές μελέτες, οι υδροφορίες που εμφανίζονται στο σύστημα αυτό χαρακτηρίζονται λανθασμένα ως καρστικές. Πρόκειται για ανθρακικούς υδροφορείς ασυνεχειών, καθώς έντονη καρστικοποίηση δεν παρατηρειται. Οι ελάχιστες επιφανειακές και υπόγειες καρστικές μορφές που συναντώνται, έχουν σχηματιστεί σε παλιότερες γεωλογικές περιόδους, όπου το κλίμα ήταν πιο υγρό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η έκταση των συμπαγών ανθρακικών πετρωμάτων μεγάλου πάχους είναι μικρή, ενώ η έντονη εναλλαγή τους με γνεύσιους και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, δεν επιτρέπει την κατείσδυση του νερού σε μεγάλο βάθος. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει και το κλίμα, καθώς λόγω των πολύ μικρό αριθμό βροχοπτώσεων, η χημική αποσάθρωση των ανθρακικών πετρωμάτων να είναι αμελητέα (Ευελπίδου, 2001, Evelpidou et al., 2005).

Επιπλέον, από γεωτρητική έρευνα, η οποία είχε εκτελεστεί παλαιότερα (ΥΠ.ΑΝ., 2005), διαπιστώθηκε ότι αναπτύσσεται περιορισμένη αποκάρστωση στο επίπεδο της θάλασσας, για τους υδροφόρους που είναι ανοικτοί προς αυτή, ενώ σημαντική είναι η αποκάρστωση που εντοπίστηκε σε αρνητικό υψόμετρο (-9 m), γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η αποστράγγιση των καρστικών υδροφόρων ή συστημάτων, που είναι ανοικτά προς τη θάλασσα, γίνεται μέσω ενός παλαιοκαρστικού δικτύου, το οποίο δημιουργήθηκε πιθανότατα από την άνοδο της θάλασσας. Αυτό άλλωστε επιβεβαιώνεται και από την εμφάνιση

υποθαλάσσιων αναβλύσεων στα βόρεια της Μουτσούνας (Ανεβάλουσα, Χλιαρή Σπηλιά), καθώς και στη νότια Νάξο (πηγές Ρίνας). Τέλος, στην ανατολική Νάξο, η παρουσία δολομιτικών οριζόντων, φακών και σχιστολιθικών παρεμβολών, παρεμπόδισε την ανάπτυξη ενιαίων και εκτεταμένων καρστικών δικτύων.

Αντίθετα, στις ζώνες μαρμάρων, οι οποίες περιβάλλονται από υδατοστεγείς σχηματισμούς (σχιστόλιθοι, μιγματίτες), κυρίως στο δυτικό τμήμα του νησιού, παρουσιάζεται μικρής έκτασης αποκάρστωση στους ανώτερα τοπογραφικά ορίζοντες, και κατά συνέπεια παρουσιάζουν μεγαλύτερη υδροπερατότητα. Γενικότερα όμως, είτε στους ανώτερα τοπογραφικά ορίζοντες, είτε στους βαθύτερους ορίζοντες, η υδροπερατότητα στο σύστημα αυτό εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ή μη ρωγματώσεων και την πυκνότητα αυτών.

Οι διαμορφούμενοι εντός των κλειστών ζωνών μαρμάρου υπόγειοι υδροφορείς, είναι τοπικοί και μέτριας έως χαμηλής αποδοτικότητας, λόγω του συνήθους μικρού αναπτύγματός τους. Παρουσιάζουν όμως το πλεονέκτημα του συνεχούς εμπλουτισμού τους, είτε μέσω της επιφανειακής απορροής από ρέματα που διατέμνουν αυτούς, είτε με την υπόγεια αποστράγγιση της ασθενούς υδροφορίας που αναπτύσσεται στον μανδύα αποσάθρωσης των σχιστόλιθων ή του μιγματίτη, με τους οποίους έρχεται σε άμεση επαφή. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι υδρφόροι είναι οι πλέον εκμεταλλεύσιμοι του νησιού, καθώς εξασφαλίζουν ικανοποιητική ποιότητα και ποσότητα νερού, για την ικανοποίηση τοπικών αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών, ενώ αντιθέτως, τα ανοικτά προς τη θάλασσα μάρμαρα της ανατολικής και νότιας Νάξου, δεν διαμορφώνουν αξιόλογους υπόγειους υδροφορείς, λόγω της άμεσης εκφόρτισής τους σε αυτήν, αλλά και της ποιοτικής τους υποβάθμισης (υφαλμύρινση).

8.2.1.6 Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι

Πρόκειται για πηλιτικής συστάσεως σχηματισμούς, οι οποίοι περιέχουν ασβεστιτικούς και χλωριτικούς σχιστόλιθους, αλλά και αμφιβολίτες.

Καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της δυτικής και βόρειας Νάξου, και αποτελεί τον επικρατούντα σχηματισμό στο σύστημα μαρμάρων - σχιστόλιθων, ενώ στην ανατολική πλευρά του νησιού, η συμμετοχή τους είναι κατά πολύ μικρότερη.

Η υδροπερατότητά τους κυμαίνεται αναλόγως της τιμής της πυκνότητας των ασυνεχειών. Οι περιοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα, η υδροπερατότητα είναι υψηλότερη, σε σχέση με περιοχές με μικρή πυκνότητα ασυνεχειών, οι οποίες παρουσιάζουν πολύ χαμηλή υδροπερατότητα και η κύρια υδρογεωλογική τους λειτουργία είναι αυτή του

ρυθμιστή της υπόγειας κυκλοφορίας του νερού στις ζώνες μαρμάρων τις οποίες μερικά ή ολοκληρωτικά περιβάλλουν (ΥΠ.ΑΝ., 2005). Παράλληλα, πολύ ασθενή υδροφορία αναπτύσσουν οι σχηματισμοί αυτοί στο μανδύα αποσάθρωσής τους, που κατά κανόνα είναι μικρού πάχους 1 - 2 m. Με τον τρόπο αυτό, ένα μέρος της επιφανειακής απορροής συγκρατείται εντός του μανδύα, διαμορφώνοντας ένα πολύ ασθενή υδροφόρο, ο οποίος στη συνέχεια εκφορτίζεται στους κατάντη καρστικούς υδροφόρους, συμβάλλοντας στο συνεχή εμπλουτισμό τους.

8.2.1.7 Μιγματίτης

Ο μιγματιτικός δόμος, ο οποίος καταλαμβάνει μεγάλη έκταση στο κέντρο του νησιού, συνίσταται από ανάτηξη τυπικών γνευσίων και γρανιτών, στη μάζα των οποίων έχουν εγκιβωτιστεί φακοειδούς αναπτύγματος μάρμαρα.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού είναι γενικά πολύ χαμηλή, κατατάσσοντας τον επίσης στους σχετικά αδιαπέρατους σχηματισμούς. Εντούτοις, παρουσιάζει μια ασθενή επιδερμική υδροφορία στα ανώτερα τμήματά του, γεγονός που οφείλεται στις ρωγματώσεις και στις εξαλλοιώσεις, που έχει υποστεί ο σχηματισμός, και που συνήθως δεν προχωρούν σε βάθος μεγαλύτερο των 20 m. Η εμφάνιση εκφορτίσεων (πηγών) σε μεγάλα υψόμετρα, επιβεβαιώνουν τη συγκεκριμένη επιδερμική υδροφορία, ενώ συγχρόνως η πολύ ασθενής και ασυνεχής υδροφορία που αναπτύσσεται σε βάθος, διοχετεύεται και στα εγκιβωτισμένα μάρμαρα, δημιουργώντας συνθήκες φυσικού εμπλουτισμού ή εκφορτίζεται σε περιοχές τοπογραφικά χαμηλότερα εντός των υδατορευμάτων.

8.2.2 <u>Υδρολιθολογική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών της νήσου Νάξου</u>

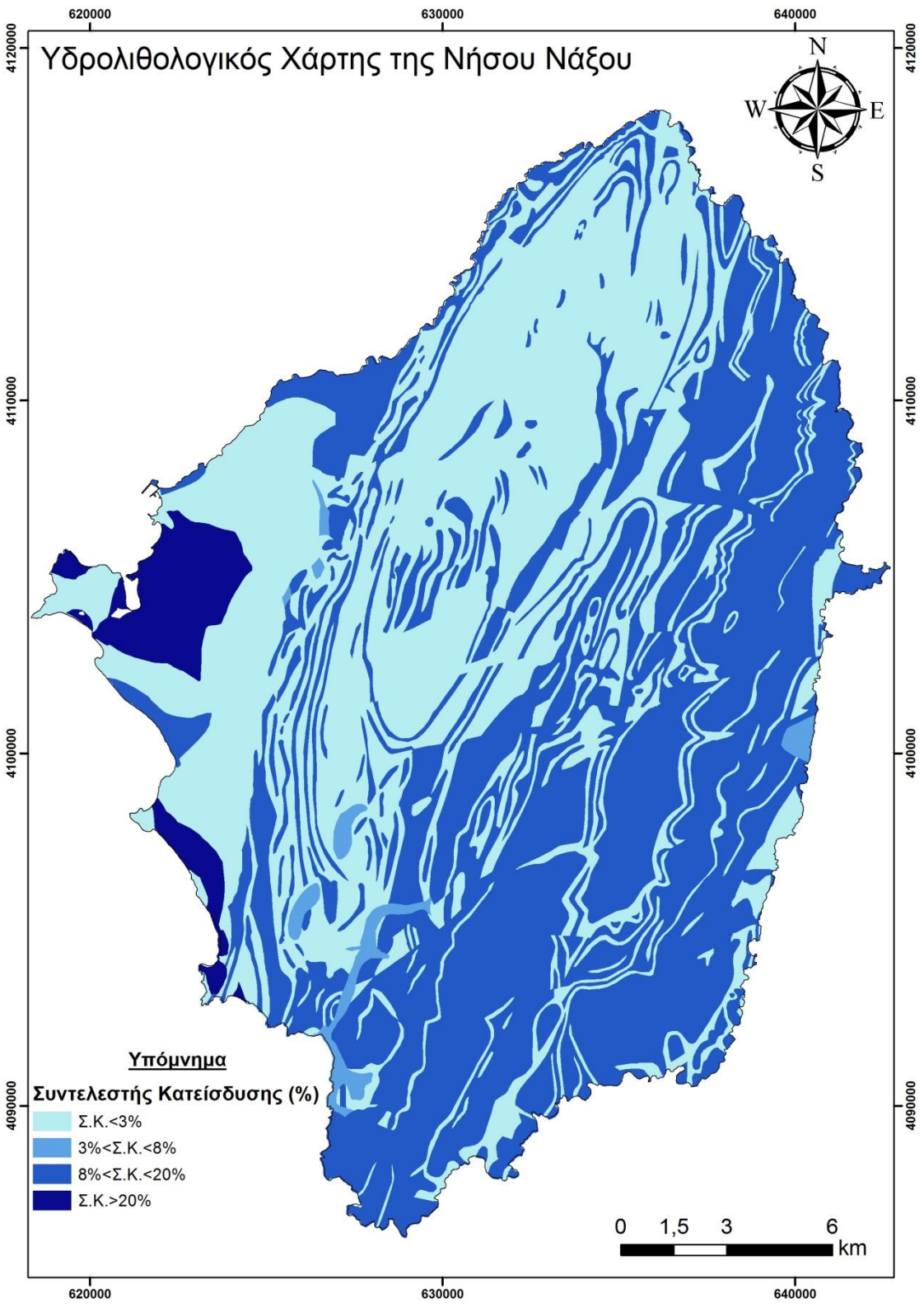
Σύμφωνα με τα παραπάνω υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί της νήσου Νάξου μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, σύμφωνα με το ποσοστό κατείσδυσης Σ.Κ. (Συντελεστής Κατείσδυσης), όπως παρουσιάζεται σε μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων του Υπουργείου Ανάπτυξης το 2005. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη, ο συντελεστής κατείσδυσης υπολογίστηκε μόνο με βάση πόσο υδροπερατός ή όχι είναι ο κάθε γεωλογικός σχηματισμός, και οι κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

- Σχηματισμοί με περατότητα ελάχιστη έως πολύ χαμηλή (Σ.Κ.≤3%). Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τους εξής σχηματισμούς:
    - Διαβάσες και πυροκλαστικά πετρώματα (δ)

- Υπερβασικά και γαββροειδή πετρώματα (σ)
- Γαββροειδή πετρώματα (γβ)
- Γρανοδιορίτης (γδρ)
- Μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι (msch)
- Αμφιβολίτες (ab)
- Μεταμορφωμένα υπερβασικά και γαββρικά πετρώματα (σγβ)
- Λεπτοκοκκώδεις συντεκτονικοί γρανίτες (γ)
- Μιγματίτης (μγ)

- Σχηματισμοί με περατότητα πολύ χαμηλή έως χαμηλή (3%<Σ.Κ.≤8%). Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τους εξής σχηματισμούς:
  - Σχηματισμός που περιέχει πυριτιόλιθους (Pl.ch)
  - Κροκαλοπαγές Άνω Τριτογενούς (Pl.c)
  - Λιμνοθάλασσα και λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις (Q.al)
  - Ψαμμίτες, μάργες και ασβεστόλιθοι (Ql-M.s.)
- Σχηματισμοί με περατότητα πολύ χαμηλή έως μέτρια (8%<Σ.Κ.≤20%). Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τους εξής σχηματισμούς:
  - Συγκολλημένα αλλουβιακά ριπίδια (Q.t)
  - Συγκολλημένα κορήματα κοιλάδων και κλιτύων (Pt.s)
  - Αναβαθμίδα τραβερτίνη (Q.tr)
  - Κροκαλοπαγή (Pt.c)
  - Μετακροκαλοπαγές εκ μαρμάρου (mr)
- Σχηματισμοί με περατότητα μέτρια έως υψηλή (Σ.Κ.>20%). Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τους εξής σχηματισμούς:
  - Αλλούβια (Q.al1)
  - Θίνες (Q.θ)

Σύμφωνα με την παραπάνω λιθολογική κατάταξη, κατασκευάστηκε ο υδρολιθολογικός χάρτης της νήσου Νάξου (Εικόνα 8.1). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάταξη αυτή χρησιμοποιείται με επιφυλάξεις, καθώς δεν έχουν ληφθεί υπόψη άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση, όπως οι μορφολογικές κλίσεις και η φυτοκάλυψη.



Εικόνα 8.1: Υδρολιθολογικός χάρτης της νήσου Νάξου (δεδομένα από ΥΠ.ΑΝ., 2005).

8.2.3 Κύρια υδροφόρα συστήματα της νήσου Νάξου

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για την υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών της Νάξου, γίνεται εμφανές ότι η περιοχή ενδιαφέροντος παρουσιάζει σχηματισμούς ποικίλης υδρολιθολογικής συμπεριφοράς, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφόρων τύπου και μεγέθους υδροφόρων συστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τους πορώδεις σχηματισμούς, η γεωμετρία και η θέση των κορημάτων δεν επιτρέπει τις περισσότερες φορές τη δημιουργία υδροφορίας, ενώ οι παρεμβολές λεπτομερέστερων ιζημάτων στη σύνθεσή τους (μάργες, ψαμμίτες) και η μικρή γενικά επιφανειακή τους εξάπλωση κυρίως στις ακτές δεν επιτρέπει την ανάπτυξη αξιόλογων υπόγειων υδροφοριών. Όταν η γεωμετρία το επιτρέπει, συναντάται στους σχηματισμούς αυτούς μεσαίου δυναμικού υδροφορία. Στις προσχώσεις της πεδιάδας που καλύπτει το δυτικό τμήμα της νήσου Νάξου αναπτύσσεται φρεάτιος υπόγειος υδροφορέας. Η υδροφορία αναπτύσσεται εντός των αλουβίων και του ανώτερου στρώματος του υποκείμενου γρανοδιορίτη ο οποίος είναι διερρηγμένος (Χαρμανίδης, 2002, ΥΠ.ΑΝ., 2005, ENVECO, 2011).

Στο γρανοδιορίτη, εξαιτίας της αποσάθρωσης κυρίως κατά μήκος των διακλάσεων και ρηγμάτων, αναπτύσσεται ένας αδρόκοκκος μανδύας που το πάχος κατά θέσεις μπορεί να ξεπερνά τα 10 m. Στη ζώνη αυτή και στις ζώνες ρηγμάτων αναπτύσσεται υπόγεια υδροφορία μικρού δυναμικού. Έτσι, μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες αναπτύσσονται μέσα στον αποσαθρωμένο μανδύα του γρανοδιορίτη και στις ζώνες τεκτονισμού. Η υδροφορία αυτή συνδέεται με την αντίστοιχη των προσχώσεων (ENVECO, 2011).

Όσον αφορά το μεταμορφωμένο σύστημα και συγκεκριμένα τα μάρμαρα, η κυκλοφορία του νερού ελέγχεται από τις παρεμβολές γνευσίων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και αμφιβολιτών. Η μικρή ανάπτυξη των μαρμάρων στην στις περιοχές, όπου οι ανωτέρω αδιαπέρατες παρεμβολές είναι έντονες, δεν επιτρέπει τη δημιουργία αξιόλογων εκτεταμένων καρστικών υδροφοριών, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη επιμέρους μικρών υδροφόρων συστημάτων, τα οποία εκφορτίζονται μέσω μικρών πηγών σε διαφορετικά υψόμετρα και στην επαφή τους με τις αδιαπέρατες παρεμβολές.

Όσον αφορά το υπόλοιπο μεταμορφωμένο σύστημα της νήσου, δηλαδή τους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, τους γνεύσιους, τους αμφιβολίτες, του μιγματίτη και των μικρών εμφανίσεων των βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων, αναπτύσσονται τοπικής μόνο σημασίας υπόγειες

υδροφορίες στις ζώνες έντονου κερματισμού, στις παρεμβολές μαρμάρων και στο μανδύα αποσάθρωσης τους.

Μετά από την αξιολόγηση των διάφορων υδροφόρων συστημάτων με κριτήριο την υδροαποθεματική τους ικανότητα, την εκμεταλλευσιμότητα, καθώς και την υδροχημική τους καταλληλότητα, στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται τα κυριότερα υδροφόρα συστήματα της νήσου Νάξου (Χαρμανίδης, 2002).

8.2.3.1 Ανθρακικό σύστημα Γαλανάδου - Βίβλου (Ντουμπακάδες)

Στο σύστημα αυτό περιλαμβάνονται 5 έως 6 υδροφόροι, διαμορφωμένοι σε αντίστοιχες ζωνώδεις εμφανίσεις μαρμάρων, που περιβάλλονται από σχιστόλιθους. Οι υδροφόροι αυτοί είναι μικρού σχετικά πάχους (5 m έως 15 m) και διατείνονται σε παραλληλίες, αποτελώντας μέρη μιας ευρύτερης συγκλινικής δομής, που βρίσκεται εφιππευμένη επί των γρανοδιοριτών του υποβάθρου.

Το σύστημα αυτό, που έχει μια σχετική μεγάλη επιφάνεια τροφοδοσίας, διατηρούσε σημαντικά αποθέματα νερού, τα οποία όμως λόγω ανόρυξης πολυάριθμων γεωτρήσεων και εκτέλεσης ανεξέλεγκτων αντλήσεων, έχουν εξαντληθεί. Αναφέρεται ότι ενώ το σύστημα αυτό των υδροφόρων διατηρούσε μια ενιαία περίπου υδροστατική στάθμη στα 15 m από την επιφάνεια του εδάφους το 1982, έφτασε να βρίσκεται η στάθμη στα 250 m το 1999. Αυτό σημαίνει ότι ήδη εξαντλούνται και τα γεωλογικά (μόνιμα) αποθέματα, γεγονός ιδιαίτερα δυσμενές από υδρογεωλογική και περιβαλλοντική άποψη.

8.2.3.2 Ανθρακικό σύστημα Μελάνων

Στο σύστημα αυτό, όπως και στο προαναφερόμενο, περιλαμβάνονται, υδροφορείς της μεταμορφωμένης σειράς (μάρμαρα), σε ζωνώδεις εμφανίσεις μικρού πάχους και αναπτύγματος, εγκλωβισμένων εντός του μιγματιτικού δόμου.

Η υδροφορία των διαδοχικών υδροφόρων συγκεντρώνεται μέσω των διακλάσεων και ρηγματώσεων του μιγματίτη στην πηγή Κούρος Μελάνων, η οποία είναι και η μεγαλύτερη του νησιού.

8.2.3.3 Ανθρακικό σύστημα Άη-Λιά

Πρόκειται για μια μεγάλη μάζα ασβεστιτικών και δολομιτικών μαρμάρων συγκλινικής δομής, η οποία αναπτύσσεται στα νοτιοδυτικά του οικισμού Δαμαριώνα. Από ερευνητική -

παραγωγική γεώτρηση, που έχει ανορυχθεί στον υδροφορέα αυτόν, έχει διαπιστωθεί ότι διατηρεί ένα πολύ αξιόλογο υδροφόρο, ίσως το σημαντικότερο της Νάξου, ο οποίος έχει μεγάλη υδροαποθεματική ικανότητα, την οποία οφείλει στις ευνοϊκές συνθήκες επανατροφοδοσίας του.

Συγκεκριμένα ο υδροφόρος αυτός, πέραν της τροφοδοσίας που δέχεται από την επιφανειακή απορροή, μεγάλης σχετικά έκτασης, δέχεται και την υπόγεια αποστράγγιση μεγάλων ανθρακικών μαζών, που βρίσκονται βόρεια και ανατολικά αυτού (περιοχές Χαλκείου και Δαμαριώνα).

8.2.3.4 Ανθρακικός υδροφορέας ασυνεχειών Φιλωτίου

Ο συγκεκριμένος υδροφόρος αναπτύσσεται σε μικρού πάχους και επιφανειακής εξάπλωσης ανθρακικών - δολομιτικών μαρμάρων, ΒΔ-Δ του οικισμού Φιλωτίου. Η δυναμικότητα του υδροφόρου κρίνεται ικανή για να καλύψει τις υδρευτικές ανάγκες του οικισμού, αλλά όχι επιδεκτική σε εντατικότερη εκμετάλλευση.

8.2.3.5 Προσχωματικός υδροφόρος Λιβαδίου

Πρόκειται για τον μεγαλύτερο προσχωματικό υδροφόρο ορίζοντα της Νάξου, τόσο σε έκταση, όσο και σε δυναμικότητα. Η εντατική του όμως εκμετάλλευση για αρδευτικούς σκοπούς τον έχει υποβαθμίσει έντονα ποιοτικά, τόσο σε αλμυρότητα, από τη διείσδυση της θάλασσας, όσο και σε θειικά και νιτρικά άλατα που προήλθαν από την κατάχρηση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων.

Στην επανατροφοδοσία του υδροφόρου, πρωτεύοντα ρόλο παίζει το ρέμα του Παράτρεχου, το οποίο αποστραγγίζει σχετικά ευρεία επιφάνεια και αφού διασχίσει την προσχωματική λεκάνη, μεγάλο μέρος του απορρέει στη θάλασσα.

8.2.3.6 Προσχωματικός υδροφόρος Γαλήνης - Εγγαρών

Ο υδροφόρος αυτός, αν και είναι μικρότερης ανάπτυξης και δυναμικότητας του προηγούμενου, είναι εξίσου σημαντικός, καθότι με την εκμετάλλευσή του εξασφαλίζονται αρδευτικές ανάγκες και εν μέρει οι υδρευτικές ανάγκες της Χώρας Νάξου.

Η ποιότητα του νερού του υδροφόρου, επιβαρυμένη κυρίως λόγω της επιρροής από τη θαλάσσια διείσδυση, δεν έχει υπερβεί κατά πολύ τα ανώτερα επιτρεπτά όρια ποσιμότητας. Το

γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ο υδροφόρος αυτός εμπλουτίζεται από τα ύδατα των πηγών Γαρινού και Σκουλικαριάς.

8.2.3.7 Άλλοι ανθρακικοί υδροφορείς ασυνεχειών

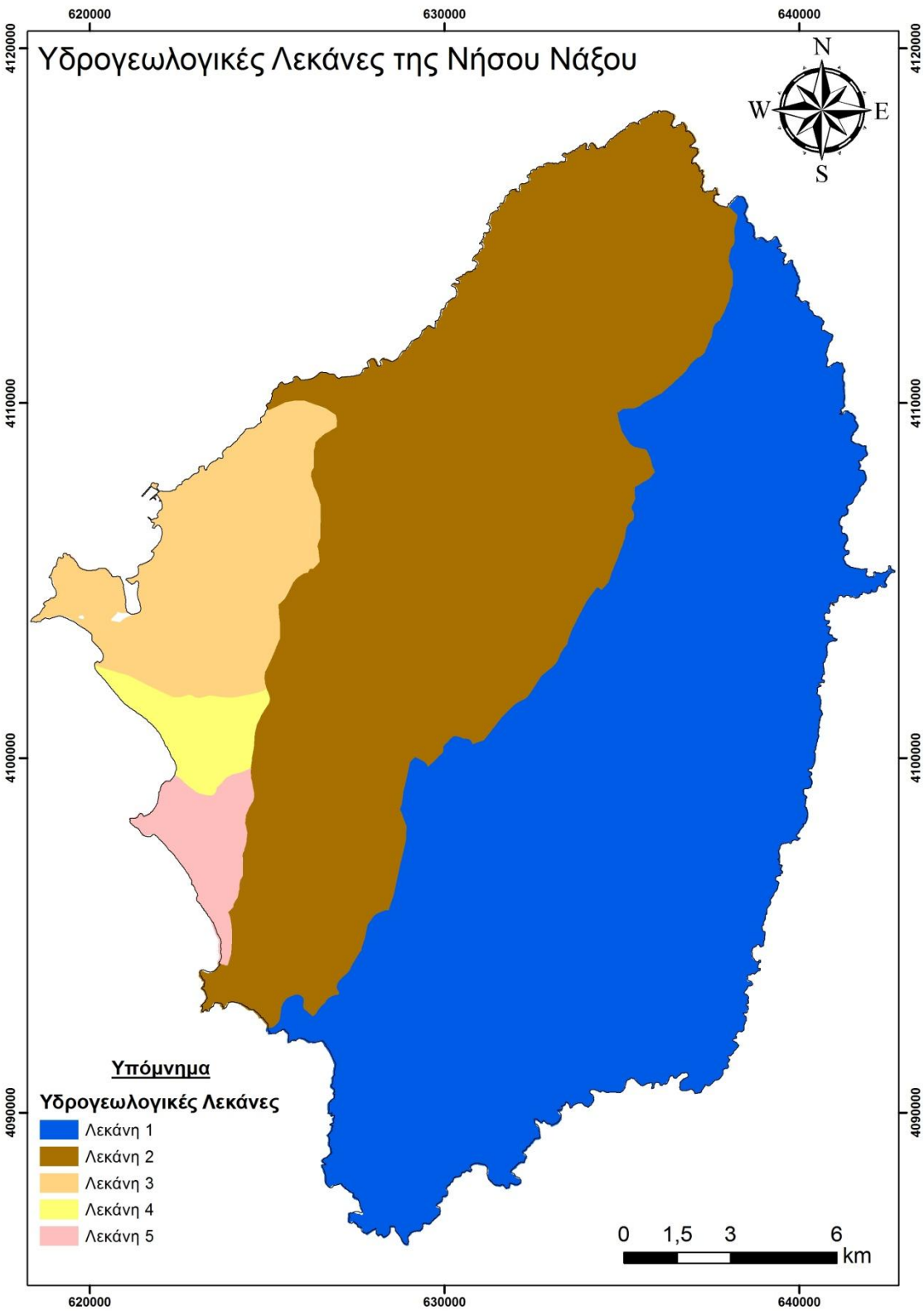
Πέραν των υδροφόρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, και άλλοι ανθρακικοί υδροφορείς ασυνεχειών αξιόλογης υδροδυναμικότητας, οι οποίοι εκδηλώνουν την υδροφορία τους με πηγές σημαντικής παροχής, όπως οι υδροφόροι των πηγών Εμπολή (Απόλλωνας), Γαρινός, Σκουληκαριά (Κινίδαρος), Δανακός και Χάσκα (Κορωνίδα).

8.2.4 Υπόγεια υδατικά συστήματα

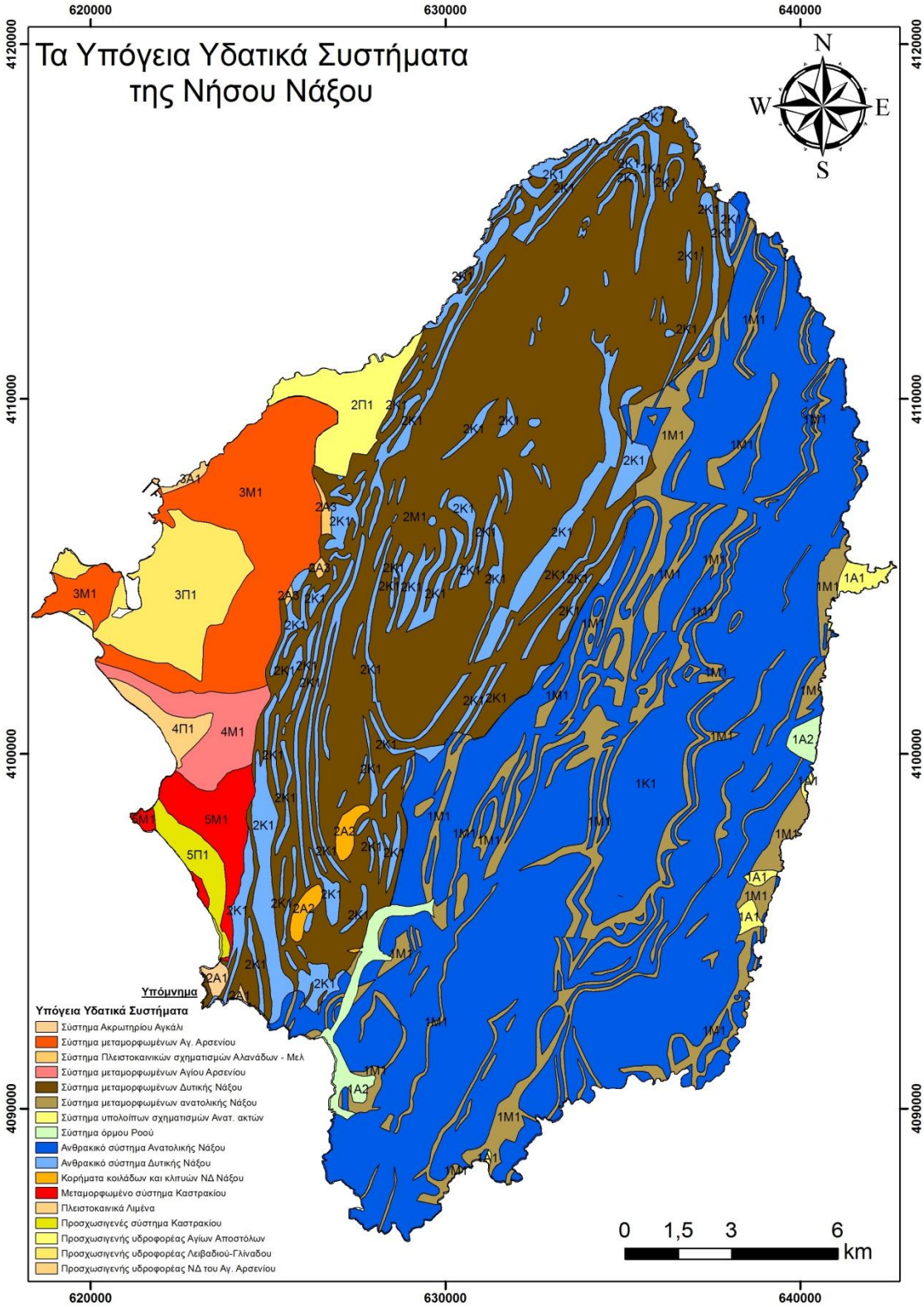
Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά της κάθε λιθολογίας που εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης, είναι δυνατόν να καθοριστούν υπόγεια υδατικά συστήματα με βάση τα γεωλογικά, τεκτονικά, υδρολιθολογικά, υδρογεωλογικά και χωρικά χαρακτηριστικά. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί συνολικά κατετάγησαν συνολικά σε 5 υδρογεωλογικές λεκάνες, οι οποίες απαρτίζονται από μικρότερα υπόγεια υδατικά συστήματα (Πίνακας 8.1, Εικόνα 8.2 & Εικόνα 8.3).

Πίνακας 8.1: Τα υπόγεια υδατικά συστήματα της νήσου Νάξου (ΥΠ.ΑΝ., 2005).

Υδρογεωλογική Λεκάνη	Υδατικά Συστήματα	Ονομασίες Υπόγειων Υδατικών Συστημάτων
1	1Α1	Σύστημα υπόλοιπων σχηματισμών ανατολικών ακτών
	1Α2	Σύστημα όρμου Ροού
	1Κ1	Ανθρακικό σύστημα Ανατολικής Νάξου
	1Μ1	Σύστημα μεταμορφωμένων ανατολικής Νάξου
2	2Α1	Σύστημα ακρωτηρίου Αγκάλι
	2Α2	Κορήματα κοιλάδων και κλιτύων ΝΔ Νάξου
	2Κ1	Ανθρακικό σύστημα Δυτικής Νάξου
	2Μ1	Σύστημα μεταμορφωμένων Δυτικής Νάξου
	2Α3	Σύστημα Πλειστοκαινικών σχηματισμών Αλανάδων - Μελάνων
	2Π1	Προσχωσιγενής υδροφορέας Αγ. Αποστόλων
3	3Α1	Πλειστοκαινικά Λιμένα
	3Μ1	Σύστημα μεταμορφωμένων Αγ. Αρσενίου
	3Π1	Προσχωσιγενής υδροφορέας Λιβαδιού - Γλινάδου
4	4Μ1	Σύστημα μεταμορφωμένων Αγ. Αρσενίου
	4Π1	Προσχωσιγενής υδροφορέας ΝΔ Αγ. Αρσενίου
5	5Μ1	Μεταμορφωμένο σύστημα Καστρακίου
	5Π1	Προσχωσιγενές σύστημα Καστρακίου



Εικόνα 8.2: Οι υδρογεωλογικές λεκάνες της νήσου Νάξου (ΥΠ.ΑΝ., 2005).



Εικόνα 8.3: Τα υπόγεια υδατικά συστήματα της νήσου Νάξου (ΥΠ.ΑΝ., 2005).

8.2.5 Πηγές της περιοχής μελέτης

Από βιβλιογραφικά δεδομένα και από τις εργασίες υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν, έχουν καταγραφεί συνολικά 334 πηγές στη νήσο Νάξο, οι οποίες όμως δεν έχουν μελετηθεί υδρογεωλογικά στο σύνολό τους (Υ.Ε.Β., 1986). Η έλλειψη μιας πλήρους μελέτης των πηγών της νήσου εμποδίζει μια περαιτέρω μελέτη με στόχο την αύξηση της παροχής τους και συλλογικής τους εκμετάλλευσης με διάφορα τεχνικά έργα, ειδικά στα μέτωπα των πηγών υπερπληρώσεως, όπου θα ήταν δυνατή η εκτέλεση γεωτρήσεων για την αξιοποίηση του βαθύτερου υπόγειου υδροφορέα στο πλαίσιο επαυξήσεως του υδατικού δυναμικού εκμεταλλεύσεως. Έτσι, μεγάλες ποσότητες νερού απορρέουν υπεδαφικά στα μέτωπα των πηγών, τα οποία θα μπορούσαν να είχαν εκμεταλλευτεί για τις ανάγκες του νησιού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στις περιοχές όπου επικρατεί εκτεταμένο σαθρό σχιστολιθικό κάλυμμα με έντονη φυτοκάλυψη.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των απογραφέντων πηγών είναι αποκλειστικά εποχιακής λειτουργίας και ασήμαντης παροχής, κυρίως στις μισγάγγειες των ρεμάτων, οι οποίες δεν λειτουργούσαν κατά την περίοδο της απογραφής και δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί επακριβώς η θέση τους, παρά μόνο με τη βοήθεια των κατοίκων και χαρτών από παλαιότερες απογραφές.

Όσον αφορά το μηχανισμό λειτουργίας των πηγών, διακρίνουμε πηγές επαφής σαθρού σχιστολιθικού ή γνευσιακού ή γρανοδιοριτικού καλύμματος με υποκείμενο συμπαγές πέτρωμα και πηγές επαφής στα μάρμαρα με υποκείμενο υδατοστεγή σχηματισμό (γνεύσιο ή σχιστόλιθο). Ειδικά στον ορίζοντα των μαρμάρων παρουσιάζονται κυρίως πηγές επαφής, είτε υπερπληρώσεως σε σχιστολιθικό ή γνευσιακό πέτρωμα. Καρστικές πηγές παρατηρούνται και στη ζώνη των ακτών, όπου απορρέουν στη θάλασσα μεγάλες ποσότητες νερού από την καθολική υδρομάστευση της ανθρακικής φάσεως (Χίλια Βρύση, όρμος Αμπράμ, κ.τ.λ.). Τέλος, στο σύστημα κατάκλασης των μαγματικών πετρωμάτων (γρανοδιορίτης), αλλά και του γνευσιακού ορίζοντα, εκεί όπου οι ασυνέχειες δεν έχουν επουλωθεί, παρατηρούνται εκλεκτικές συγκεντρώσεις νερού και αφίξεις στην επιφάνεια υπό μορφή πηγών.

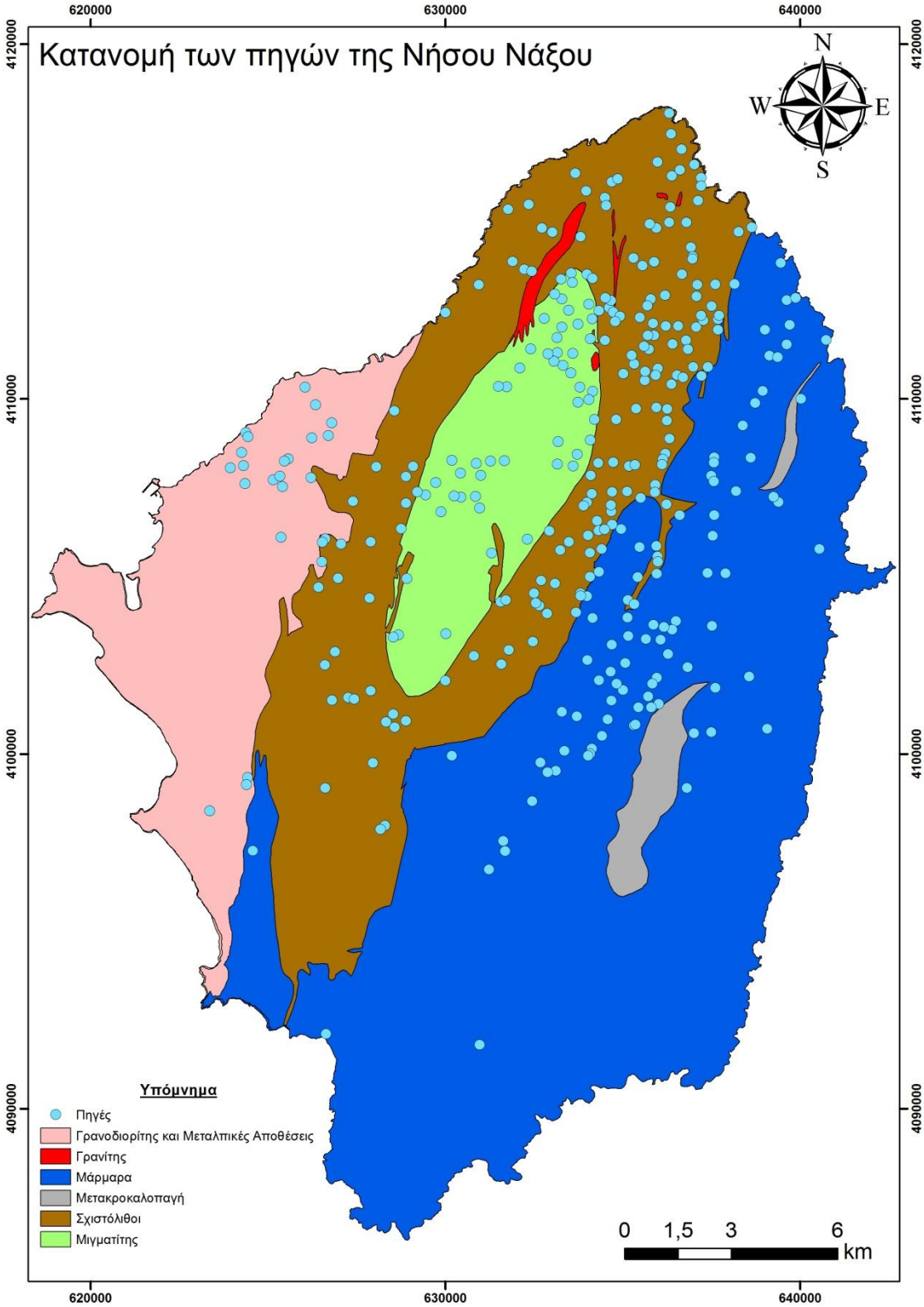
Όσον αφορά τη γεωγραφική κατανομή των πηγών, εμφανίζονται σχεδόν αποκλειστικά στο μεταμορφωμένο σύστημα και κυρίως στα κεντρικό και στο βόρειο τμήμα του νησιού, ενώ υπολογίστηκε και η σχετική συχνότητα εμφάνισης των πηγών ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογιας, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του ποσοστού των πηγών επί του συνόλου των πηγών προς το ποσοστό της έκτασης της κάθε υποπεριοχής επί της συνολικής έκτασης της περιοχής

μελέτης (Πίνακας 8.2, Εικόνα 8.4). Επίσης, οι πηγές εμφανίζουν συγκεντρώσεις σε κοινά μέτωπα με αποδέκτες τους χείμαρρους, από τα οποία τα κυριότερα είναι (Εικόνα 8.5):

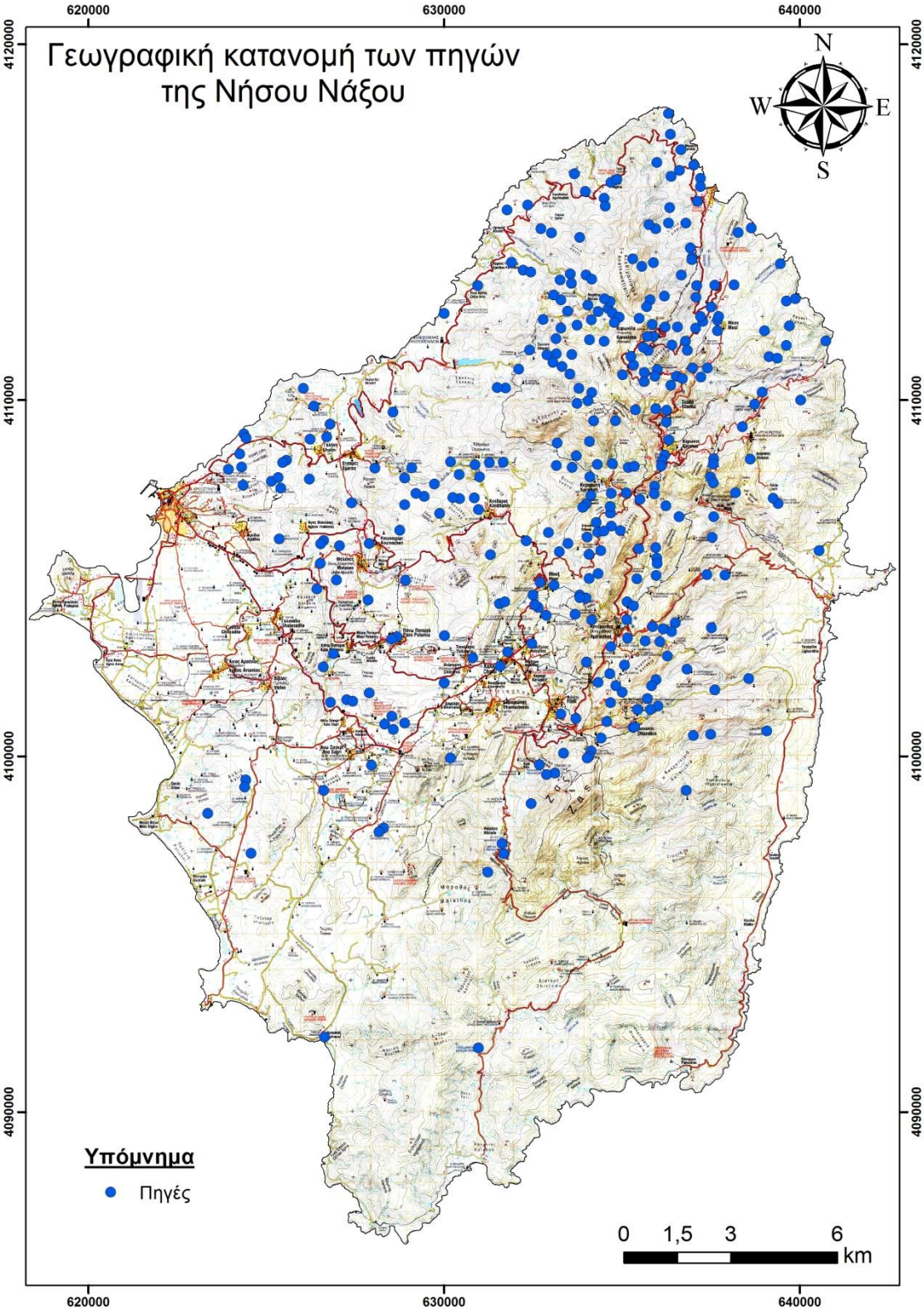
1. Το μέτωπο των πηγών της περιοχής Μυρίσης, οι οποίες έχουν κοινό αποδέκτη απορροής το ρέμα Μυλοπέραμα.
2. Το μέτωπο των πηγών περιοχής Σκεπόνι - Κουλούρες - Κόρωνος, που έχουν κοινό αποδέκτη απορροής το ρέμα Φανερωμένης (ρέμα Σκίνου).
3. Το μέτωπο των πηγών περιοχής Κεραμωτής, Παστελλά, Κινίδαρου, που έχουν κοινό αποδέκτη απορροής το ρέμα Γαρίνου.
4. Το μέτωπο των πηγών περιοχής Κανακαρίου - Κάτω Σαγκρίου με αποδέκτη απορροής ρέμα Ποταμός (χείμαρρος Ποταμιάς).

Πίνακας 8.2: Κατανομή και σχετική συχνότητα εμφάνισης των πηγών της νήσου Νάξου, ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.

Υποπεριοχή	Γεωλογικός Σχηματισμός	Αριθμός Πηγών	Σύνολο Πηγών	Σχετική Συχνότητα Πηγών (%)
Γρανοδιορίτης και Μεταλπικές Αποθέσεις	Γρανοδιορίτης	19	22	6,6
	Σχηματισμός με πυριτιόλιθους	1		
	Ψαμμίτες, μάργες και ασβεστόλιθοι	2		
Γρανίτης	Γρανίτης	0	0	0
Μάρμαρα	Μάρμαρα	90	91	27,2
	Συγκεκολημμένα κορήματα κοιλάδων και κλιτύων	1		
Μετακροκαλοπαγή	Μετακροκαλοπαγή	0	0	0
Μαρμαρυγιακοί Σχιστόλιθοι και Γνεύσιοι	Μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος	145	169	50,6
	Αμφιβολίτες	22		
	Μεταμορφωμένα υπερβασικά και γαββρικά πετρώματα	2		
Μιγματίτης	Μιγματίτης	51	52	15,6
	Μεταμορφωμένα υπερβασικά και γαββρικά πετρώματα	1		



Εικόνα 8.4: Κατανομή των πηγών της νήσου Νάξου ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.

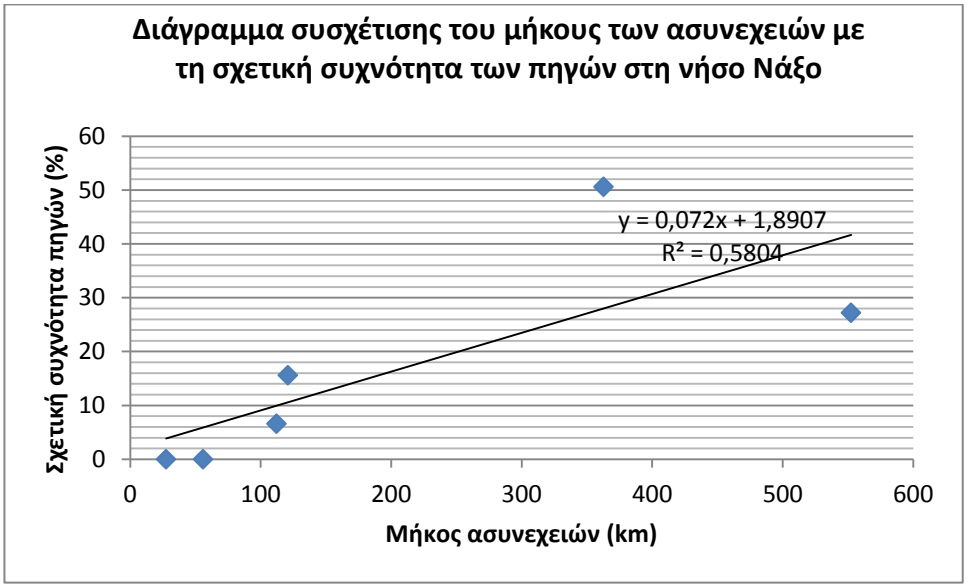


Εικόνα 8.5: Γεωγραφική κατανομή των πηγών της νήσου Νάξου, όπου διακρίνονται πάνω στον τοπογραφικό χάρτη τα κύρια μέτωπα αυτών.

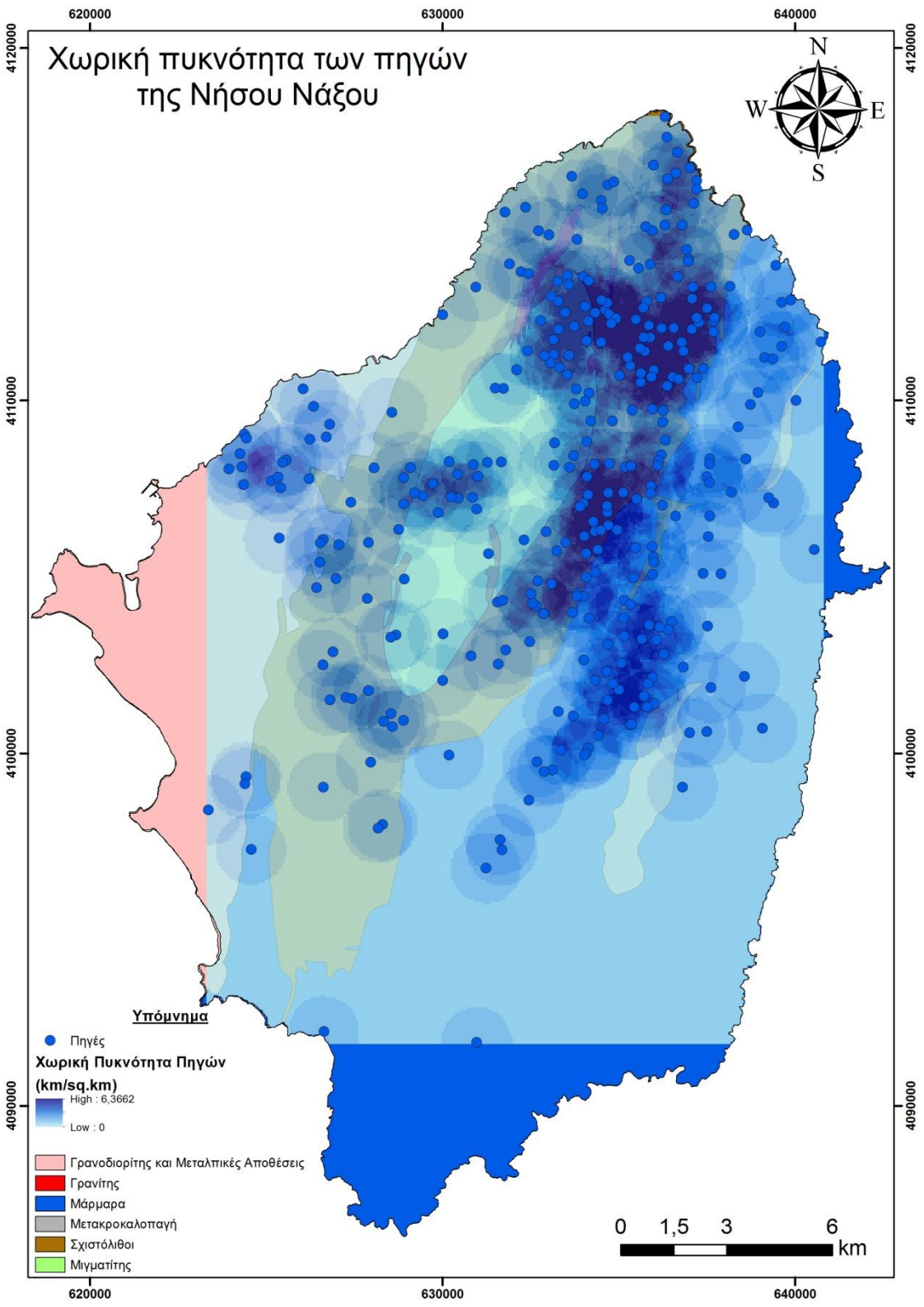
Έχοντας υπολογίσει την επί τοις εκατό σχετική συχνότητα των πηγών σε κάθε υποπεριοχή της νήσου, είναι δυνατό να συσχετιστεί η χωρική κατανομή των πηγών με το μέσο ασυνεχειών, καθώς σύμφωνα με τον Πίνακα 8.3 και το διάγραμμα της Εικόνας 8.6, όσο αυξάνεται το αθροιστικό μήκος των ασυνεχειών, και όσο μειώνεται το αθροιστικό μήκος των ασυνεχειών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο αντίστοιχα, τόσο αυξάνεται και η σχετική συχνότητα. Ο συντελεστής συσχέτισης στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά μεγάλος (r=0,762), γεγονός που υποδεικνύει τη διασύνδεση μεταξύ του αριθμού των πηγών και του συνολικού μήκος των ασυνεχειών σε κάθε υποπεριοχή. Επίσης κατασκευάζοντας το χάρτη συσχέτισης της χωρικής πυκνότητας των πηγών αναλόγως της κύριας λιθολογίας, προκύπτει ότι στις λιθολογίες όπου η σχετική συχνότητα πηγών είναι υψηλή, η χωρική πυκνότητα των πηγών είναι επίσης υψηλή (Εικόνα 8.7).

Πίνακας 8.3: Μήκος των ασυνεχειών και σχετική συχνότητα των πηγών της νήσου Νάξου, ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας.

Λιθολογία	Μήκος ασυνεχειών (km)	Μήκος ασυνεχειών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (km^{-1})	Σχετική συχνότητα πηγών (%)
Μάρμαρα	552,36	2,66	27,2
Μαρμαρυγιακοί Σχιστόλιθοι και Γνεύσιοι	362,75	3,09	50,6
Μιγματίτης	120,82	3,38	15,6
Γρανοδιορίτης και Μεταλπικές Αποθέσεις	112,12	1,86	6,6
Μετακροκαλοπαγές	55,83	7,75	0
Γρανίτης	27,47	7,42	0

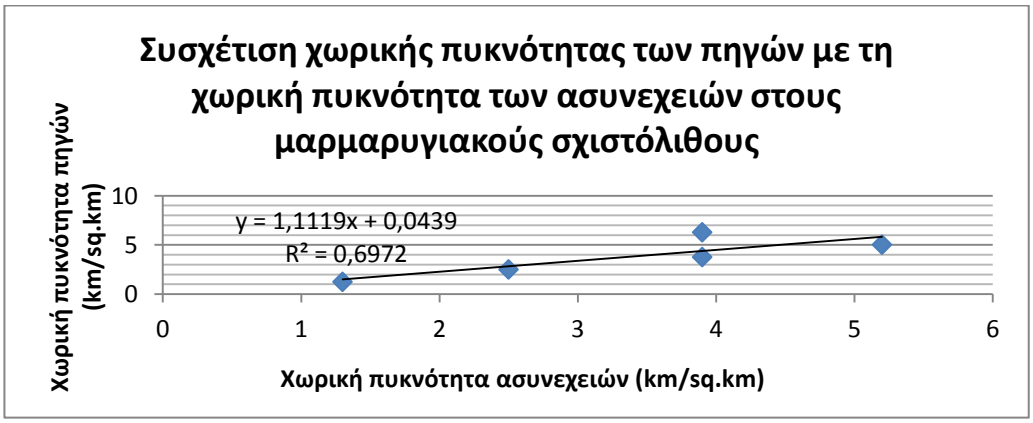


Εικόνα 8.6: Διάγραμμα συσχέτισης του μήκους των ασυνεχειών με τη σχετική συχνότητα των πηγών, ανά υποπεριοχή κύριας λιθολογίας στη νήσο Νάξο.

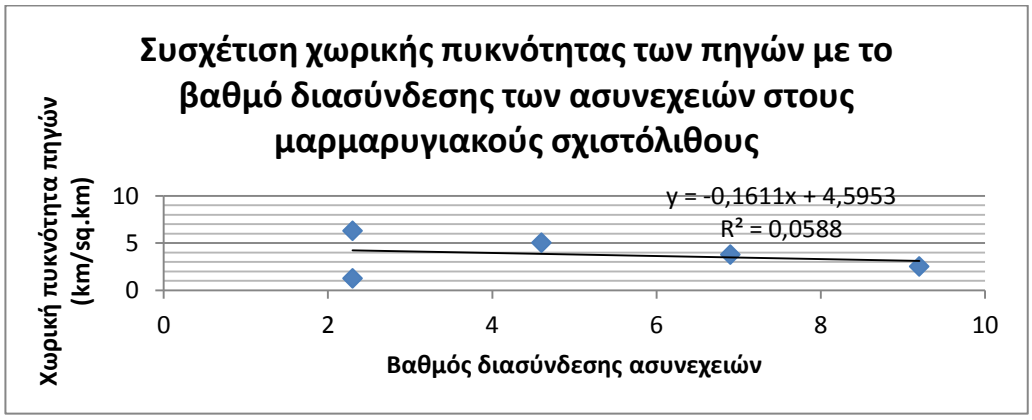


Εικόνα 8.7: Χάρτης συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με την κύρια λιθολογία της νήσου Νάξου.

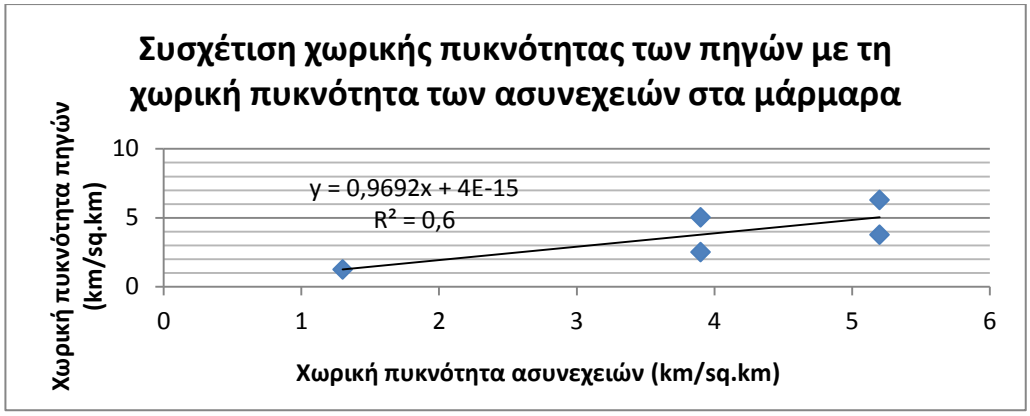
Ακόμη, κατασκευάστηκαν διαγράμματα συσχέτισης της χωρικής πυκνότητας και του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών για τις λιθολογίες που εμφανίζουν πηγές, δηλαδή τους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, τα μάρμαρα, το μιγματίτη και το γρανοδιορίτη. Από τα διαγράμματα αυτά (Εικόνες 8.8 - 8.15), προκύπτει ότι σε όλες τις λιθολογίες ο συντελεστής συσχέτισης της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των πηγών είναι αρκετά υψηλός, γεγονός που υποδεικνύει τη στενή σχέση μεταξύ των παραγόντων αυτών και, πιο συγκεκριμένα, ότι όσο αυξάνεται η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, τόσο αυξάνεται και η χωρική πυκνότητα των πηγών. Επίσης παρατηρείται ότι ο συντελεστής συσχέτισης του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών με τη χωρική πυκνότητα είναι πολύ μικρός, γεγονός που σημαίνει ότι αυτοί οι παράγοντες δεν σχετίζονται μεταξύ τους.



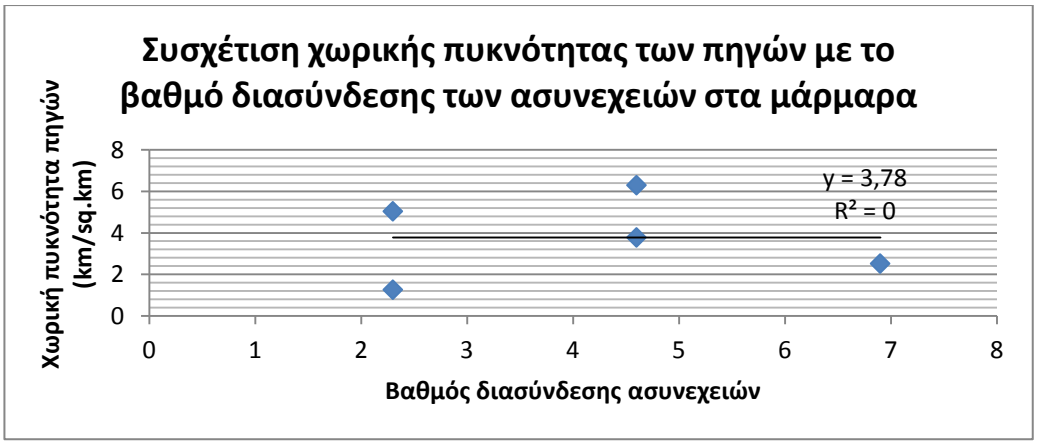
Εικόνα 8.8: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.



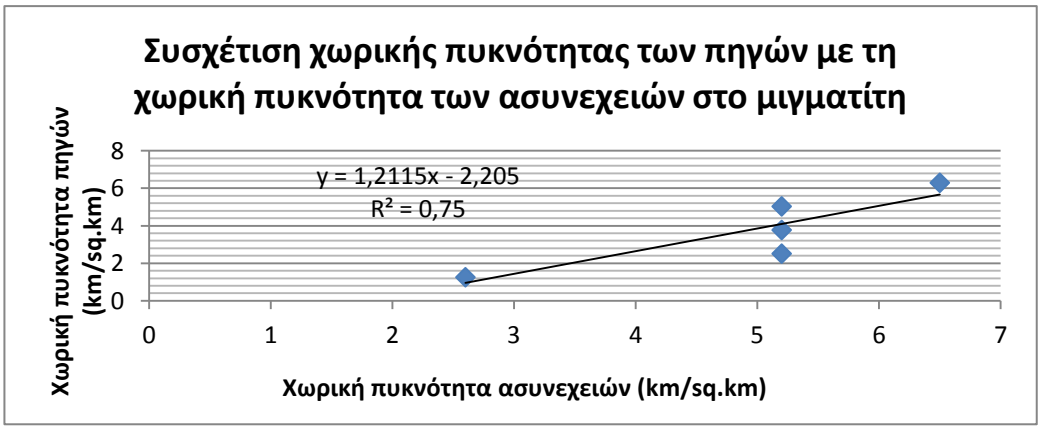
Εικόνα 8.9: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.



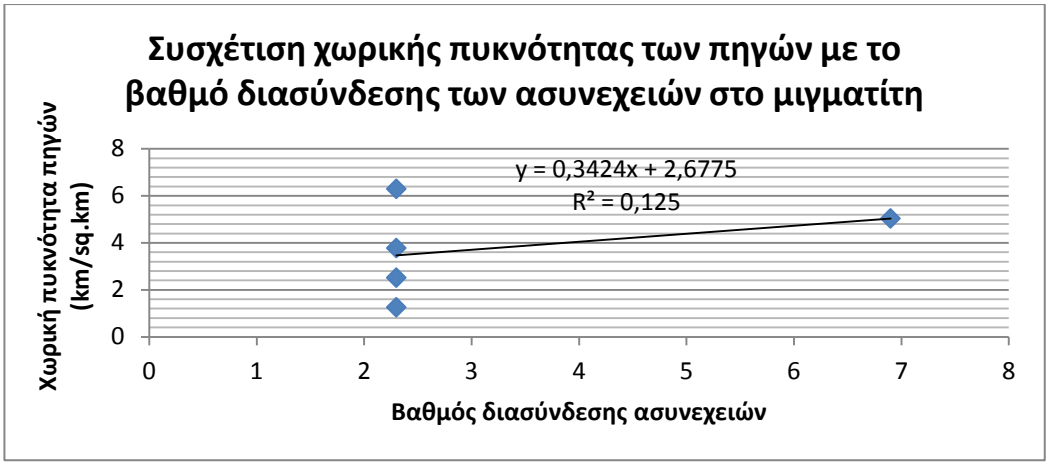
Εικόνα 8.10: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στα μάρμαρα.



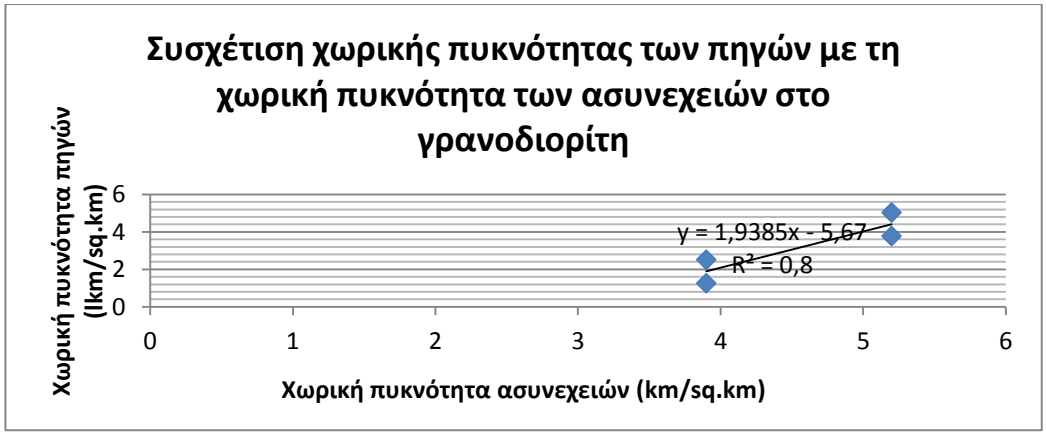
Εικόνα 8.11: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στα μάρμαρα.



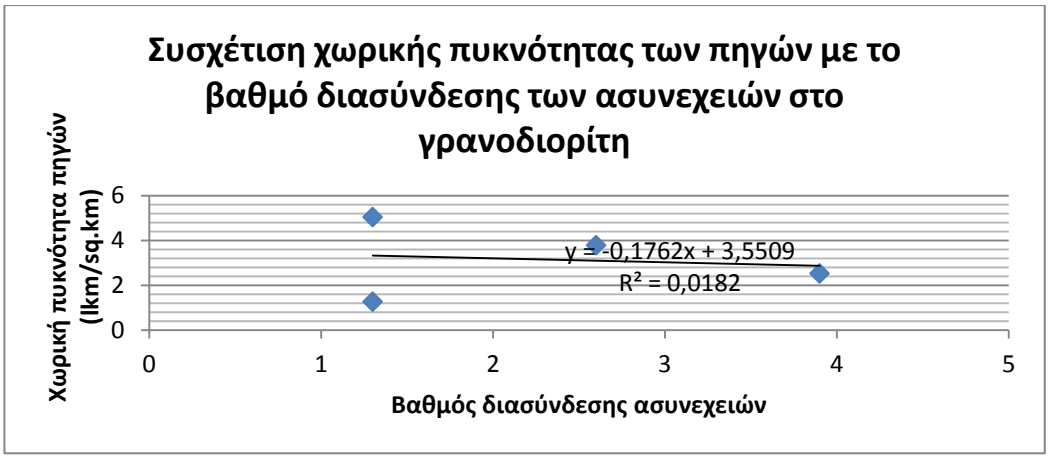
Εικόνα 8.12: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στο μιγματίτη.



Εικόνα 8.13: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στο μιγματίτη.



Εικόνα 8.14: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στο γρανοδιορίτη.

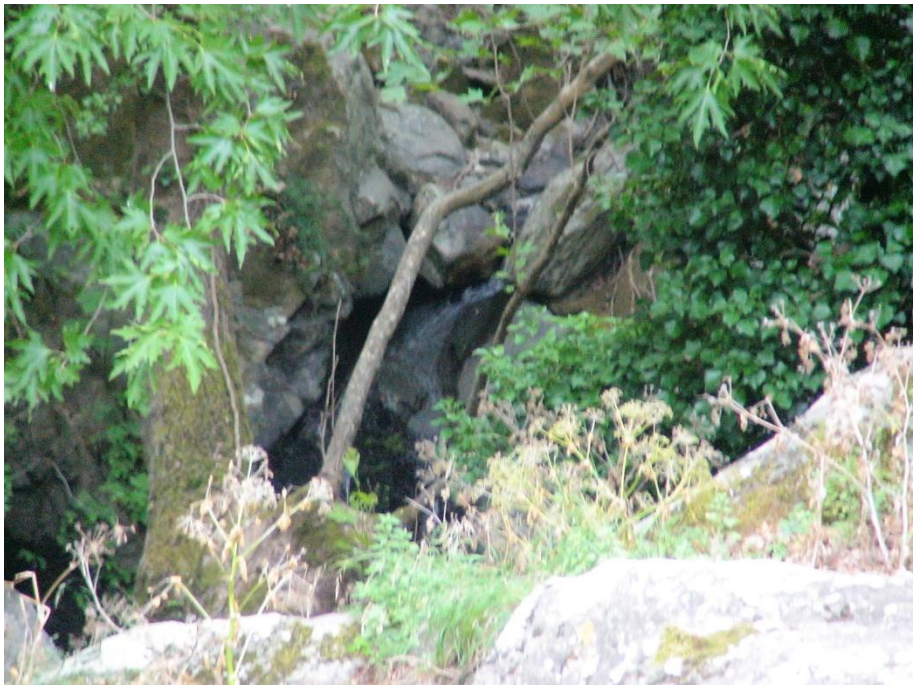


Εικόνα 8.15: Διάγραμμα συσχέτισης χωρικής πυκνότητας πηγών με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών στο γρανοδιορίτη.

Όμως, παρά την άμεση σχέση των πηγών με το μέσο ασυνεχειών, κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου, παρατηρήθηκε ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό αναβλύζει κατευθείαν από κάποια ασυνέχεια. Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι πηγές απογράφτηκαν σε περιοχές με έντονη βλάστηση, σε σημεία που αποτελούσαν βρύσες ή σε σημεία στα οποία το νερό κατέληγε σε μεγάλους συλλεκτήρες μέσω ευθύγραμμων καναλιών ή σωλήνων (πηγές μετατοπισμένες) (Εικόνες 8.16 - 8.19).

Εικόνα 8.16: Πηγή «Εμπολή» στην περιοχή του Απόλλωνα, όπου το νερό αναβλύζει μέσα από μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και συλλέγεται απευθείας, με σκοπό την εκμετάλλευσή του.

Εικόνα 8.17: Πηγή του όρους Ζας, όπου στο σημείο που το νερό αναβλύζει έχει κατασκευαστεί βρύση.



Εικόνα 8.18: Πηγή στην περιοχή της Κορωνίδας, όπου το νερό αναβλύζει μέσα από αμφιβολίτες, σε περιοχή όπου η βλάστηση είναι έντονη.

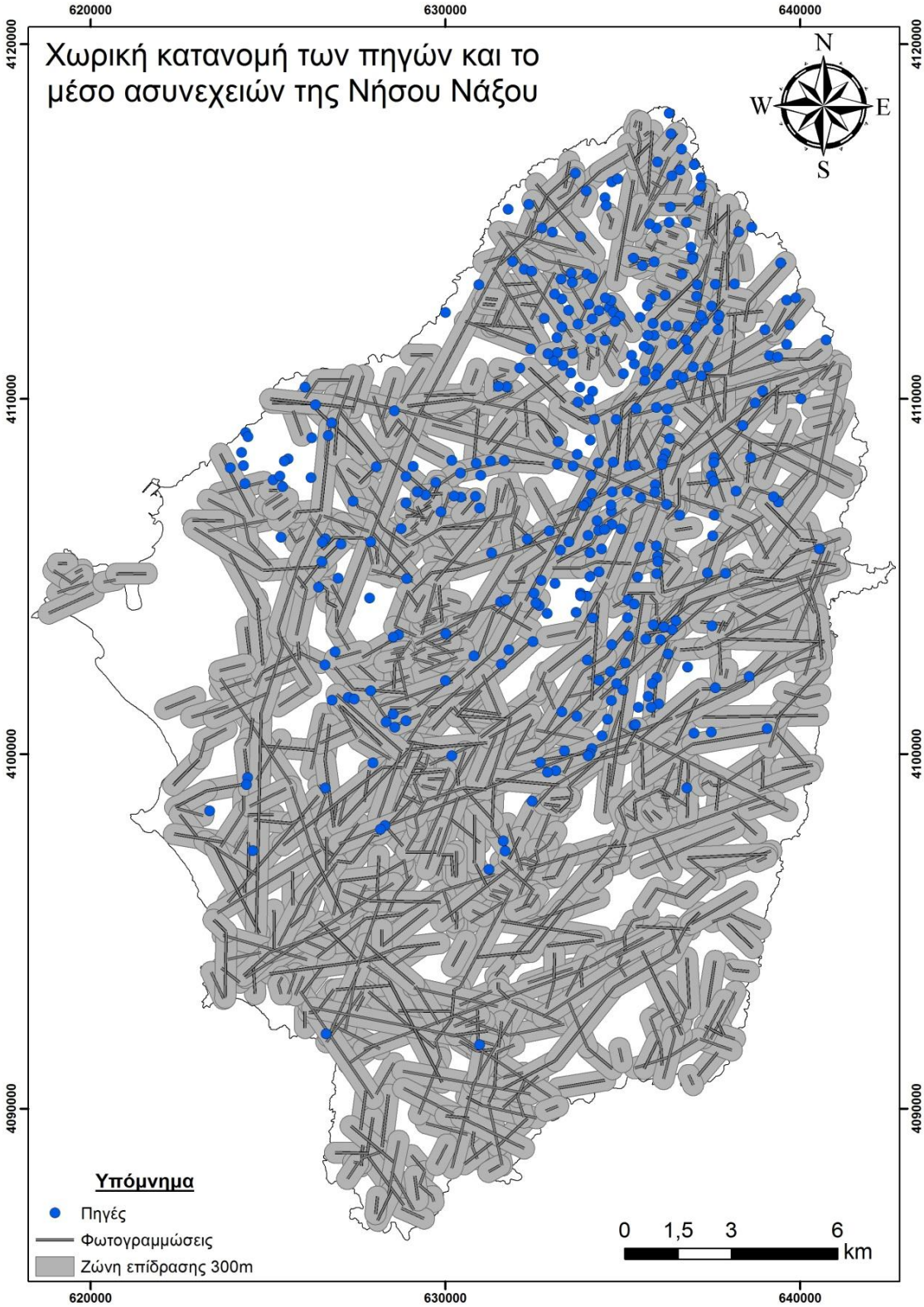
Εικόνα 8.19: Πηγή στην περιοχή του Μυρίση, όπου το νερό αναβλύζει μέσα από το μιγματίτη, σε περιοχή όπου παρατηρείται έντονη βλάστηση.

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η παραπάνω παρατήρηση, αλλά και για να ελεγχθεί η χωρική κατανομή των πηγών σε σχέση με την αντίστοιχη απόστασή τους από τις ασυνέχειες, ορίστηκαν ζώνες γύρω από κάθε ασυνέχεια (buffer zones), με ελάχιστη απόσταση 30 m γύρω από κάθε ασυνέχεια και μέγιστη απόσταση 630 m γύρω από κάθε ασυνέχεια, ώστε να είναι εφικτή μια όσο το δυνατόν πιο πλήρης παρουσίαση της χωρικής κατανομής των πηγών σε σχέση με το μέσο ασυνεχειών (Εικόνα 8.20).

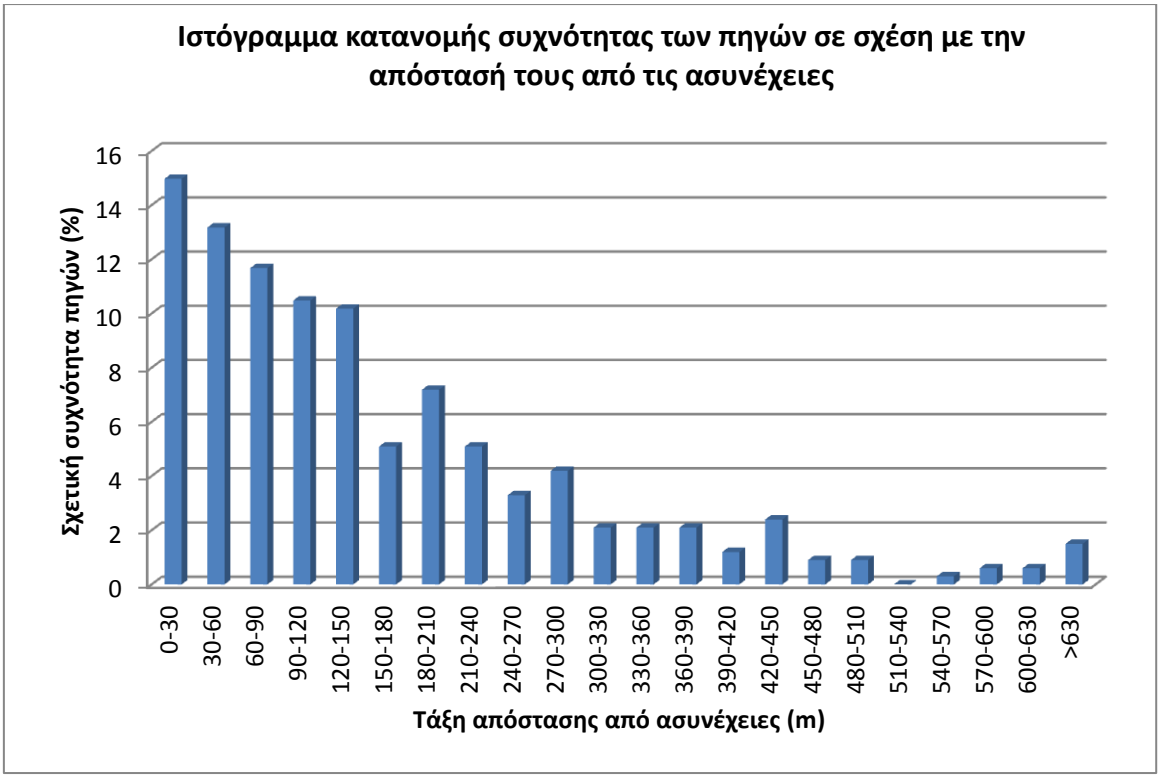
Στη συνέχεια υπολογίστηκε η σχετική συχνότητα των πηγών σε κάθε τάξη απόστασης με σκοπό την κατασκευή ιστογράμματος κατανομής (Εικόνα 8.21), προκειμένου να απεικονιστεί η μεταβολή του αριθμού των πηγών ανά τάξη απόστασης. Από το συγκεκριμένο ιστόγραμμα κατανομής προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από τις ασυνέχειες, τόσο η σχετική συχνότητα των πηγών μειώνεται, δηλαδή τόσο μειώνεται η εμφάνιση πηγών στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, το 60,5% των πηγών της περιοχής μελέτης βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 150 m από τις ασυνέχειες, όπου η απόσταση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνει με σχετική βεβαιότητα ότι οι πηγές αυτές μπορούν να οφείλουν την ύπαρξή της στις παρακείμενες ασυνέχειες (Μποτσιαλάς, 2007). Ακόμη, το 85,33% των πηγών βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 300 m, ενώ μόλις το 2,1% των πηγών βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 600 m, γεγονός που υποδεικνύει ότι ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό των πηγών σχετίζεται με το μέσο ασυνεχειών.

Όμως, εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, το γεγονός ότι μόνο το 60,5% των πηγών βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 150 m από τις παρακείμενες ασυνέχειες, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι οι υπόλοιπες πηγές είναι ανεξάρτητες από το μέσο ασυνεχειών, καθώς είναι σύνηθες φαινόμενο, το νερό να κινείται κατά μήκος του αποσαθρωμένου μανδύα και, ακολουθώντας τις τοπογραφικές κλίσεις, να εξέρχεται όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι αυξανομένου της απόστασης από τις ασυνέχειες, ο βαθμός αβεβαιότητας μεγαλώνει.

Ένα άλλο κριτήριο, το οποίο υποδεικνύει ότι ένα μεγάλο ποσοστό των πηγών σχετίζεται με το μέσο ασυνεχειών είναι η χωρική κατανομή των πηγών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών. Από το χάρτη της εικόνας 8.22 είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των πηγών της περιοχής μελέτης βρίσκεται σε περιοχές μέσης ή υψηλής χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών, ή ακόμα βρίσκεται σε περιοχές όπου ενώ χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές χωρικής πυκνότητας, περικλείονται από περιοχές όπου οι τιμές της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών είναι ιδιαίτερα υψηλές.



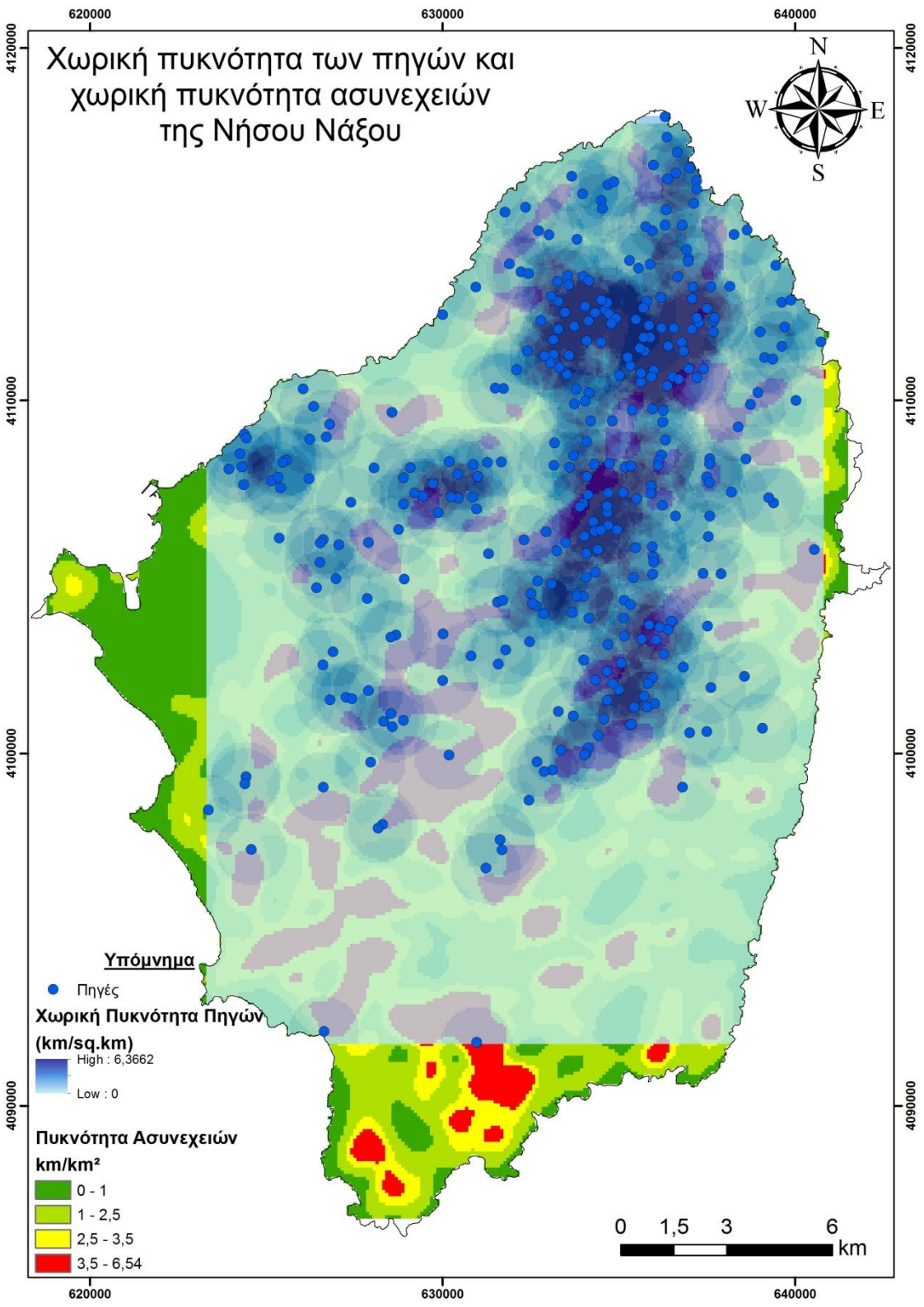
Εικόνα 8.20: Χάρτης χωρικής κατανομής των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες στη νήσο Νάξο. Στο συγκεκριμένο χάρτη, η ζώνη επίδρασης έχει οριστεί στα 300 m.



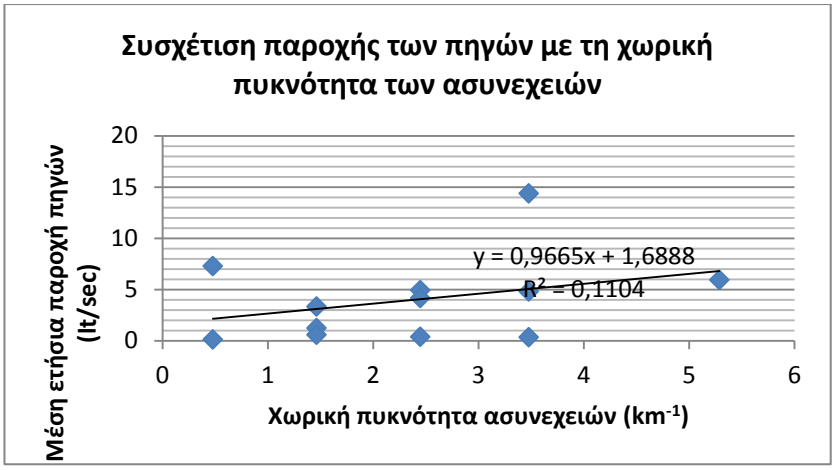
Εικόνα 8.21: Ιστόγραμμα κατανομής της σχετικής συχνότητας των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες στη νήσο Νάξο.

Ένα τελευταίο κριτήριο που μπορεί να υποδείξει επίσης την άμεση σχέση των πηγών με το μέσο ασυνεχειών είναι η συσχέτιση της παροχής των πηγών με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες και με τις τιμές τις χωρικής πυκνότητας και του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών των περιοχών των πηγών. Για τις συσχετίσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές των πηγών που μετρήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε. κατά τη διάρκεια υδρογεωλογικής έρευνας του Νοτίου Αιγαίου (Κυκλάδες - Δωδεκάνησα), η οποία εκπονήθηκε κατά το Β΄ Κ.Π.Σ. το 2002 και στις οποίες έγιναν μετρήσεις παροχής για ένα έτος (Γιαννουλόπουλος & Λάππας, 2010).

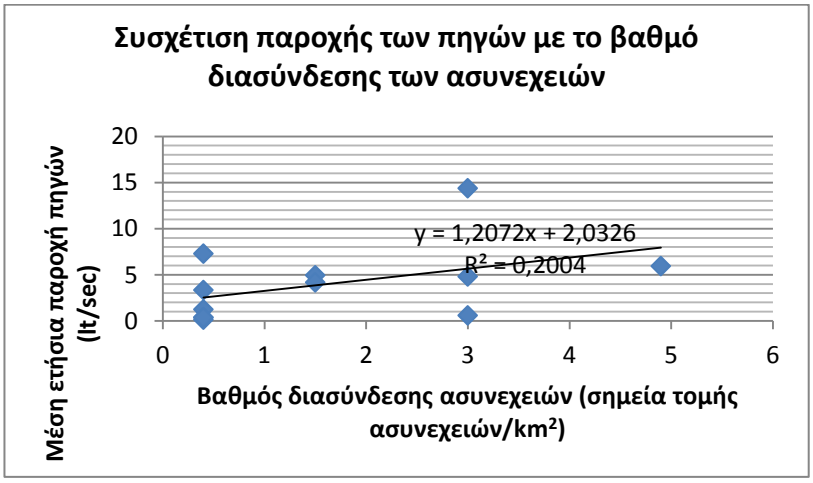
Από τα διαγράμματα των εικόνων 8.23, 8.24 και 8.25, είναι σαφής η άμεση σχέση των παροχών των πηγών και του μέσου ασυνεχειών. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η χωρική πυκνότητα και ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών, αυξάνεται και η παροχή των πηγών, ενώ αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η απόσταση των πηγών από τις ασυνέχειες, τόσο μειώνεται η παροχή τους. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι σχετικά χαμηλός και στα τρία διαγράμματα, αλλά πιθανότατα οφείλεται στον μικρό αριθμό των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων αυτών, καθώς πρόκειται για μόλις 12 πηγές από τις 334 που εμφανίζονται στο νησί.



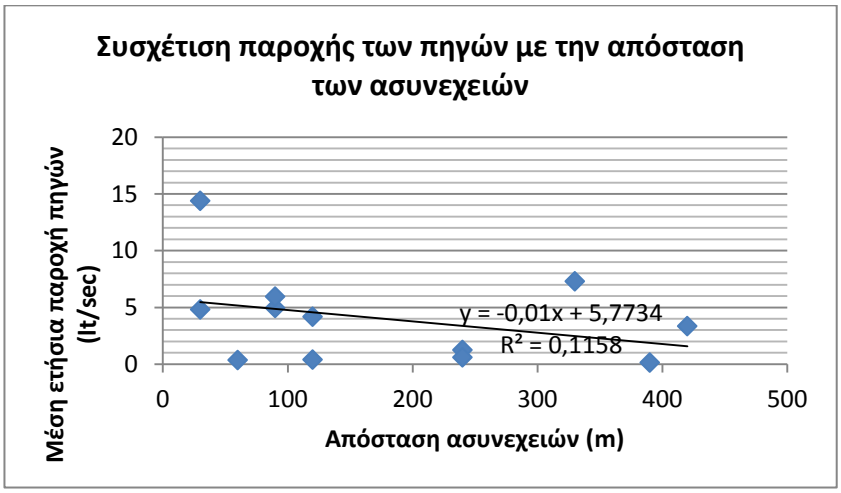
Εικόνα 8.22: Χάρτης συσχέτισης της χωρικής πυκνότητας των πηγών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών στη νήσο Νάξο.



Εικόνα 8.23: Διάγραμμα συσχέτισης της παροχής των πηγών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών.



Εικόνα 8.24: Διάγραμμα συσχέτισης της παροχής των πηγών σε σχέση με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών.



Εικόνα 8.25: Διάγραμμα συσχέτισης της παροχής των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες.

8.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΖΩΝΩΝ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ ΥΔΑΤΩΝ

8.3.1 Εισαγωγή

Τα υπόγεια ύδατα θεωρούνται ως δυναμικός και ανανεώσιμος φυσικός πόρος, αλλά στα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα η διαθεσιμότητά τους είναι περιορισμένη. Αν και παρατηρείται ότι τα σκληρά πετρώματα συχνά έχουν χαμηλή διαπερατότητα, μπορούν να φιλοξενήσουν σημαντική ποσότητα υπόγειου ύδατος (Singhal & Gupta, 2010), καθώς το καθεστώς της ροής των υπογείων υδάτων στην περίπτωση αυτή εξαρτάται κυρίως από διάφορους παράγοντες του μέσου ασυνεχειών, συμπεριλαμβανομένης της πυκνότητας και του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών (Stournaras et al., 2003, Botsialas et al., 2005). Η εξερεύνηση και η αξιοποίηση των υπόγειων υδάτων, ιδίως σε σκληρά διερρηγμένα πετρώματα, απαιτεί την κατανόηση σε βάθος της γεωλογίας, της γεωμορφολογίας και των φωτογραμμώσεων της περιοχής, καθώς ελέγχουν άμεσα ή έμμεσα τα χαρακτηριστικά του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κυκλοφορία του νερού στο δίκτυο των ασυνεχειών είναι καλή, ενώ το πρόβλημα είναι ο βαθμός δυσκολίας της τροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα, αφού, για να γίνει, χρειάζονται ασυνέχειες, γυμνές ή καλυμμένες από το εδαφικό κάλυμμα, κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες, με κλίση κατά τη ροή του επιφανειακού ή υποδερμικού νερού.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωφυσικές, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν να εντοπιστούν και να χαρτογραφηθούν τα διαθέσιμα αποθέματα των υπόγειων υδάτων. Όμως, πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στις μεθόδους τηλεπισκόπησης και σε τεχνικές σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, καθώς παρέχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως την κάλυψη μεγάλων εκτάσεων, ακόμα και δυσπρόσιτων, ενώ αποτελεί συγχρόνως έναν αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο χαρτογράφησης των φυσικών πόρων, με καλύτερα αποτελέσματα από ότι χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους. Χρησιμοποιώντας τηλεπισκοπικά δεδομένα που καλύπτουν μια χρονική περίοδο, είναι δυνατή η ταυτοποίηση των υπόγειων υδροφορέων και η αξιολόγηση των αλλαγών τους, όπου τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών επιτρέπουν τη διαχείριση και την επεξεργασία των πολυθεματικών δεδομένων (Vijith, 2007, Prasad et al., 2008).

Η παρούσα μελέτη εστιάζει εκτός των άλλων στον εντοπισμό ζωνών ύπαρξης των υπογείων υδάτων στο μέσο ασυνεχειών της νήσου Νάξου, χρησιμοποιώντας την προηγμένη τεχνολογία της τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Οι υδάτινοι πόροι στο νησί της Νάξου, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, είναι εξαιρετικά περιορισμένοι. Το

επιφανειακό νερό είναι διαθέσιμο μόνο για λίγες ημέρες, μετά από έντονες βροχοπτώσεις, και οι ανάγκες σε νερό εκπληρώνονται κυρίως από τους υπόγειους υδάτινους πόρους. Ωστόσο, οι υπόγειοι υδάτινοι πόροι είναι περιορισμένοι, λόγω φυσικών και ανθρωπογενών αιτιών, όπως το κλίμα, τη ρύπανση και την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, η μικρή υδατοχωρητικότητα των γεωλογικών σχηματισμών, τις υψηλές μορφολογικές κλίσεις και τη χαμηλή βλάστηση (Παρτσινέβελου, 2012).

8.3.2 Μεθοδολογία

Προκειμένου να καθοριστούν οι ζώνες αυξημένης κατείσδυσης των υπόγειων υδάτων στη νήσο Νάξο, μια ομάδα παραγόντων ορίστηκαν και κατασκευάστηκαν για καθένα από αυτούς θεματικοί χάρτες, οι οποίοι επαληθεύτηκαν στην ύπαιθρο. Οι παράγοντες που έχουν ορίστηκαν για τη αυτή μελέτη ήταν (Partsinevelou & Stournaras, 2014, 2015):

α) Η επί τοις εκατό τοπογραφική κλίση.

β) Η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών.

γ) Η υδρολιθολογία της περιοχής έρευνας.

δ) Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου.

ε) Οι χρήσεις γης της περιοχής έρευνας

Η επιλογή των συγκεκριμένων παραγόντων έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά του μέσου ασυνεχειών που υποδεικνύουν υψηλή ικανότητα κατείσδυσης και εναποθηκευτικότητας. Οι παράγοντες χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες, από τη χαμηλή (δείκτης 0) έως υψηλή ικανότητα κατείσδυσης του νερού (δείκτης 3) και σταθμίστηκαν σύμφωνα με την αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης (AHP - Analytic Hierarchy Process), η οποία προτάθηκε από τον Saaty (1977). Η Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης αποτελεί μια πολύ γνωστή και άριστη μέθοδο υπολογισμού συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων, η οποία βοηθά στη λήψη υποκειμενικών και αντικειμενικών μέτρων αξιολόγησης. Αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο μέσο για τον έλεγχο της ορθότητας των μέτρων αυτών αλλά και των εναλλακτικών λύσεων που προτείνονται, μειώνοντας σημαντικά το ποσοστό λάθους.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει συγκρίσεις κατά ζεύγη και δημιουργεί έναν πίνακα λόγων. Παίρνει ως δεδομένα εισόδου τις συγκρίσεις κατά ζεύγη και παράγει τα σχετικά βάρη (συντελεστές βαρύτητας). Συγκεκριμένα, τα βάρη καθορίζονται με την κανονικοποίηση του ιδιοδιανύσματος που συνδέεται με τη μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα των αντίστροφων λόγων. Η

εύρεση των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων πραγματοποιείται από τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τιμών και ανυσμάτων ενός τετραγωνικού πίνακα διαστάσεων n x n, όπου n ο αριθμός των κριτηρίων που εξετάζονται, στον οποίο περιέχεται ποσοτικοποιημένη πληροφορία για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ζυγών των εξεταζόμενων κριτηρίων (Πίνακας 8.4).

Πίνακας 8.4: Πίνακας σύγκρισης των κριτηρίων κατά ζεύγη μέσω της AHP (Saaty & Vargas, 1984, Saaty & Hu, 1997).

A =

	A_1	A_2	…	A_n
A_1	$a_{11}=w_1/w_1$	$a_{12}=w_1/w_2$	…	$a_{1n}=w_1/w_n$
A_2	$a_{21}=w_2/w_1$	$a_{22}=w_2/w_2$	…	$a_{2n}=w_2/w_n$
⋮	⋮	⋮		⋮
A_n	$a_{n1}=w_n/w_1$	$a_{n2}=w_n/w_2$	…	$a_{nn}=w_n/w_n$

Όπου w_i: το βάρος του κάθε κριτηρίου με $i=1,\ldots,n$
a_{ij}: το κάθε στοιχείο του πίνακα ίσο με w_i/w_j
n: ο αριθμός των κριτηρίων

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, πραγματοποιείται η κατά ζεύγη σύγκριση των κριτηρίων τα οποία έχουν επιλεγεί. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η βαρύτητα του κάθε κριτηρίου σε σχέση με το κάθε ένα από τα υπόλοιπα.

Η σχέση του κάθε κριτηρίου εκφράζεται μέσω αριθμητικών τιμών που δίνονται κάθε φορά και εισάγονται ως στοιχεία στον Πίνακα 8.4. Οι τιμές αυτές δεν είναι αυθαίρετες, ακολουθούν μια συγκεκριμένη κλίμακα μεγεθών. Αυτή η κλίμακα σύγκρισης των τιμών προτάθηκε από τους Saaty (1977) και Saaty & Vargas (1984) και κυμαίνεται από την τιμή 1 έως την τιμή 9. Η τιμή 1 εκφράζει κριτήρια ίσης σπουδαιότητας, ενώ στο άλλο άκρο της κλίμακας, η τιμή 9 αντιπροσωπεύει κριτήρια τα οποία έχουν εξαιρετική σπουδαιότητα σε σχέση με εκείνα που συγκρίνονται κάθε φορά (Πίνακας 8.5).

Πίνακας 8.5: Κλίμακα αριθμητικών τιμών βαρύτητας κριτηρίων (Saaty, 1977, Saaty & Vargas, 1984).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Εξαιρετικά	Πάρα πολύ	Πολύ	Μέτρια	Ίσης Σπουδαιότητας	Μέτρια	Πολύ	Πάρα πολύ	Εξαιρετικά
Μικρής Σπουδαιότητας					Μεγάλης Σπουδαιότητας			

Στη συνέχεια, και αφού θα έχει δημιουργηθεί ο αντίστοιχος πίνακας συσχέτισης των κριτηρίων, οι τιμές που δόθηκαν επεξεργάζονται ώστε να υπολογιστούν οι τιμές των αριθμητικών τιμών των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων. Οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας κανονικοποιούνται προκειμένου το άθροισμά τους να ισούται με τη μονάδα. Από τον πολλαπλασιασμό των τιμών των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων με τον αντίστοιχο πίνακα των τιμών των τάξεών τους, υπολογίζονται τελικά η συνολική βαρύτητα που έχει το κάθε κριτήριο στην απόφαση που πρέπει να ληφθεί.

Προκειμένου να μειώσει οποιαδήποτε πιθανότητα λάθους, ο Saaty (1977) πρότεινε έναν αριθμητικό δείκτη για τον έλεγχο της ορθότητας του πίνακα σύγκρισης ζευγών, τον επονομαζόμενο CR (consistency ratio). Ο δείκτης αυτός ισούται με το κλάσμα του consistency index CI και ενός μέσου consistency index RI, δηλαδή:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Όπου: $CI = \frac{\lambda max - n}{n-1}$ και $\lambda_{max} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}(\frac{w_j}{w_i})$ που αντιστοιχεί στη μέγιστη χαρακτηριστική τιμή του πίνακα και n η τάξη του πίνακα.

Η τιμή RI αποτελεί τη μέση τιμή consistency των τετραγώνων τυχαίων πινάκων διαφόρων τάξεων n. Ο Saaty (1977) είχε υπολογίσει την τιμή RI μέχρι πίνακα 15ης τάξης, ενώ για τιμή CR≥0,1 οι Saaty & Vargas (1984) προτείνουν επανεξέταση του αρχικού πίνακα.

Έτσι, εφαρμόζοντας την παραπάνω μέθοδο, καθορίστηκαν οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο που επιλέχθηκε για τη μελέτη της ικανότητας κατείσδυσης στην περιοχή μελέτης. Η βαθμονόμηση των πέντε κριτηρίων και ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας κάθε κριτηρίου, παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.6. Τέλος, η τιμή κάθε κριτηρίου πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή βαρύτητάς του, και ο τελικός δείκτης που προκύπτει από τη συγκεκριμένη ανάλυση αποτελεί την ικανότητα κατείσδυσης ή αλλιώς δείκτης πιθανότητας ύπαρξης υπόγειων υδάτων (GPI - Groundwater Potential Index), ο οποίος υπολογίστηκε με την πρόσθεση όλων των βαθμονομημένων κριτηρίων, σύμφωνα με την Εξίσωση 1, ενώ το κάθε κριτήριο (Πίνακας 8.7) αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

Πίνακας 8.6: Η βαθμονόμηση των πέντε κριτηρίων που επιλέχθηκαν για τη μελέτη της ικανότητας κατείσδυσης και η εύρεση των συντελεστών βαρύτητας.

	Step 1: Pair wise comparison				
Factor	L	S	LD	LU	DD
HL	1,00	0,50	0,50	5,00	3,00
S	2,00	1,00	1,00	7,00	4,00
LD	2,00	1,00	1,00	5,00	3,00
LU	0,20	0,14	0,20	1,00	0,33
DD	0,33	0,25	0,33	3,00	1,00
Total	5,53	2,89	3,03	21,00	11,33

	Step 2: Normalization						
Factor	L	S	LD	LU	DD	Total	Average
HL	0,18	0,17	0,16	0,24	0,26	1,02	0,20
S	0,36	0,35	0,33	0,33	0,35	1,72	0,34
LD	0,36	0,35	0,33	0,24	0,26	1,54	0,31
LU	0,04	0,05	0,07	0,05	0,03	0,23	0,05
DD	0,06	0,09	0,11	0,14	0,09	0,49	0,10
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00

	Step 3: Consistency analysis							
Factor	L	S	LD	LU	DD	Total	Average	Consistency Measure
HL	0,18	0,17	0,16	0,24	0,26	1,02	0,20	5,15
S	0,36	0,35	0,33	0,33	0,35	1,72	0,34	5,14
LD	0,36	0,35	0,33	0,24	0,26	1,54	0,31	5,14
LU	0,04	0,05	0,07	0,05	0,03	0,23	0,05	5,03
DD	0,06	0,09	0,11	0,14	0,09	0,49	0,10	5,04
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			CI =0,02 RI =1,12 CR =0,02

Όπου: HL=Hydrolithology (Υδρολιθολογία)
S=Slope (Μορφολογικές Κλίσεις)
LD=Lineaments Density (Χωρική Πυκνότητα Ασυνεχειών)
LU=Landuse (Χρήσεις Γης)
DD=Drainage Density (Πυκνότητα Υδρογραφικού Δικτύου)

Εξίσωση 1 - Groundwater Potential Index

$$GPI = 0{,}05 \cdot W_{LU} + 0{,}10 \cdot W_{DD} + 0{,}20 \cdot W_{HL} + 0{,}31 \cdot W_{LD} + 0{,}34 \cdot W_{S}$$

Πίνακας 8.7: Παράγοντες, δείκτες και συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν στην εύρεση των ζωνών αυξημένης ικανότητας κατείσδυσης.

Παράγοντες	**Κατηγοριοποίηση**	**Δείκτης**	**Συντελεστής Βαρύτητας (W_i)**
Τοπογραφική Κλίση (S)	0° - 10°	3	0,34
	10° - 25°	2	
	25° - 45°	1	
	> 45°	0	
Χωρική Πυκνότητα Ασυνεχειών (LD)	Πολύ χαμηλή	0	0,31
	Χαμηλή	1	
	Μέση	2	
	Υψηλή	3	
Υδρολιθολογία (HL)	Πολύ χαμηλή υδροπερατότητα	0	0,20
	Χαμηλή υδροπερατότητα	1	
	Μέση υδροπερατότητα	2	
	Υψηλή υδροπερατότητα	3	
Πυκνότητα Υδρογραφικού Δικτύου (DD)	Πολύ χαμηλή	3	0,10
	Χαμηλή	2	
	Μέση	1	
	Υψηλή	0	
Χρήσεις Γης (LU)	Οικιστικές περιοχές	0	0,05
	Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	1	
	Βοσκότοποι	2	
	Φυσική πυκνή βλάστηση	3	

Οι πληροφορίες της λιθολογίας, της γεωμορφολογίας, του μέσου ασυνεχειών, της τοπογραφικής κλίσης και των χρήσεων γης, προήλθε από την ψηφιοποίηση τοπογραφικών και γεωλογικών χαρτών κλίμακας 1:50.000, από δεδομένα χρήσεων γης από το Υπουργείο Γεωργίας, από αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες Landsat 7 ETM$^+$ της περιοχής μελέτης. Η ενοποίηση όλων των δεδομένων έγινε σε raster δεδομένα με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), χρησιμοποιώντας το εργαλείο Spatial Analyst, για τον εντοπισμό των πιθανών ζωνών των υπόγειων υδάτων.

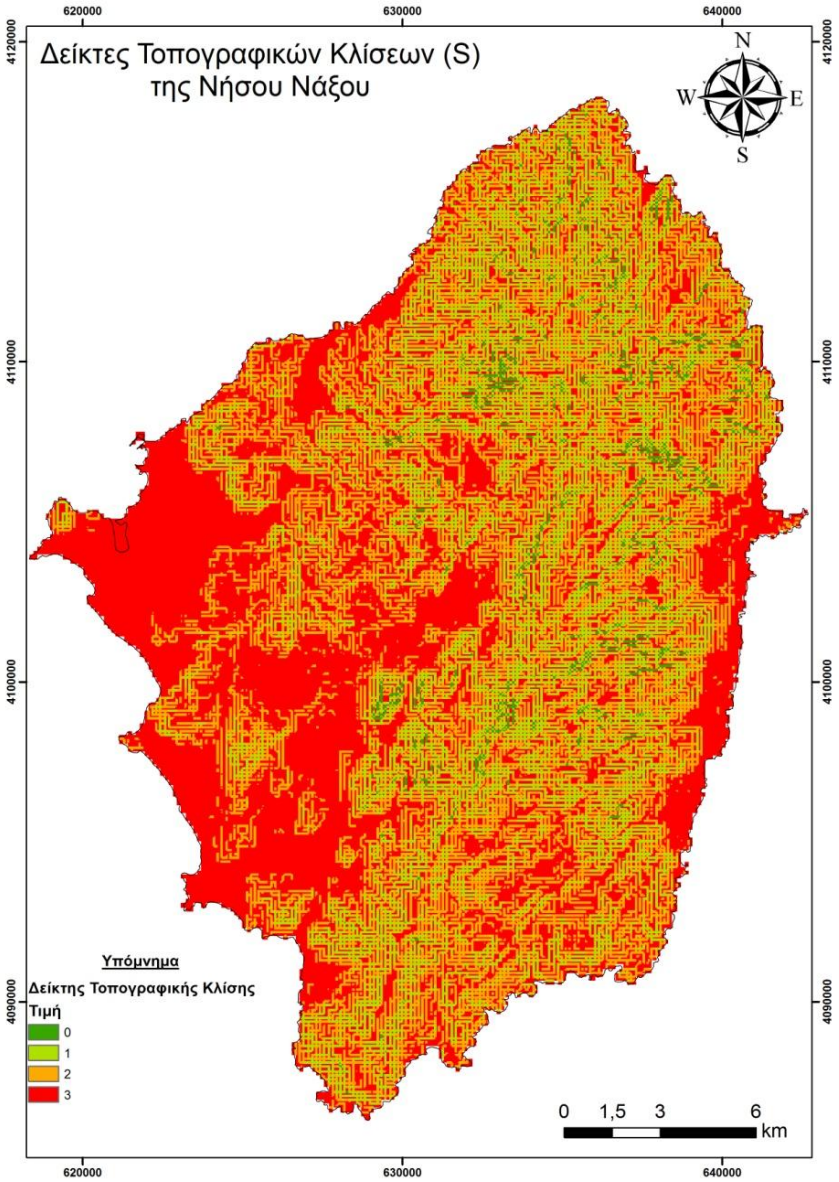
Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκαν καταρχάς τα δεδομένα των φωτογραμμώσεων και της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών που μελετήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, με στόχο να χρησιμοποιηθεί το εύρος των πυκνοτήτων των ασυνεχειών ως παράγοντας επιρροής της κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων στην περιοχή μελέτης. Επίσης, η δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM$^+$, σε συνδυασμό με τα δεδομένα κάλυψης γης, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των χρήσεων γης και της βλάστησης της περιοχής μελέτης.

Η βλάστηση προσδιορίστηκε σύμφωνα με το δείκτη NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), καθώς είναι γνωστό ότι οι δορυφορικές εικόνες η απεικόνιση των υπέρυθρων μηκών κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της βλάστησης σε μια περιοχή, υπολογίζοντας μια αναλογία γνωστή ως κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης - NDVI (Singh, 2012). Η αρχή πίσω από το δείκτη NDVI είναι ότι τα πράσινα φύλλα απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία (μήκη κύματος 640 - 670 nm) λόγω της παρουσίας των χρωστικών της χλωροφύλλης, ενώ γίνεται σκέδαση της ακτινοβολίας στα μήκη κύματος 700-1100 nm, λόγω της εσωτερικής δομής του φύλλου, με αποτέλεσμα μια περιοχή χωρίς βλάστηση παρουσιάζει υψηλότερη ανάκλαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ σε μια περιοχή με πυκνή βλάστηση, δεν υφίσταται ανάκλαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Έτσι, ο δείκτης NDVI είναι μία από τις πιο επιτυχημένες μεθόδους εκτίμησης της βλάστησης σε μια περιοχή, και παραμένει το πιο γνωστό εργαλείο για την ανίχνευση καλλιεργήσιμων και πράσινων εκτάσεων με τη χρήση πολυφασματικών τηλεπισκοπικών δεδομένων. Μόλις είχε αποδειχθεί η σκοπιμότητα για την ανίχνευση της βλάστησης, οι χρήστες είχαν την τάση να χρησιμοποιούν επίσης το δείκτη NDVI για την ποσοτικοποίηση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φυτών.

8.3.3 Γεωμορφολογία – Τοπογραφική Κλίση (S)

Για την εκτίμηση της τοπογραφικής κλίσης στο νησί της Νάξου, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου (DEM), το οποίο προέκυψε από την ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Στο χάρτη της Εικόνας 8.26, παρουσιάζονται οι επί τοις εκατό τοπογραφικές κλίσεις, όπου παρατηρείται ότι στη δυτική πεδινή ζώνη, η οποία αντιπροσωπεύει το 30% της συνολικής έκτασης του νησιού, το ανάγλυφο είναι ήπιο. Αντίθετα, το κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νησιού παρουσιάζει το εντονότερο ανάγλυφο, όπου οι γεωλογικοί σχηματισμοί που κυριαρχούν είναι οι σχιστόλιθοι, τα μάρμαρα και ο μιγματίτης (Partsinevelou et al., 2011).

Στη φάση αυτή, είναι κατανοητό ότι, όσο μεγαλώνει η τοπογραφική κλίση και το ανάγλυφο γίνεται πιο απότομο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η επιφανειακή απορροή των υδάτων και, ως εκ τούτου, τόσο μικρότερη η επαναπλήρωση των υπόγειων υδάτων. Για το λόγο αυτό ο παράγοντας της τοπογραφικής κλίσης (S) έχει το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας.



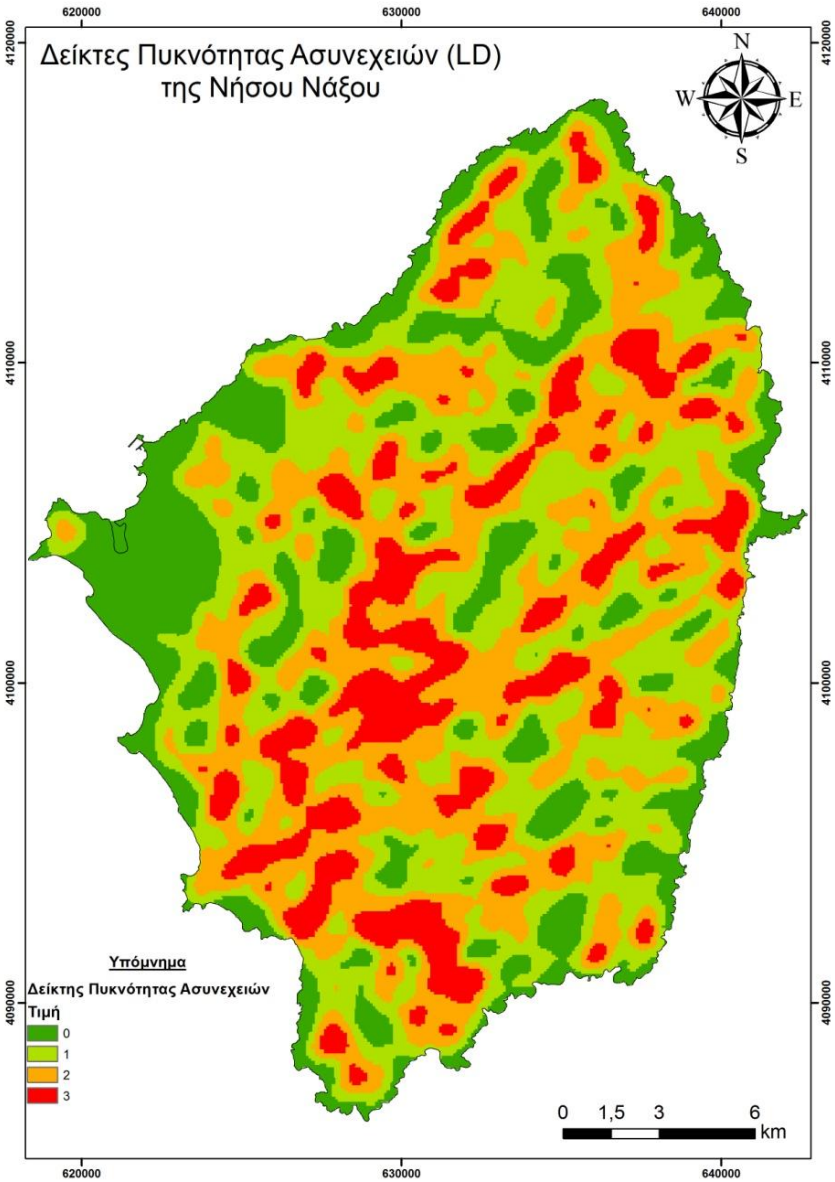
Εικόνα 8.26: Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση τις τοπογραφικές κλίσεις, που αποτελούν τον παράγοντα S.

8.3.4 Χωρική Πυκνότητα Ασυνεχειών (LD)

Έχει ήδη επισημανθεί ότι η μελέτη του μέσου ασυνεχειών αποτελεί σημαντικό θέμα της υδρογεωλογικής έρευνας, ιδίως σε σκληρά διερρηγμένα πετρώματα, καθώς το δευτερογενές πορώδες ελέγχει την αποθήκευση και τη διακίνηση των υπογείων υδάτων.

Από τηλεπισκοπικά δεδομένα και εργασία υπαίθρου, κατασκευάστηκε ο χάρτης φωτογραμμώσεων, όπου τρεις κύριες διευθύνσεις αυτών παρατηρήθηκαν, η ΒΒΑ-ΝΝΔ, η ΒΑ-ΝΔ και η ΑΒΑ-ΔΝΔ, και δύο δευτερεύουσες, η Α-Δ και η Β-Ν (Partsinevelou et al., 2011). Από το συγκεκριμένο χάρτη κατασκευάστηκε ο χάρτης χωρικής πυκνότητας των

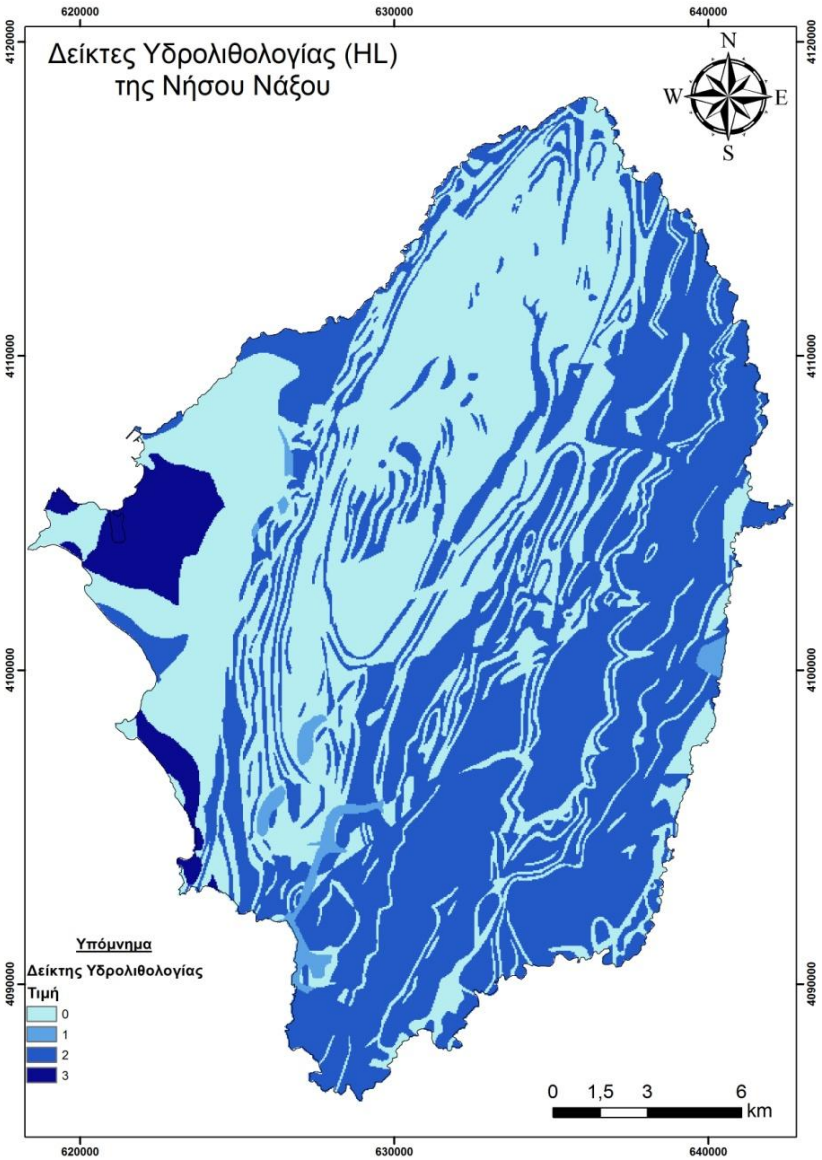
ασυνεχειών, ο οποίος περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και εκφράζει τη συχνότητα εμφάνισης ασυνεχειών ανά μονάδα επιφάνειας (Εικόνα 8.27). Πολύ υψηλή πυκνότητα παρατηρείται σε περιοχές όπου οι εναλλαγές μεταξύ μαρμάρων, σχιστόλιθων και αμφιβολιτών είναι πολύ έντονη, υποδεικνύοντας τον υψηλό βαθμό υδραυλικής διασύνδεσης μεταξύ των συγκεκριμένων λιθολογιών, καθώς το νερό κατεισδύει και κινείται μέσω των ασυνεχειών. Από την άλλη πλευρά, πολύ χαμηλή πυκνότητα των ασυνεχειών παρατηρείται σε περιοχές όπου η κύρια λιθολογία είναι οι γρανοδιορίτες και τα μεταλπικά ιζήματα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι εν λόγω λιθολογίες δεν έχουν επηρεαστεί πολύ από την παρατηρούμενη τεκτονική δραστηριότητα (Partsinevelou et al., 2011).



Εικόνα 8.27: Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, που αποτελεί τον παράγοντα LD.

8.3.5 Υδρολιθολογία (HL)

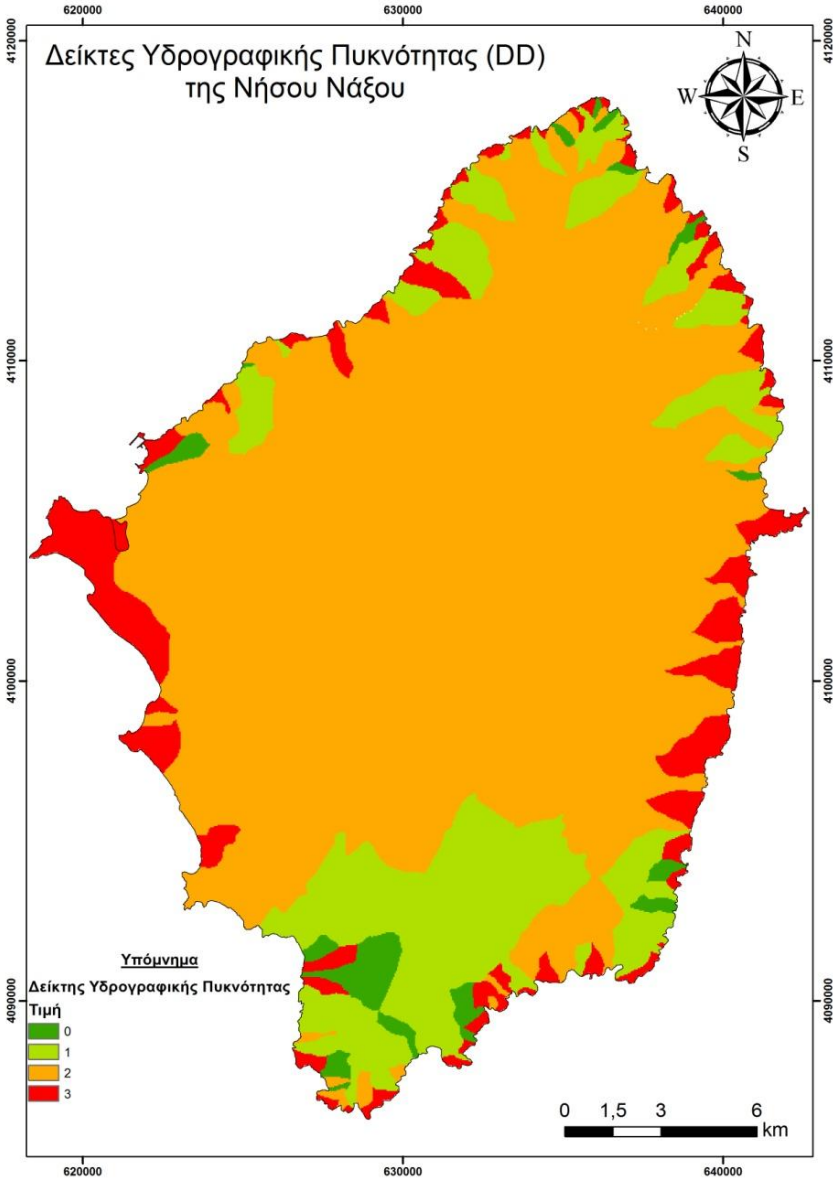
Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των σκληρών διερρηγμένων εξαρτάται από τη λιθολογία, το πορώδες (πρωτογενές και δευτερογενές) και την τεκτονική κατάσταση (αριθμός των ασυνεχειών, ρωγμές, κ.λπ.). Για το λόγο αυτό, η υδρολιθολογία (HL) έχει χωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες, από χαμηλή (δείκτης 0) έως υψηλή (δείκτης 3) δυναμικότητα της κατείσδυσης του νερού σύμφωνα με την διαπερατότητα των λιθολογικών σχηματισμών με βάση το πρωτογενές πορώδες (για τις ιζηματογενείς αποθέσεις), το δευτερογενές πορώδες (για τα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα) και την τεκτονική δομή. Έτσι, λιθολογίες και όπως οι γρανοδιορίτες, οι σχιστόλιθοι και ο μιγματίτης θεωρήθηκαν ότι έχουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα σε σύγκριση με τις ιζηματογενείς αποθέσεις και τα μη-μεταμορφωμένα πετρώματα, τα οποία εμφανίζουν υψηλότερη διαπερατότητα (Εικόνα 8.28).



Εικόνα 8.28: Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση την υδρολιθολογία (HL).

8.3.6 Υδρογραφική Πυκνότητα (DD)

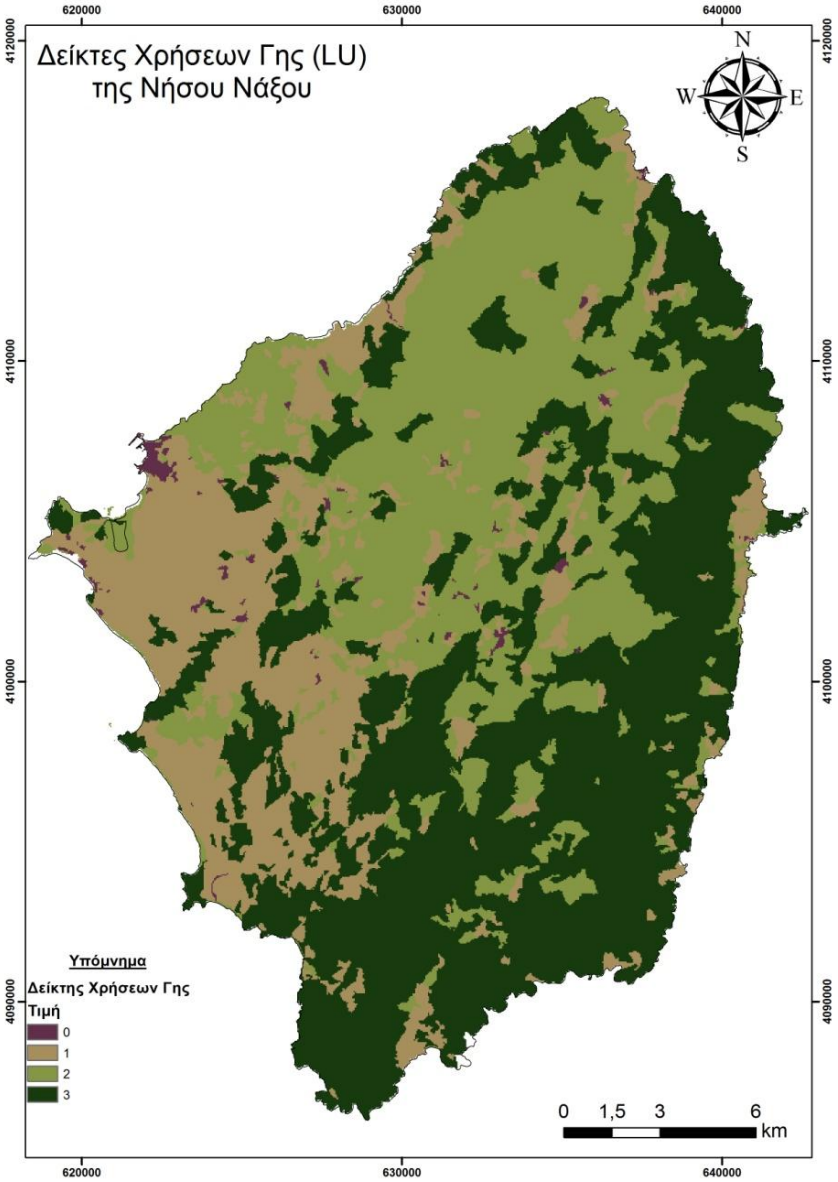
Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (υδρογραφική πυκνότητα) αποτελεί χαρακτηριστικό τόσο της επιφάνειας του εδάφους, όσο και του υπεδάφους. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (σε μονάδες km/km^2) υποδεικνύει την απόστασης μεταξύ των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και τη φύση του επιφανειακού υλικού (λιθολογία). Έτσι, όσο μεγαλύτερη θα είναι η υδρογραφική πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιφανειακή απορροή (Εικόνα 8.29). Αντιθέτως, όσο μικρότερη είναι η υδρογραφική πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα κατείσδυσης επιφανειακού νερού και αναπλήρωσης/εύρεσης υπόγειου υδροφορέα (Prasad et al., 2008) .



Εικόνα 8.29: Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση την υδρογραφική πυκνότητα, η οποία αποτελεί τον παράγοντα DD.

8.3.7 Χρήσεις Γης (LU)

Η κατανομή των χρήσεων γης εξαρτάται άμεσα από την τοπογραφία της νήσου. Περίπου το 25% της συνολικής έκτασης της περιοχής έρευνας είναι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στην πεδινή περιοχή δυτικά της νήσου. Η υπόλοιπη έκταση της νήσου καλύπτεται από δυσπρόσιτες περιοχές με θάμνους και διάσπαρτα και ανοργάνωτα βοσκοτόπια (Εικόνα 8.30). Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι, οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στο περιβάλλον της Νάξου είναι σχετικά περιορισμένες σε σύγκριση με άλλα νησιά των Κυκλάδων με μεγάλη τουριστική δραστηριότητα (Παρτσινεβέλου, 2012).



Εικόνα 8.30: Οι κατηγοριοποιημένες περιοχές με βάση τις χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης, οι οποίες αποτελούν τον παράγοντα LU.

Για τον εντοπισμό και την ερμηνεία των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα του Υπουργείου Γεωργίας, σε συνδυασμό με την οπτική ερμηνεία από τη δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM^+, όπου υπολογίστηκε ο δείκτης NDVI για τον προσδιορισμό της βλάστησης. Αποτέλεσμα της χρήσης των δεδομένων αυτών είναι η κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης σε τέσσερις κατηγορίες, τις οικιστικές περιοχές, τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, τα βοσκοτόπια και τις με φυσική και πυκνή βλάστηση. Η κατηγοριοποίηση αυτή, όπως είναι κατανοητό, έγινε με βάση την εμφάνιση ή μη βλάστησης, αλλά και τον τύπο αυτής, καθώς όσο πιο πυκνή είναι η βλάστηση, η μειώνεται η ταχύτητα της επιφανειακής απορροής, και εντούτοις, τόσο ευνοείται η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων.

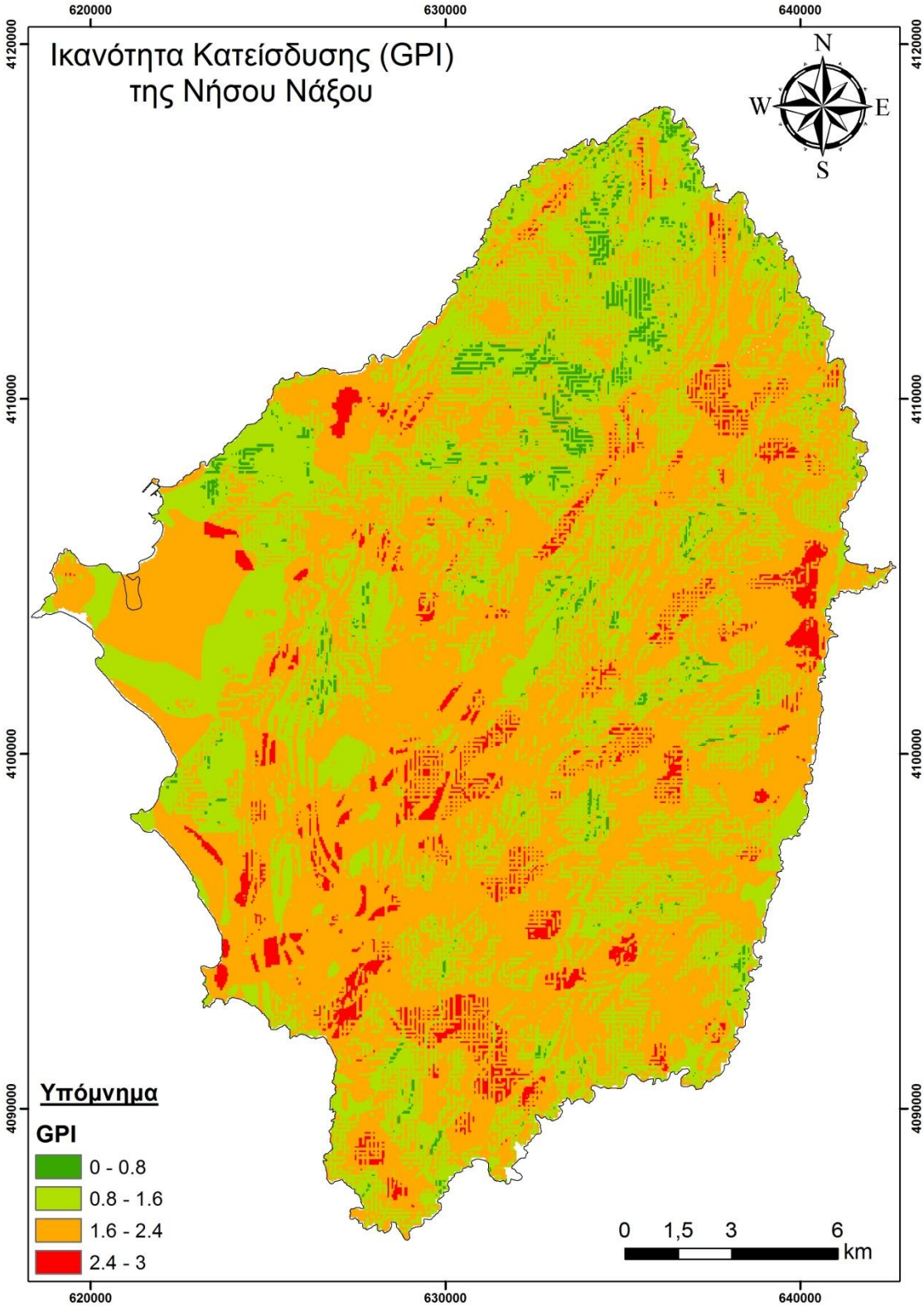
8.3.8 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Κάθε ένας από τους παραπάνω θεματικούς χάρτες (τοπογραφική κλίση, πυκνότητα ασυνεχειών, υδρολιθολογία, η υδρογραφική πυκνότητα και οι χρήσεις γης), αποτελεί στοιχείο για την ύπαρξη υπόγειου νερού, καθώς κάθε παράγοντας επηρεάζει την κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων. Για ενσωματωθούν όλοι οι θεματικοί χάρτες σε έναν, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές βαρύτητας που υπολογίστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν εφαρμογές των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Συγκεκριμένα, οι θεματικοί χάρτες ταξινομήθηκαν με βάση τους συντελεστές βαρύτητας με τη χρήση του εργαλείου Raster Calculator του Spatial Analyst. Ο τελικός χάρτης κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις ζώνες, σύμφωνα με τον δείκτη GPI, ο οποίος όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων (Εικόνα 8.31). Η έκταση των διαφόρων ζωνών σε km^2 παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.8. Η περιοχή έρευνας θα μπορούσε να χαρακτηρίζεται από χαμηλή έως μέτριας ικανότητας κατείσδυσης, γεγονός που δικαιολογείται απόλυτα από τις κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, η ικανότητα κατείσδυσης χαρακτηρίστηκε ως πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέτρια και υψηλή, όπου το 58,37 % του νησιού χαρακτηρίζεται ως μέτρια ζώνη των υπογείων υδάτων. Οι ζώνες υψηλής ικανότητας κατείσδυσης καταλαμβάνουν μόνο το 4,65% της συνολικής έκτασης, βρίσκονται διάσπαρτες στη νήσο και χαρακτηρίζονται από πολύ ήπιες κλίσεις, από πολύ υψηλή πυκνότητα ασυνεχειών, από χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα και από πυκνής βλάστησης. Οι περιοχές αυτές πρέπει να ληφθούν έντονα υπόψη, δεδομένου ότι μπορεί να είναι πηγές πόσιμου νερού για τους αγροτικούς πληθυσμούς.

Σε αυτή τη μελέτη η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών παίζουν σημαντικό ρόλο στη μελέτη της κίνησης των υπόγειων υδάτων, καθώς γίνεται με οικονομικό τρόπο, η εκτίμηση του συντελεστή κατείσδυσης των διάφορων λιθολογιών, ούτως ώστε το μοντέλο υπόγειας ροής, που είναι και κύριος στόχος της παρούσας διατριβής, να είναι όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερο, μιας και η εκτέλεση δοκιμαστικών αντλήσεων σε όλη τη νήσο είναι ανέφικτη και τα υπάρχοντα δεδομένα λιγοστά.

Πίνακας 8.8: Ζώνες χαμηλής, μέσης και υψηλής ικανότητας κατείσδυσης, σύμφωνα με τον υπολογισμό του δείκτη GPI (Groundwater Potential Index).

Κατηγορίες τιμών δείκτη GPI	Κατηγορίες ικανότητας κατείσδυσης	Ικανότητα κατείσδυσης	Εμβαδόν ζώνης (km^2)
0 – 0,8	0	Very low	10
0,8 – 1,6	1	Low	150
1,6 – 2,4	2	Moderate	250
2,4 - 3	3	High	20



Εικόνα 8.31: Χάρτης ικανότητας κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων, σύμφωνα με τον υπολογιζόμενο δείκτη GPI (Groundwater Potential Index).

.

Κεφάλαιο 9^{ο} - Υδροχημεία

9. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ

9.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι φυσικές, χημικές και βιοχημικές διεργασίες, οι οποίες πραγματοποιούνται μεταξύ της ατμόσφαιρας, του εδάφους, των πετρωμάτων και του νερού, επηρεάζουν άμεσα τη χημική σύσταση του νερού και την ποιότητά του. Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη χημική σύσταση του νερού είναι (Matthess, 1982, Καλλέργης, 2000):

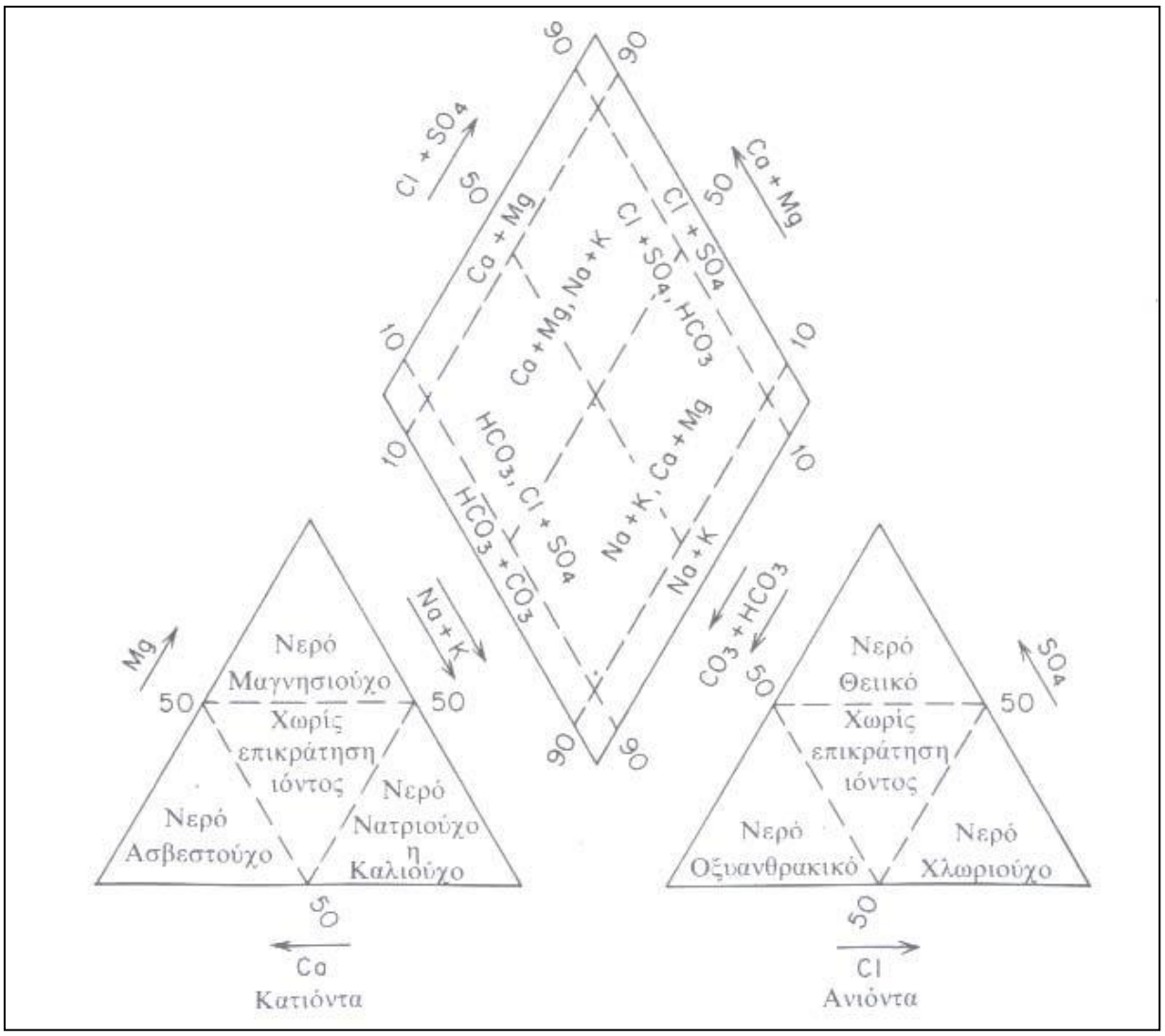
- Η σύσταση του υδροφορέα. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ενός υδροφορέα επηρεάζουν τη σύσταση του υπόγειου νερού, καθώς κατά τη διάρκεια που το νερό κινείται στο υπέδαφος η αρχική του σύσταση αλλάζει σταδιακά μέσω της αποσάθρωσης, της διάλυσης και της απομάκρυνσης υλικών του υδροφορέα, τα οποία ελευθερώνονται στην υγρή φάση, μέσω της ανάμιξης διαφορετικών νερών, των αντιδράσεων ιοντικής ανταλλαγής, της απόθεσης ορυκτών και της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης.
- Ο χρόνος παραμονής. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το νερό είναι σε επαφή με το έδαφος στην ακόρεστη ζώνη ή με τους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς στη ζώνη κορεσμού, αποτελεί σημαντικό παράγοντα επηρεασμού της χημικής σύστασης του νερού. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από διάφορες περιβαλλοντικές παραμέτρους (π.χ. βροχόπτωση, αποστράγγιση, κ.τ.λ.) και από τη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών.
- Το κλίμα. Η συμμετοχή του νερού της βροχής στη χημική σύσταση των υπόγειων υδάτων είναι σημαντική. Το ποσό του νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα είναι ανάλογο των βροχοπτώσεων, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται η εξάτμιση και η εξατμισιδιαπνοή. Με την αύξηση της εξάτμισης και της εξατμισιδιαπνοής, αυξάνεται και η ποσότητα των ιοντικών συγκεντρώσεων.
- Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Οι χρήσεις απορρυπαντικών, λιπασμάτων, εδαφοβελτιωτικών και φυτοφαρμάκων, αλλά και οι διαρροές από Χ.Α.Δ.Α. ή αποχετευτικά δίκτυα, είναι μερικές δραστηριότητες οι οποίες προκαλούν μεταβολές στο χημισμό, και κατά επέκταση, στην ποιότητα του υπόγειου νερού.
- Η βλάστηση. Η επίδραση της βλάστησης στη σύσταση των υπόγειων υδάτων είναι σύνθετη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το κλίμα, τα πετρώματα και το ανάγλυφο του εδάφους. Γενικά πάντως παρατηρείται εκλεκτική πρόσληψη ιόντων σε περιοχές με πυκνή βλάστηση, τα οποία αποθηκεύονται στη βιομάζα.

Η χημική σύσταση του νερού μεταβάλλεται τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατακόρυφα μέσα σε ένα υπόγειο υδατικό σύστημα. Γενικά, το υπόγειο νερό στις περιοχές τροφοδοσίας και σε εκείνες κοντά στην επιφάνεια περιέχει πολύ μικρά ποσοστά διαλυμένων στερεών από ότι εκείνο στις περιοχές εκφόρτισης και στους υπόγειους υδροφορείς σε μεγάλα βάθη, καθώς η συνολική μεταλλικότητα (TDS) του υπόγειου νερού αυξάνει με το μήκος της διαδρομής και το χρόνο παραμονής του νερού στο υδροφόρο σύστημα, καθώς βρίσκεται σε επαφή με τα ευδιάλυτα συστατικά των γεωλογικών σχηματισμών για περισσότερο χρόνο (Καλλέργης, 2000). Ακόμη παρατηρείται μεταβολή από συνθήκες περιβάλλοντος οξειδωτικών συνθηκών σε συνθήκες περιβάλλοντος αναγωγικών συνθηκών.

Λόγω των μεταβολών αυτών των συνθηκών περιβάλλοντος αναπτύχθηκε η έννοια των υδροχημικών φάσεων από τους Back (1961, 1966), Morgan - Winner (1962), Seaber (1962), κ.α. Οι υδροχημικές φάσεις είναι διακριτές ζώνες που οι συγκεντρώσεις τους, σε ανιόντα και κατιόντα, μπορούν να περιγραφούν μέσα στα πλαίσια καλά καθορισμένων κατηγοριών νερού (composition category). Σύμφωνα με τις κατηγορίες αυτές, όταν η επί τοις εκατό συγκέντρωση καλίου είναι σημαντική, τότε το νάτριο και το κάλιο προβάλλονται στο διάγραμμα σαν μια παράμετρος. Ο Back (1966), με βάση τα στοιχεία αυτά, πρότεινε την ταξινόμηση των υδροχημικών φάσεων, όπως δείχνει ο Πίνακας 9.1, ενώ η έννοια της κατηγορίας νερού βασίζεται στις υποδιαιρέσεις του τριγραμμικού διαγράμματος (Εικόνα 9.1) που πρότειναν οι Back - Hanshaw (1965).

Πίνακας 9.1: Ταξινόμηση υδροχημικών φάσεων (Back, 1966, από Καλλέργης, 2000).

Φάσεις	**Ca + Mg**	**% meq ιόντων**		
		Na + K	**$HCO_3 + CO_3$**	**Cl + SO_4**
Φάσεις κατιόντων				
Ασβεστομαγνησιούχα	90 - 100	0 - 10		
Ασβεστονατρούχα	50 - 90	10 - 50		
Νατριοασβεστούχα	10 - 50	50 - 90		
Νατριοκαλιούχα	0 - 10	90 - 100		
Φάσεις ανιόντων				
Οξυανθρακική			90 - 100	0 - 10
Οξυανθρακική - χλωροθειική			50 - 90	10 - 50
Χλωροθειική - οξυανθρακική			10 - 50	50 - 90
Χλωροθειική			0 - 10	90 - 100



Εικόνα 9.1: Διάγραμμα ταξινόμησης νερών σύμφωνα με βάση τα επικρατούντα ιόντα (Freeze - Cherry 1979, από Καλλέργης, 2000).

Τέλος, με βάση τις παραπάνω υδροχημικές φάσεις, ο Cheborarev (1955) διέκρινε τρεις κατακόρυφες υδροχημικές ζώνες (Καλλέργης, 2000):

1. Την ανώτατη υδροχημική ζώνη, όπου παρατηρείται έντονη κυκλοφορία του νερού σε πετρώματα, που απόπλυσή τους είναι εύκολη. Το νερό είναι οξυανθρακικό και χαμηλής μεταλλικότητας (χαμηλό TDS).
2. Την ενδιάμεση υδροχημική ζώνη, όπου παρατηρείται λιγότερο έντονη κυκλοφορία του νερού. Το νερό είναι θειικό και η μεταλλικότητά του υψηλότερη (μεγαλύτερο TDS).
3. Την κατώτερη υδροχημική ζώνη, όπου το νερό είναι σχεδόν στάσιμο, τα πετρώματα πρακτικά δεν αποπλένονται, η μεταλλικότητα του νερού είναι μεγάλη και η υδροχημική του φάση χλωριούχα.

9.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΙΟΝΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

9.2.1 Κατιόντα

9.2.1.1 Νάτριο (Na^+)

Φυσική πηγή προέλευσης του νατρίου είναι τα αργιλικά ορυκτά, οι αργιλικοί σχιστόλιθοι, τα πλαγιόκλαστα και οι εβαπορίτες. Συμμετέχει επίσης στη σύσταση του νεφελίνη, των νατριούχων αμφίβολων (γλαυκοφανής, ριβεκίτης), των ζεόλιθων, κ.α. Πολύ σπάνια συμμετέχει στη σύσταση των μαρμαρυγιών και βρίσκεται επίσης σε μικρές ποσότητες στα ανθρακικά πετρώματα.

Το νάτριο μπορεί να προέλθει επίσης από την ανάμιξη του θαλάσσιου και υπόγειου νερού, καθώς επίσης και από τα βιομηχανικά απόβλητα στα οποία το νάτριο μπορεί να θεωρηθεί δείκτης ρύπανσης όταν βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες.

9.2.1.2 Κάλιο (K^+)

Το κάλιο προέρχεται κυρίως από τους αστρίους (ορθόκλαστο και μικροκλινή), καθώς και από τον αστριοειδή λευκίτη, μερικούς μαρμαρυγίες και αργιλικά άλατα. Το θαλασσινό νερό περιέχει μεγάλες συγκεντρώσεις καλίου, όπως επίσης και οι εβαπορίτες. Το κάλιο είναι κύρια συνδεδεμένο με τους σχιστόλιθους, ενώ στα υπόγεια νερά συναντάται σε αναλογία σε σχέση με το νάτριο σε αναλογία 1/10 ή 1/100. Έχει τέλος την ιδιότητα να αφομοιώνεται από τα εδάφη, τα πετρώματα και τα φυτά.

9.2.1.3 Ασβέστιο (Ca^{2+})

Το ασβέστιο είναι το κύριο κατιόν του υπόγειου νερού. Προέρχεται από τα μάρμαρα και ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα. Τα υπόγεια νερά από ασβεστόλιθους και άλλες ασβεστολιθικές αποθέσεις, είναι γενικά σκληρά νερά. Σε ιζηματογενή πετρώματα, το ασβέστιο εμφανίζεται με την μορφή ανθρακικών ορυκτών, όπως ο ασβεστίτης, ο αραγονίτης και ο δολομίτης, ή με την μορφή θειικών ορυκτών, όπως ο γύψος και ο ανυδρίτης. Πηγή προέλευσης του ασβεστίου μπορούν να θεωρηθούν και τα εκρηξιγενή πετρώματα, τα οποία περιέχουν πυρόξενους, αμφίβολους και άστριους. Ασβέστιο περιέχουν και τα πυριτικά ορυκτά, τα οποία έχουν προέλθει από μεταμόρφωση, όπως τα πλαγιόκλαστα, οι αμφίβολοι και οι πυρόξενοι, τα οποία όμως είναι αδιάλυτα στο νερό και δίνουν αργιλικά ορυκτά και προϊόντα ασβεστίου μέσω της διάβρωσής τους.

9.2.1.4 Μαγνήσιο (Mg^{2+})

Τα περισσότερα υπόγεια νερά περιέχουν σχετικά μικρές ποσότητες μαγνησίου, εκτός αν το νερό έρχεται σε επαφή είτε με δολομίτες, όπου το νερό θα περιέχει ίσες ποσότητες ασβεστίου και μαγνησίου, είτε με εβαπορίτες πλούσιους σε μαγνήσιο, όπου τότε θα αποτελεί και το κυρίαρχο κατιόν του υπόγειου νερού.

9.2.2 Ανιόντα

9.2.2.1 Χλώριο (Cl^-)

Το χλώριο στα υπόγεια νερά προέρχεται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα (εβαπορίτες) και σε μικρότερο ποσοστό από εκρηξιγενή.

Μεγάλες συγκεντρώσεις χλωρίου παρατηρούνται σε περιπτώσεις μόλυνσης των υπόγειων νερών από διείσδυση της θάλασσας στις παράλιες ζώνες. Υπόγεια νερά που περιέχουν σημαντικές ποσότητες χλωρίου σε συνδυασμό μεγάλων συγκεντρώσεων νατρίου, δηλώνουν πιθανή επικοινωνία με τη θάλασσα.

Πηγή προέλευσης ενός σημαντικού ποσοστού ιόντων χλωρίου στα υπόγεια νερά είναι οι βροχοπτώσεις, με τις οποίες μεταφέρονται άλατα της θάλασσας στο εσωτερικό της χέρσου με τη βοήθεια των ανέμων. Η αλατότητα του βρόχινου νερού στις νησιωτικές και παράκτιες περιοχές είναι υψηλότερη σε σχέση με τις περιοχές στην ενδοχώρα, γιατί οι υγρές αέριες μάζες πάνω από τη θάλασσα μεταφέρουν σταγονίδια (sea spray) πλούσια σε άλατα. Η απόθεση αυτών των αλάτων με τη βροχόπτωση επιδρά σημαντικά στη χημική σύσταση των υπόγειων νερών των νήσων (Dazy et al., 1997, Lambrakis et al., 2000). Αργιλικά πετρώματα θαλάσσιας γένεσης, τα οποία έχουν κατακρατήσει θαλάσσιο νερό ή χλωριούχα άλατα από την εποχή της απόθεσής τους, αποτελούν πηγές χλωρίου.

Χλώριο μπορεί επίσης να προέρχεται από οικιακά και βιομηχανικά απόβλητα. Το χλώριο από τα ανιόντα απορροφάται λιγότερο από τα αργιλικά ορυκτά, η παρουσία των οποίων μπορεί να ληφθεί ως δείκτης ανθρωπογενούς παρέμβασης του υπόγειου υδροφορέα.

9.2.2.2 Οξυανθραξικά (HCO_3^-)

Τα όξινα ανθρακικά είναι προϊόντα των ανθρακικών πετρωμάτων, όταν αυτά διαλύονται στο νερό. Άλλες πηγές είναι το CO_2 της ατμόσφαιρας και το CO_2 προερχόμενο από τη σήψη των οργανικών υλών.

9.2.2.3 Θειικά (SO_4^{2-})

Κύριες πηγές των θειικών είναι η οξείδωση των σουλφιδίων και η διάλυση των θειικών ορυκτών, όπως των επαβοριτών και μάλιστα της γύψου και μάλιστα της γύψου και του ανυδρίτη. Ακόμη απαντάται στα ιζηματογενή και εκρηξιγενή πετρώματα με τη μορφή μεταλλικών σουλφιδίων.

Η συγκέντρωση θειικών στα υπόγεια νερά παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, εξαιτίας των διαδικασιών οξείδωσης, αναγωγής, διάλυσης και καθίζησης κατά την κίνηση τους μέσα στα πετρώματα.

9.2.2.4 Νιτρικά (NO_3^-)

Προέρχονται από αζωτούχες ενώσεις, κυρίως από υπολλείματα χλωρίδας και τα ζωικά κόπρανα, από εκπλύματα καλλιεργούμενων εδαφών (λιπάσματα) ή από προηγούμενη χρήση του νερού από τον άνθρωπο (επιστρεφόμενη άρδευση).

9.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

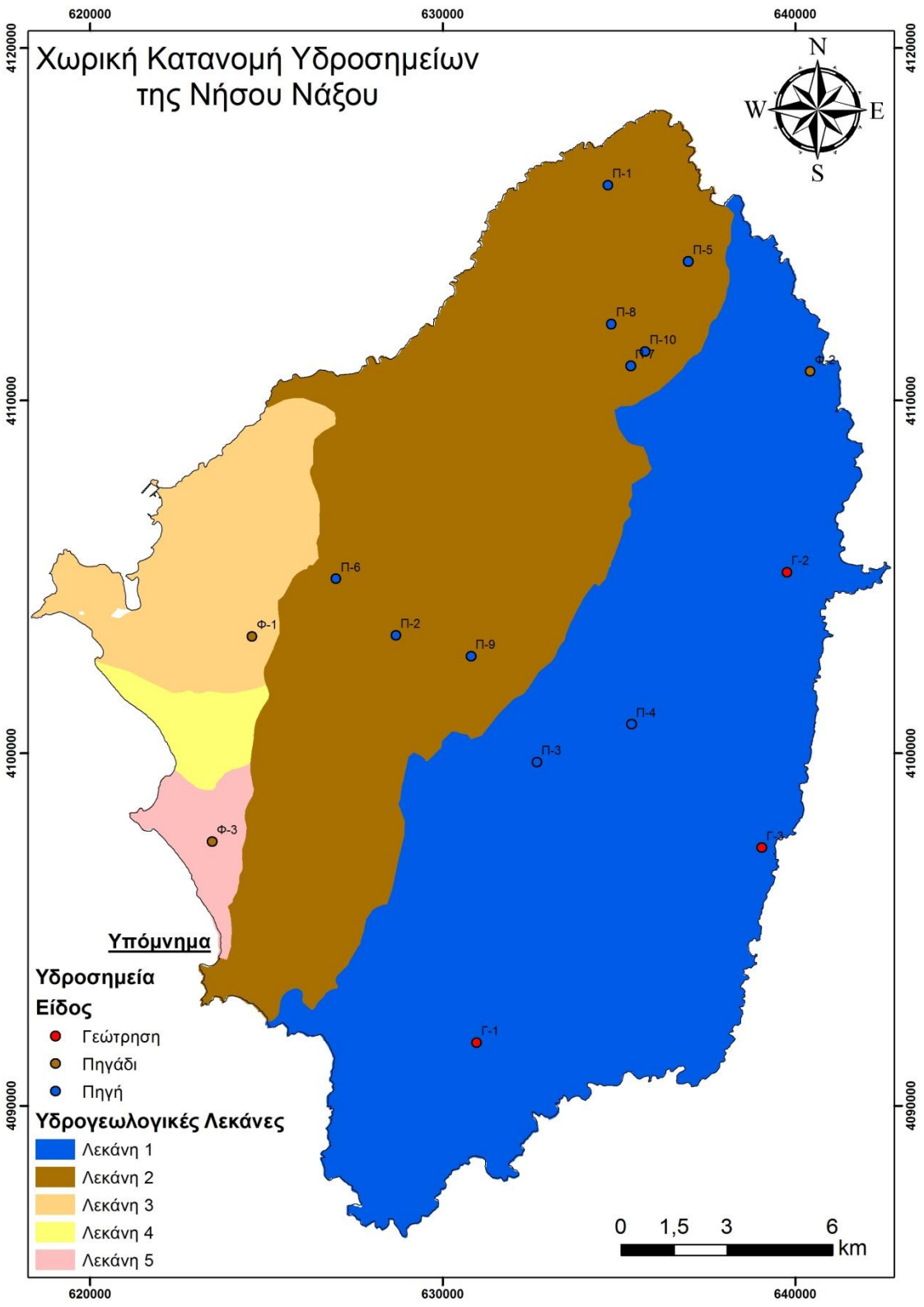
Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις και δειγματοληψίες νερού τον Αύγουστο του 2013 από πηγές, γεωτρήσεις και πηγάδια που βρίσκονται σε 4 από τις 5 υδρογεωλογικές λεκάνες. Συγκεριμένα, επιλέχθηκαν 16 υδροσημεία έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για κάθε κύρια λιθολογία, ενώ έγινε προσπάθεια να είναι κατανεμημένα σε όλη την έκταση της περιοχής έρευνας (Πίνακας 9.2 & Εικόνα 9.2). Οι πηγές που επιλέχθηκαν εκμεταλλεύονται καθόλη τη διάρκεια του έτους για να εξασφαλιστεί η ύδρευση του νησιού, ενώ τα πηγάδια και οι γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται για την άρδευση μεγάλων εκτάσεων.

Σκοπός των δειγματοληψιών στην περιοχή μελέτης ήταν κυρίως ο σχηματισμός μιας γενικής εικόνας του χημισμού των υπόγειων υδάτων της περιοχής έρευνας, με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των φυσικοχημικών παραμέτρων, καθώς ο συσχετισμός του χημισμού του νερού με το βάθος των υπόγειων υδάτινων σωμάτων, καθώς η πληροφορία αυτή είναι χρήσιμη για τον έλεγχο του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής του νερού. Αυτό κατέστη δυνατό, καθώς οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες στείρευσης ξηρής περιόδου και έντονης εκμετάλλευσης, με αποτέλεσμα ο χημισμός του νερού να συσχετίζεται με το χρόνο παραμονής του στο υπέδαφος, καθώς και με την κυκλοφορία του στις διάφορες λιθολογικές φάσεις.

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας και Γεωλογίας του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, ενώ η παρουσίαση όλων των υδροχημικών αναλύσεων γίνεται στις επόμενες παραγράφους μέσω διαγραμμάτων, ώστε να είναι εύκολη η σύγκρισή τους, ο συσχετισμός τους και η ερμηνεία τους. Τέλος, φωτογραφίες από τα σημεία δειγματοληψίας παρατίθενται στο παράρτημα.

Πίνακας 9.2: Στοιχεία σημείων δειγματοληψίας περιοχής έρευνας.

ΟΝΟΜΑ ΥΔΡΟΣΗΜΕΙΟΥ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΗ Χ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΗ Υ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)
ΧΑΣΚΑ	Π-10	635733,51	4111394,47	513
ΜΟΥΤΣΟΥΝΑ	Γ-2	639756,51	4105129,78	80
ΑΓΙΑ	Π-1	634682,42	4116112,77	233
ΛΥΩΝΑΣ	Φ-2	640419,93	4110827,31	29
ΔΑΝΑΚΟΣ	Π-4	635351,44	4100818,82	428
ΚΩΜΙΑΚΗ	Π-7	635325,04	4110984,41	606
ΕΜΠΟΛΗ	Π-5	636960,17	4113948,28	165
ΨΙΛΗ ΑΜΜΟΣ	Γ-3	639043,5	4097315,72	31
ΜΥΡΙΣΗΣ	Π-8	634782,7	4112177,43	621
ΑΝΩ ΠΟΤΑΜΙΑ	Π-2	628670,23	4103344,4	180
ΠΗΓΗ ΑΡΙΩΝ	Π-3	632673,97	4099746,99	530
ΜΕΛΑΝΕΣ	Π-6	626974,83	4104943,52	167
ΚΑΛΑΝΤΟΣ	Γ-1	630960,8	4091791,09	260
ΤΣΙΚΑΛΑΡΕΙΟ	Π-9	630795,88	4102751,21	278
ΓΛΙΝΑΔΟ	Φ-1	624593,37	4103309,18	100
ΜΙΚΡΗ ΒΙΓΛΑ	Φ-3	623461,74	4097493,89	20



Εικόνα 9.2: Χωρική κατανομή των υδροσημείων (πηγές, γεωτρήσεις και πηγάδια), από τα οποία έγιναν επιτόπιες μετρήσεις τον Αύγουστο του 2013 και πάρθηκαν δείγματα για χημική ανάλυση την ίδια περίοδο.

9.4 ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, τον Αύγουστο του 2013 πραγματοποιήθηκε εργασία υπαίθρου, με στόχο την επιτόπια μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού σε επιλεγμένα σημεία και δειγματοληψία νερού για τη χημική ανάλυση αυτών. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν:

- Η θερμοκρασία του αέρα.
- Η θερμοκρασία του νερού. Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του νερού. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, τόσο λιγότερο εύγεστο είναι, ενώ όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 15 ^{o}C, πολλαπλασιάζονται τα τυχόν υπάρχοντα σε αυτό μικρόβια και ευνοείται η ανάπτυξη αλγών, με άμεση συνέπεια την εμφάνιση δυσάρεστων οσμών και γεύσεων (Παππά, 2001). Ως μέγιστο όριο θερμοκρασίας για το πόσιμο νερό είναι η τιμή των 25 ^{o}C, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία (98/83, ΕΚ/3-11-98).
- Το διαλυμένο οξυγόνο (DO). Πρόκειται για το οξυγόνο, το οποίο δεσμεύεται από το νερό, όταν βρέχει ή όταν υπάρχει επιφανειακή επαφή. Όταν τα υπόγεια νερά δεν ανανεώνονται, παρουσιάζουν χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξεγόνου, γεγονός που σημαίνει ότι πρόκειται για παλαιά νερά μεγάλου βάθους. Ακόμη, το διαλυμένο οξυγόνο αποτελεί σημαντική παράμετρος για το χαρακτηρισμό των υδάτων σε μελέτες ρύπανσης, αφού η έλλειψη οξυγόνου συχνά υποδηλώνει μεγάλο ρυπαντικό φορτίο.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Ε.C.). Ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να επιτρέπει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση των διάφορων ιόντων στο νερό.
- Το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh). Το Eh ενός διαλύματος εκφράζει το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του. Όταν η τιμή του Eh είναι θετική, τότε το δυναμικό είναι οξειδωτικό, ενώ όταν η τιμή του είναι αρνητική, τότε το δυναμικό είναι αναγωγικό.
- Η ενεργός οξύτητα (pH). Το pH του υπόγειου νερού καθορίζεται από τις διάφορες χημικές αντιδράσεις μεταξύ των διαλυμένων ιόντων μέσα σε αυτό. Γενικά όμως, το pH του νερού μειώνεται με την πάροδο του χρόνου (Βουδούρης, 2009). Το νερό αρχικά είναι συνήθως αλκαλικό και σιγά σιγά γίνεται όξινο λόγω της έκλυσης CO_2 από την αποσύνθεση οργανικού υλικού.
- Τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS). Το σύνολο των διαλυμένων στερεών εκφράζει τη συνολική συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων στο νερό και υπολογίζονται από το

άθροισμα των συγκεντρώσεων των μεμονωμένων ιόντων, συμπεριλαμβανομένου και του διαλυμένου SiO_2 (Fetter, 1990). Στο σύνολο των διαλυμένων στερεών δεν περιλαμβάνονται τα αιωρούμενα ιζήματα, τα κολλοειδή και τα διαλυμένα αέρια. Η συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων εξαρτάται από τη φύση των πετρωμάτων, τη ταχύτητα ροής και το χρόνο παραμονής (Fetter, 1990), ενώ όπως ήδη αναφέρθηκε, τα υπόγεια νερά εμφανίζουν υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων από τα επιφανειακά (Καλλέργης, 2000).

Τα αποτελέσματα των επιτόπιων μετρήσεων των δειγμάτων νερού, παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.3. Σύμφωνα με τις συγκεκριμένες μετρήσεις, οι τιμές του pH, οι οποίες είναι όλες μεγαλύτερες του 7 και οι χαμηλές τιμές του διαλυμένου οξυγόνου, οι οποίες είναι μικρότερες από 6 mg/lt, υποδεικνύουν ότι τα δείγματα νερού έχουν προέλθει από μεγάλο βάθος, χωρίς όμως να παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο παραμονής στην ακόρεστη ζώνη. Αυτό σημαίνει ότι το νερό κατεισδύει σε μεγάλα βάθη μέσω του μέσου ασυνεχειών.

Επιπλέον, σύμφωνα με το σύνολο των διαλυμένων στερεών, το σύνολο των δειγμάτων νερού χαρακτηρίζονται ως γλυκά νερά (fresh), σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Hem (1970), με εξαίρεση το δείγμα από την περιοχή Καλαντός, το οποίο χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο (brackish).

Πίνακας 9.3: Αποτελέσματα επιτόπιων μετρήσεων δειγμάτων νερού.

ΟΝΟΜΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	$T_{νερού}$ (C^o)	$T_{αέρα}$ (C^o)	O_2 (mg/lt)	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (μS/cm)	Eh (mV)	pH	TDS (mg/lt)
ΧΑΣΚΑ	Π-10	18,3	27	4,43	302	-20	7,92	202,3
ΜΟΥΤΣΟΥΝΑ	Γ-2	22	32	4,3	1515	-35	7,5	1015,1
ΑΓΙΑ	Π-1	19	24	3,63	450	-23	7,33	301,5
ΛΥΩΝΑΣ	Φ-2	27,8	29	3,7	1016	-14	7,15	680,7
ΔΑΝΑΚΟΣ	Π-4	29,5	29	4,6	588	-60	8,1	394,0
ΚΩΜΙΑΚΗ	Π-7	24,4	25	2,32	480	-84	8,33	321,6
ΕΜΠΟΛΗ	Π-5	18,4	27	4,42	436	-18	7,22	292,1
ΨΙΛΗ ΑΜΜΟΣ	Γ-3	23,5	35	2,52	860	-39	7,62	576,2
ΜΥΡΙΣΗΣ	Π-8	21,8	23	3,12	751	-74	8,35	503,2
ΑΝΩ ΠΟΤΑΜΙΑ	Π-2	19,9	26	3,9	669	-62	8,1	448,2
ΠΗΓΗ ΑΡΙΩΝ	Π-3	18	31	4,55	431	-84	8,5	288,8
ΜΕΛΑΝΕΣ	Π-6	28	27	3,62	785	-59	8,12	526,0
ΚΑΛΑΝΤΟΣ	Γ-1	30	30	3,7	1659	-62	8	1111,5
ΤΣΙΚΑΛΑΡΕΙΟ	Π-9	21,5	28	4,47	755	-74	8,33	505,9
ΓΛΙΝΑΔΟ	Φ-1	30,8	28	3,82	454	-78	8,45	304,2
ΜΙΚΡΗ ΒΙΓΛΑ	Φ-3	29,5	28	5,2	1381	-57	8,12	925,3

9.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι εργαστηριακές αναλύσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας και Γεωλογίας του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

Ποσοτικός προσδιορισμός του Ca^{2+} και Mg^{2+}, της ολικής σκληρότητας, της παροδικής σκληρότητας, των οξυανθρακικών ιόντων (HCO_3^-) και των ιόντων χλωρίου (Cl^-) έγινε με τιτλοδότηση. Συγκεκριμένα, για την ποσοτική ανίχνευση της ολικής σκληρότητας και των οξυανθρακικών ιόντων, έγινε τιτλοδότηση με EDTA 0,01N, ενώ για την ανθρακική σκληρότητα έγινε τιτλοδότηση με HCl 0,01N.

Η σκληρότητα διακρίνεται σε μόνιμη (permanent hardness) και παροδική (carbonate or temporary hardness). Το άθροισμα της μόνιμης και της παροδικής είναι η ολική σκληρότητα (total hardness). Ως παροδική σκληρότητα ορίζεται το σύνολο των όξινων ανθρακικών αλάτων, ενώ η ολική σκληρότητα (H_t), η οποία εκφράζεται σε ισοδύναμο $CaCO_3$ σε mg/lt, δίνεται από τη σχέση:

$$H_t = 2,5 \times (Ca^{2+}) + 4,1 \times (Mg^{2+})$$

Οι συγκεντρώσεις των Ca^{2+} και Mg^{2+} εκφράζονται σε mg/lt, ενώ οι ταξινομήσεις που έχουν προταθεί αναλόγως της ολικής σκληρότητας του νερού εκφρασμένης σε ισοδύναμο $CaCO_3$, παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.4.

Πίνακας 9.4: Ταξινομήσεις σύμφωνα με την ολική σκληρότητα του νερού (Καλλέργης, 2000).

Χαρακτηρισμός του νερού	Κατά Sawyer - Mc Carty (1967)		Κατά Hem (1970)	
	Ισοδύναμο $CaCO_3$ (mg/lt)	Γαλλικοί βαθμοί	Ισοδύναμο $CaCO_3$ (mg/lt)	Γαλλικοί βαθμοί
Μαλακό	0 - 75	0 – 7,5	0 - 60	0 - 6
Μέτρια σκληρό	76 - 150	7,6 - 15	61 - 120	6,1 - 12
Σκληρό	151 - 300	15,1 - 30	121 - 180	12,1 - 18
Πολύ σκληρό	>300	>30	>180	>180

Άλλες μονάδες μέτρησης για τη σκληρότητα του νερού είναι οι γερμανικοί, οι αγγλικοί και οι αμερικάνικοι βαθμοί. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κυρίως οι γερμανικοί και οι γαλλικοί βαθμοί, όπου ο γερμανικός βαθμός ισοδυναμεί με 10 mg/lt CaO, ενώ ο γαλλικός με 10 mg/lt $CaCO_3$.

Τα φωσφορικά (PO_4^{3-}), τα θειικά (SO_4^{2-}), τα νιτρικά (NO_3^-), τα αμμωνιακά (NH_4^+) και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου εκπομπής HACH DR-3000.

Τα στοιχεία Na^+ και K^+ προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του φλογοφωτόμετρου (Flamephotometer INTECH/420).

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων με τον υπολογισμό της ηλεκτρο-ουδετερότητας. Η ακρίβεια των χημικών αναλύσεων είναι συνάρτηση των στατιστικών σφαλμάτων που οφείλονται σε τυχαίες διακυμάνσεις της αναλυτικής διαδικασίας και των συστηματικών σφαλμάτων, που οφείλονται σε συστηματικές αποκλίσεις της αναλυτικής διαδικασίας, λόγω ελαττωματικής εκτέλεσης ή παρεμβολών κατά την ανάλυση. Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να εντοπιστούν με τον υπολογισμό της ηλεκτρο-ουδετερότητας Ε.Ν.%, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$E.N.(\%) = \frac{\sum \kappa\alpha\tau\iota\acute{o}\nu\tau\omega\nu - \sum \alpha\nu\iota\acute{o}\nu\tau\omega\nu}{\sum \kappa\alpha\tau\iota\acute{o}\nu\tau\omega\nu + \sum \alpha\nu\iota\acute{o}\nu\tau\omega\nu} * 100$$

Όπου: $\Sigma\kappa\alpha\tau\iota\acute{o}\nu\tau\omega\nu = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+$

$\Sigma\alpha\nu\iota\acute{o}\nu\tau\omega\nu = Cl^- + HCO_3^- + SO_4^{2-} + NO_3^-$

Τα κατιόντα και τα ανιόντα εκφράζονται σε meq/lt, ενώ η σχέση ισχύει για τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας μικρότερης των 2000 μS/cm. Τιμές ηλεκτρικής ουδετερότητας μικρότερες του 5%, χαρακτηρίζουν αποδεκτές χημικές αναλύσεις. Η ηλεκτρο-ουδετερότητα για όλες τις χημικές αναλύσεις ήταν μικρότερη του 5%, με αποτέλεσμα οι αναλύσεις να είναι αποδεκτές.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων νερού, παρουσιάζονται στους Πίνακες 9.5, 9.6 & 9.7.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 9.5, οι τιμές ολικής σκληρότητας των δειγμάτων νερού κυμαίνεται από 128 mg $CaCO_3$/lt έως 488 mg $CaCO_3$/lt. Το νερό των δειγμάτων χαρακτηρίζεται από σκληρό έως πολύ σκληρό, γεγονός που δικαιολογείται σε πρώτη φάση από το μεγάλο πάχος των ανθρακικών σχηματισμών στην περιοχή έρευνας, αλλά και από τον πολύ μικρό ρυθμό ανανέωσης των υπόγειων νερών, λόγω των μειωμένων βροχοπτώσεων και της μικρής δυναμικότητας κατείσδυσης.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το νερό για οικιακή χρήση δεν πρέπει να έχει ολική σκληρότητα πάνω από 80 mg $CaCO_3$/lt, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, το νερό των πηγών χρησιμοποιείται ώστε να εξασφαλιστεί η ύδρευση του νησιού.

Πίνακας 9.5: Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων για τη σκληρότητα (ολική, ανθρακική και μόνιμη) και το διοξείδιο του πυριτίου.

ΟΝΟΜΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΛΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (mg $CaCO_3$/lt)	ΑΝΘΡΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (mg $CaCO_3$/lt)	ΜΟΝΙΜΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (mg CaCO3/lt)	SiO_2 (mg/lt)
ΧΑΣΚΑ	Π-10	128	105	23	18
ΜΟΥΤΣΟΥΝΑ	Γ-2	480	305	175	23,8
ΑΓΙΑ	Π-1	222	175	47	9
ΛΥΩΝΑΣ	Φ-2	324	205	119	8,7
ΔΑΝΑΚΟΣ	Π-4	254	195	59	16,1
ΚΩΜΙΑΚΗ	Π-7	186	150	36	31,8
ΕΜΠΟΛΗ	Π-5	200	130	70	26,2
ΨΙΛΗ ΑΜΜΟΣ	Γ-3	436	355	81	12,6
ΜΥΡΙΣΗΣ	Π-8	304	225	79	31,5
ΑΝΩ ΠΟΤΑΜΙΑ	Π-2	302	245	57	25
ΠΗΓΗ ΑΡΙΩΝ	Π-3	232	185	47	9,4
ΜΕΛΑΝΕΣ	Π-6	302	245	57	21,7
ΚΑΛΑΝΤΟΣ	Γ-1	396	230	166	17,4
ΤΣΙΚΑΛΑΡΕΙΟ	Π-9	276	200	76	41,5
ΓΛΙΝΑΔΟ	Φ-1	150	125	25	20,8
ΜΙΚΡΗ ΒΙΓΛΑ	Φ-3	488	320	168	20,5

Πίνακας 9.6: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων για τα κατιόντα.

ΟΝΟΜΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	Ca^{2+} (mg/lt)	Mg^{2+} (mg/lt)	Na^{+} (mg/lt)	K^{+} (mg/lt)	NH_4^{+} (mg/lt)
ΧΑΣΚΑ	Π-10	44,8	3,8	32,3	2,5	0,013
ΜΟΥΤΣΟΥΝΑ	Γ-2	136	33,8	123	5,7	0,077
ΑΓΙΑ	Π-1	69,6	11,6	51	4,3	0,013
ΛΥΩΝΑΣ	Φ-2	94,4	21,2	88,7	4,5	0,065
ΔΑΝΑΚΟΣ	Π-4	84	10,6	35,7	1,8	0,013
ΚΩΜΙΑΚΗ	Π-7	60	8,7	53,7	4,5	0,052
ΕΜΠΟΛΗ	Π-5	56,8	14,0	49,7	4,6	0,026
ΨΙΛΗ ΑΜΜΟΣ	Γ-3	138,4	21,7	57,3	1,6	0,026
ΜΥΡΙΣΗΣ	Π-8	92	17,8	80,1	4,1	0,129
ΑΝΩ ΠΟΤΑΜΙΑ	Π-2	110,4	6,2	70,8	2,3	0,013
ΠΗΓΗ ΑΡΙΩΝ	Π-3	78,4	8,6	35	1,3	0,026
ΜΕΛΑΝΕΣ	Π-6	95,2	15,4	65,4	2	0,013
ΚΑΛΑΝΤΟΣ	Γ-1	97,6	36,8	150	11,2	0,039
ΤΣΙΚΑΛΑΡΕΙΟ	Π-9	70,4	24,2	90,1	5	0,077
ΓΛΙΝΑΔΟ	Φ-1	47,2	7,7	44,8	2,1	0,013
ΜΙΚΡΗ ΒΙΓΛΑ	Φ-3	123,2	43,5	107	5,8	0,103

Πίνακας 9.7: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων για τα ανιόντα.

ΟΝΟΜΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	HCO_3^- (mg/lt)	Cl^- (mg/lt)	SO_4^{2-} (mg/lt)	NO_3^- (mg/lt)	PO_4^- (mg/lt)
ΧΑΣΚΑ	Π-10	128,0	46,1	7,6	8,4	0,176
ΜΟΥΤΣΟΥΝΑ	Γ-2	372,0	340,4	34,5	12,8	0,155
ΑΓΙΑ	Π-1	213,4	78,0	17,5	7,0	0,169
ΛΥΩΝΑΣ	Φ-2	250,0	241,1	19,4	11,0	0,269
ΔΑΝΑΚΟΣ	Π-4	237,8	70,9	13,5	13,6	0,186
ΚΩΜΙΑΚΗ	Π-7	182,9	92,2	15,4	4,8	0,377
ΕΜΠΟΛΗ	Π-5	158,5	95,7	18,6	6,2	0,206
ΨΙΛΗ ΑΜΜΟΣ	Γ-3	432,9	163,1	15,7	8,8	0,176
ΜΥΡΙΣΗΣ	Π-8	274,4	131,2	25,2	4,4	0,336
ΑΝΩ ΠΟΤΑΜΙΑ	Π-2	298,8	109,9	12,7	7,5	0,224
ΠΗΓΗ ΑΡΙΩΝ	Π-3	225,6	70,9	12,9	8,8	0,137
ΜΕΛΑΝΕΣ	Π-6	298,8	159,6	11,8	11,9	0,27
ΚΑΛΑΝΤΟΣ	Γ-1	280,5	368,8	47,9	17,6	0,173
ΤΣΙΚΑΛΑΡΕΙΟ	Π-9	243,9	138,3	29,1	15,0	0,752
ΓΛΙΝΑΔΟ	Φ-1	152,4	70,9	8,5	7,9	0,293
ΜΙΚΡΗ ΒΙΓΛΑ	Φ-3	390,2	283,7	51,7	22,4	0,219

9.6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

9.6.1 Τριγραμμικά διαγράμματα Piper

Τα τριγραμμικά διαγράμματα είναι τα πιο εύχρηστα από τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται για τη γραφική παράσταση της χημικής σύστασης του νερού, γιατί προσφέρουν άμεση σύγκριση διαφόρων ποιοτήτων νερού (Καλλέργης, 2000). Στα τριγραμμικά διαγράμματα κατά Piper (1944) προβάλλονται τα κατιόντα στο αριστερό τρίγωνο και τα ανιόντα στο δεξιό τρίγωνο εκφρασμένα σε επί τοις εκατό του συνόλου των κατιόντων σε meq/l. Στη συνέχεια τα δυο σημεία, που αντιστοιχούν στο ίδιο δείγμα, προβάλλονται στον κεντρικό ρόμβο, όπου το σημείο αυτό παρουσιάζει την ολική ιοντική κατανομή.

Από τον παραπάνω χάρτη της Εικόνας 9.2, είναι εμφανές ότι τα υδροσημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση της υδροχημικής κατάστασης των υπόγειων νερών, συγκεντρώνονται κυρίως στα μάρμαρα και τους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, ενώ ένα υδροσημείο βρίσκεται στο μιγματίτη, ένα υδροσημείο βρίσκεται στους αμφιβολίτες και άλλα δύο υδροσημεία στο γρανοδιορίτη.

Από το διάγραμμα Piper που παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.3, προκύπτει ότι το νερό των πηγών που εκφορτίζουν στα μάρμαρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασβεστούχο-οξυανθρακικό σε μερικές περιπτώσεις ή νερό στο οποίο δεν επικρατεί κάποιο ιόν στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η σύσταση αυτή δικαιολογείται άμεσα από τη γεωλογία, καθώς το συγκεκριμένο νερό ρέει μέσα στα μάρμαρα, και κατά τη διάβρωση αυτών μέσω της διάλυσης, έχει εμπλουτιστεί το νερό στα συστατικά αυτά. Αυτό σημαίνει ότι η κυκλοφορία των υπόγειων νερών είναι περιορισμένη και δεν ξεπερνά, σε σημαντικό βαθμό, τα όρια της συγκεκριμένης λιθολογικής φάσης.

Ακόμη, από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι το νερό των πηγών που εκφορτίζουν στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασβεστούχο-οξυανθρακικό ή ως νερό στο οποίο δεν επικρατεί κάποιο ιόν. Από βιβλιογραφικά δεδομένα προκύπτει επίσης ότι το νερό των πηγών που εκφορτίζουν στην ίδια λιθολογία μπορεί να χαρακτηριστεί επίσης ως νατριούχο-χλωριούχο ή ως καλιούχο-χλωριούχο (Χαρμανίδης, 2002). Στις περιπτώσεις όπου υφίσταται η νατριούχος ή καλιούχος σύσταση, αυτή δικαιολογείται από τη γεωλογία, καθώς το νερό στις συγκεκριμένες περιπτώσεις ρέει μέσα στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και η υπόγεια ροή του νερού περιορίζεται στη συγκεκριμένη λιθολογική φάση. Όμως στις περιπτώσεις όπου το νερό είναι ασβεστούχο-οξυανθρακικό, σημαίνει ότι το νερό ρέει επί το πλήστον μέσα στα μάρμαρα και, μέσω της κίνησής του σε ρωγμές και ασυνέχειες, καταλήγει στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.

Σε γενικές γραμμές όμως, λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες τιμές κάθε ιόντος για κάθε λιθολογία (Εικόνα 9.4), φαίνεται ότι το νερό των πηγών έχει κινηθεί κυρίως μέσα σε ανθρακικούς σχηματισμούς (μάρμαρα), καθώς ανεξαρτήτως της λιθολογίας που προκύπτει από τη χωρική κατανομή τους, παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση ιόντων HCO_3^-, η οποία οφείλεται στη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων, ενώ η υψηλή συγκέντρωση ιόντων Cl^-, σχετίζεται με τη μεταφορά θαλάσσιων σταγονιδίων εξαιτίας των ισχυρών ανέμων και την εναπόθεσή τους στην επιφάνεια του εδάφους και στη συνέχεια εισχώρησή τους στο υπόγειο νερό.

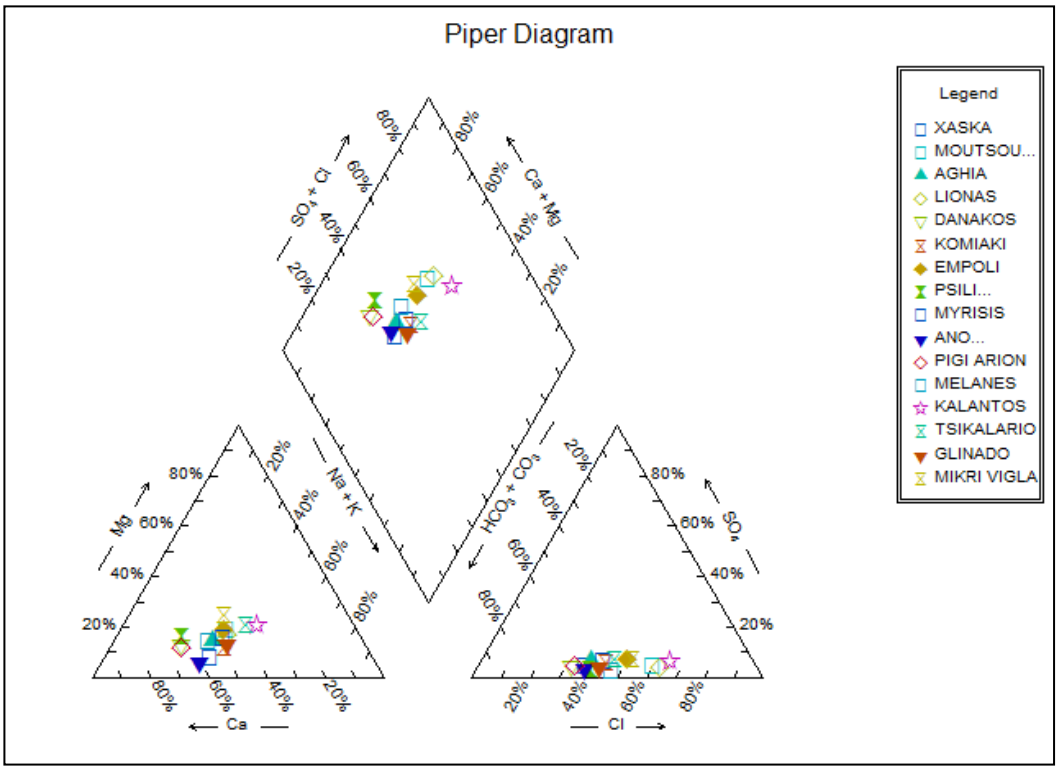
Τέλος διαπιστώνεται ότι τα νερά των πηγών χαρακτηρίζονται από περιορισμένη αλατότητα και η μικρή επιβάρυνσή τους σε ιόντα SO_4^{2-} ,NO_3^- και PO_4^- οφείλεται στη γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα, καθώς και στην έλλειψη πλήρους αποχετευτικού δικτύου για τα αστικά λύματα.

9.6.2 Διαγράμματα Schoeller

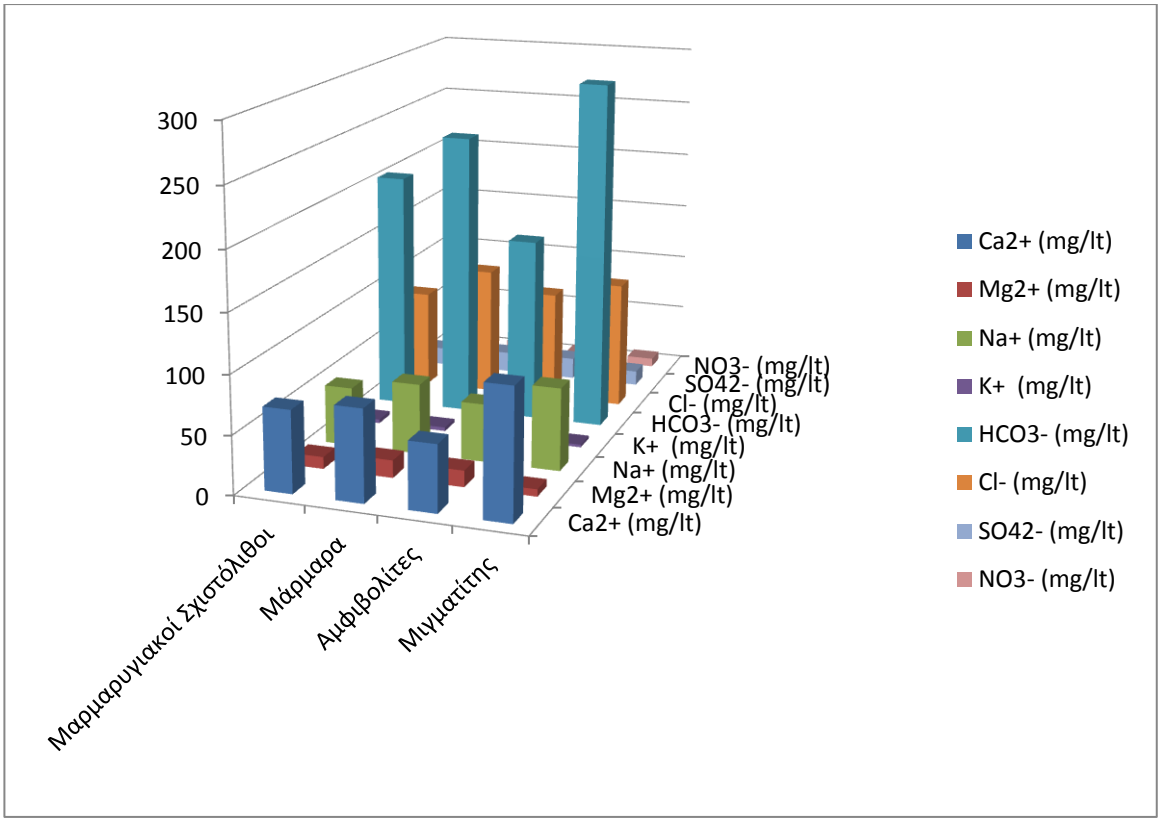
Τα διαγράμματα αυτά αναπτύχθηκαν από τον Schoeller (1962), με σκοπό την απεικόνιση και τη σύγκριση χημικών αναλύσεων νερών διάφορης προέλευσης. Στα διαγράμματα αυτά, οι συγκεντρώσεις των κυριότερων ιόντων παρουσιάζονται σε meq/l και σημειώνονται σε έξι ισαπέχοντες λογαριθμικούς άξονες. Η σειρά με την οποία παρουσιάζονται τα κυριότερα ιόντα είναι η εξής: ασβέστιο, μαγνήσια, νάτριο, χλώριο, θειική, οξυανθρακική και ουδέτερη ρίζα, ενώ τα σημεία αυτά στη συνέχεια ενώνονται με ευθύγραμμα τμήματα.

Η σύσταση του νερού των πηγών, των γεωτρήσεων και των πηγαδιών, σε όλες τις λιθολογικές φάσεις, είναι δυνατόν να απεικονιστεί καλύτερα στο διάγραμμα Schoeller (Εικόνα 9.4), όπου για κάθε υδροσημείο ξεχωριστά φαίνεται αναλυτικά η συγκέντρωση σε meq/l των κυριότερων ιόντων.

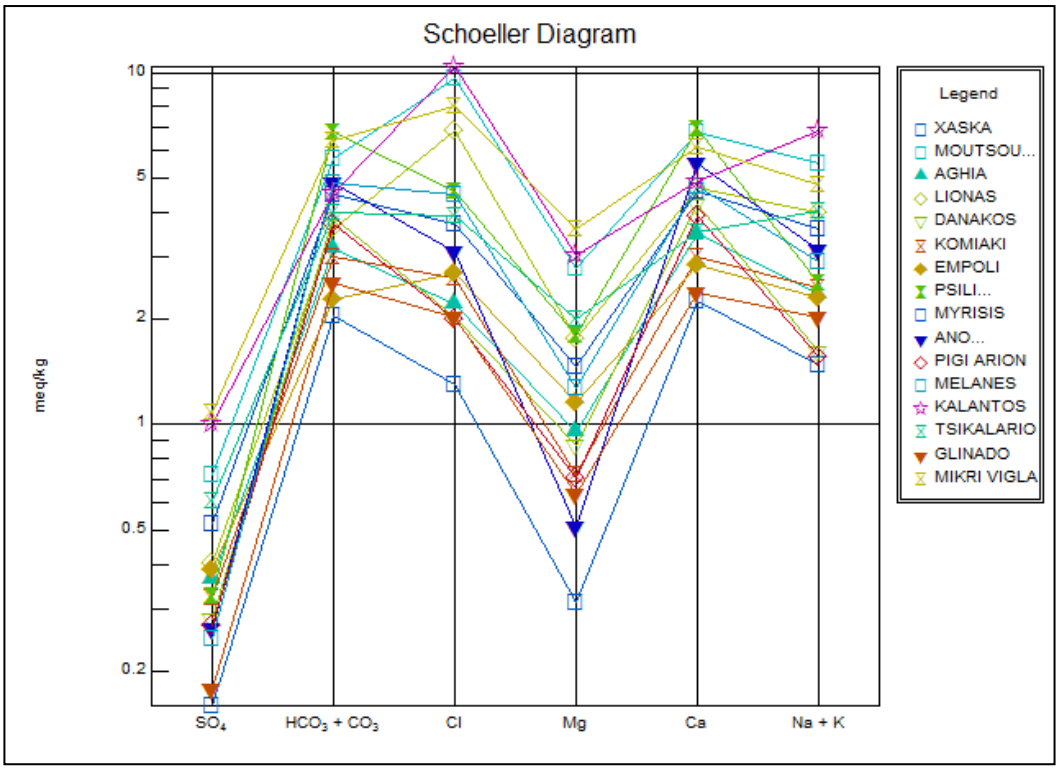
Έτσι, τόσο από το διάγραμμα Piper, όσο και από το διάγραμμα Schoeller που παρουσιάζονται στις εικόνες 9.3 και 9.5, προκύπτει ότι το νερό των γεωτρήσεων και των πηγαδιών εμφανίζουν όμοια σύσταση με αυτή των πηγών. Όμως, καθώς δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία των πηγαδιών και των γεωτρήσεων, δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν βάση της λιθολογίας στην οποία παρατηρείται η στάθμη του νερού.



Εικόνα 9.3: Διάγραμμα Piper των δειγμάτων νερού που αναλύθηκαν.



Εικόνα 9.4: Μέσες τιμές συγκέντρωσης ιόντων (mg/lt) για κάθε λιθολογική φάση.



Εικόνα 9.5: Διάγραμμα Schoeller των δειγμάτων νερού που αναλύθηκαν.

9.7 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΜΕΣΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Για τη συσχέτιση του υπόγειου νερού με το μέσο ασυνεχειών χρησιμοποιήθηκαν οι χημικές αναλύσεις και τα αποτελέσματα από την επιτόπια έρευνα στην περιοχή μελέτης.

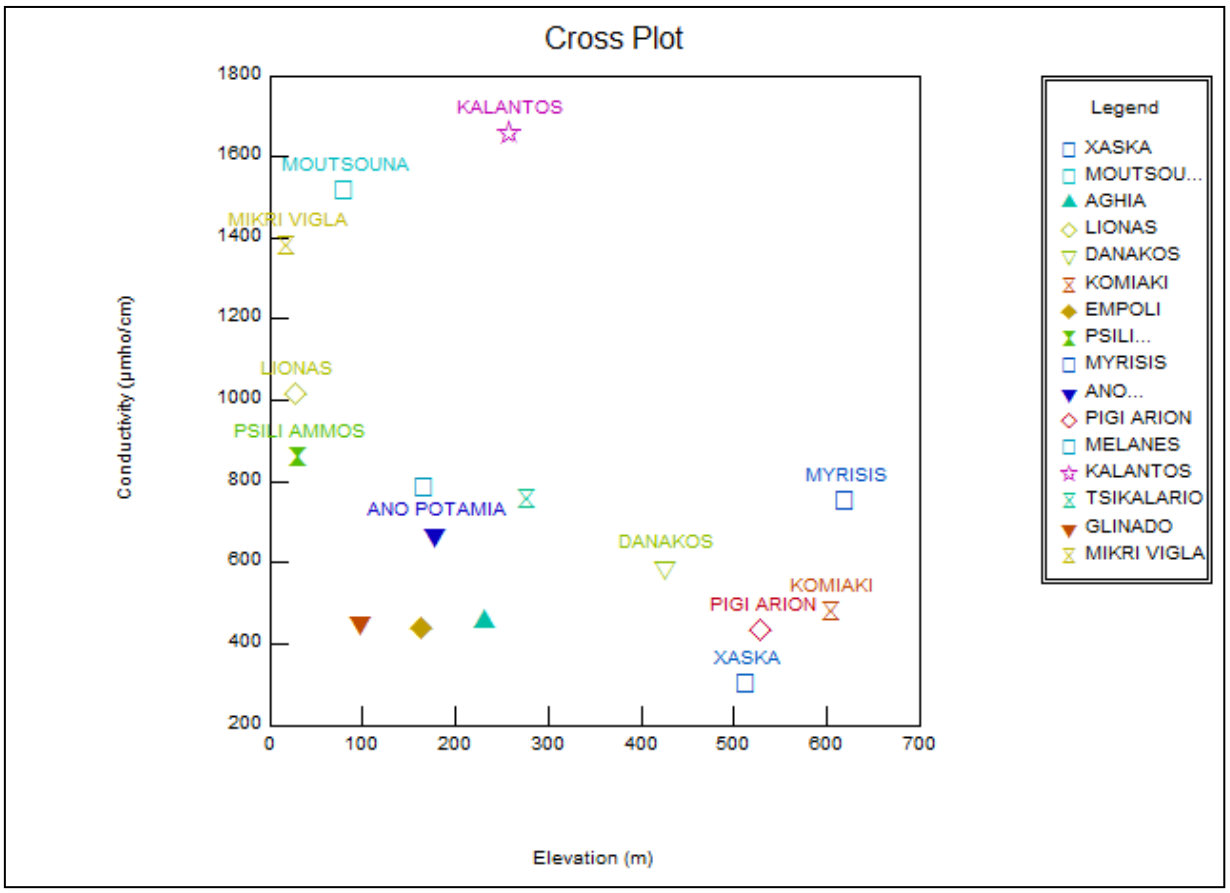
Ένας πρώτος τρόπος συσχέτισης του μέσου ασυνεχειών με το υπόγειο νερό, το οποίο εκφορτίζεται από τις πηγές είναι η διερεύνηση της μεταβολής της αγωγιμότητας σε σχέση με το υψόμετρο, καθώς όσο απομακρυνόμαστε από τη θάλασσα και το υψόμετρο αυξάνεται, η αγωγιμότητα των υπόγειων νερών μειώνεται αναλόγως. Αυτό συμβαίνει καθώς πηγές της νήσου Νάξου που εκφορτίζουν κοντά στη θάλασσα, το νερό τους να προέρχεται από υφαλμυρισμένους υπόγειους υδροφορείς και να παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση σε χλωριούχο νάτριο (Κουμαντάκης et al., 1990). Όμως, πηγές που βρίσκονται σε μεγάλα υψόμετρα, θα πρέπει το νερό τους να χαρακτηρίζεται από φυσιολογικές τιμές αγωγιμότητας. Στις περιπτώσεις όπου το νερό πηγών σε μεγάλα υψόμετρα παρουσιάζουν ασυνήθιστα μεγάλες τιμές αγωγιμότητας, σημαίνει ότι έχουν εμπλουτιστεί με άλατα (π.χ. νιτρικά), τα οποία σχετίζονται άμεσα με το μέσο ασυνεχειών, καθώς δεν προέρχονται από τη διάλυση συστατικών των πετρωμάτων, αλλά από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (π.χ. καλλιέργεια). Έτσι αυτές οι περιπτώσεις δείχνουν συσχέτιση μεταξύ του υπόγειου νερού και του μέσου ασυνεχειών, καθώς πρόκειται για νερό όπου κατά τη διάρκεια της απορροής και κατείσδυσής του μέσω των ρωγμών μετέφερε άλατα, τα οποία κατέληξαν στους υπόγειους υδροφορείς.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 9.5, προβλήθηκαν οι τιμές αγωγιμότητας που πάρθηκαν επιτόπια κατά τη διάρκεια της εργασίας υπαίθρου σε σχέση με το υψόμετρο. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αυτά είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το υψόμετρο, τόσο η τιμή της αγωγιμότητας μειώνεται. Όμως συγχρόνως παρατηρείται ότι υπάρχουν πηγές των οποίων το νερό παρουσιάζει αυξημένη αγωγιμότητα, μεγαλύτερη από 400 μS/cm, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι το νερό περιέχει αυξημένη ποσότητα διαλυμένων αλάτων, και συνεπώς υπάρχει άμεση συσχέτιση του υπόγειου νερού με το μέσο ασυνεχειών.

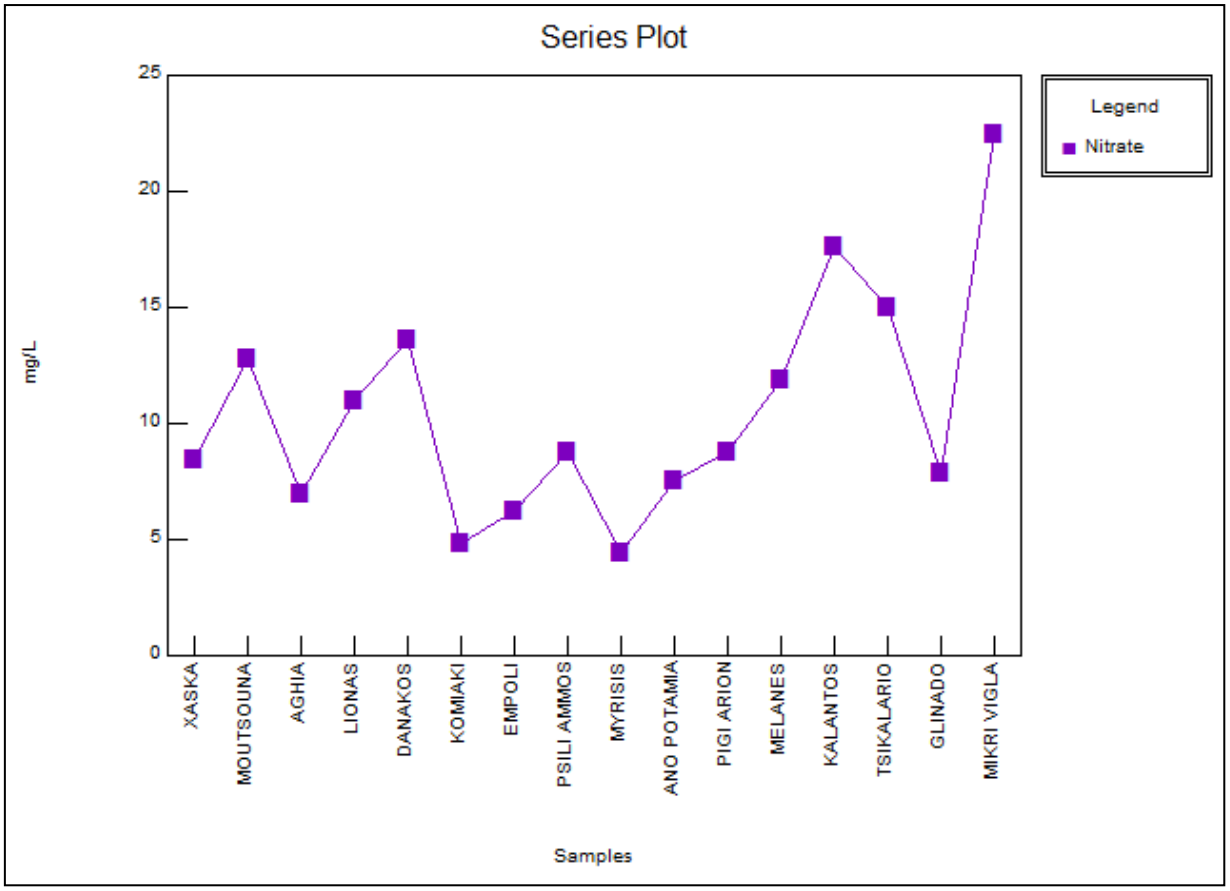
Ένας δεύτερος τρόπος που υποδεικνύει την άμεση σχέση της ποιότητας του υπόγειου νερού με το μέσο ασυνεχειών, είναι η αυξημένες τιμές νιτρικών που παρατηρήθηκαν στα νερά των πηγών. Καθώς είναι γνωστό ότι οι κάτοικοι της νήσου Νάξου ασχολούνται κυρίως με τη γεωργία και την κτηνοτροφία, υψηλές τιμές νιτρικών στα νερά των πηγών υποδεικνύουν ότι έχει κατεισδύσει μεγάλη ποσότητα νιτρικών προερχόμενα από τις καλλιέργειες, τις κτηνοτροφικές μονάδες ή ακόμα και από απόβλητα ή διαρροές βόθρων (Vasalakis et al., 2005), μέσω της κίνησης και της κατείσδυσης του νερού μέσω των ασυνεχειών.

Χρησιμοποιώντας τις χημικές αναλύσεις των νερών των πηγών, των γεωτρήσεων και των πηγαδιών που πραγματοποιήθηκαν και προβάλλοντας τις τιμές αυτές σε συγκεντρωτικό διάγραμμα (Εικόνα 9.5), παρατηρείται ότι σε αρκετά από τα δείγματα νερού, η συγκέντρωση νιτρικών ξεπερνάει τα 10 mg/l, γεγονός που υποδεικνύει ότι συγκέντρωση νιτρικών καταλήγει στους υπόγειους υδροφορείς της νήσου μέσω της κατείσδυσης, αν θεωρηθεί ότι το νερό δεν υφίσταται επιτόπια ρύπανση. Το γεγονός ότι παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση νιτρικών στην υπόγεια υδροφορία του μεταμορφωμένου συστήματος, δεν υποδεικνύει μόνο τη συσχέτιση των υπόγειων υδάτων με το μέσο ασυνεχειών, αλλά προειδοποιεί ότι είναι αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της περιοχής για τον καθορισμό της τρωτότητας των υδάτων αυτών και τον προσδιορισμό μέτρων προστασίας.

Τέλος, αναφέρεται ότι η μελέτη της υδροχημείας στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της αξιοπιστίας του υδρογεωλογικού μοντέλου, καθώς η υδροχημεία δίνει μια εικόνα για το βάθος προέλευσης των δειγμώτων νερού, και με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίστηκε η έλλειψη δεδομένων στάθμης.



Εικόνα 9.6: Διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με το υψόμετρο των υδροσημείων δειγματοληψίας.



Εικόνα 9.7: Διάγραμμα συγκέντρωσης νιτρικών των δειγμάτων νερού.

Κεφάλαιο 10^{ο} - Το Κυκλαδικό Υδρογεωλογικό Μοντέλο

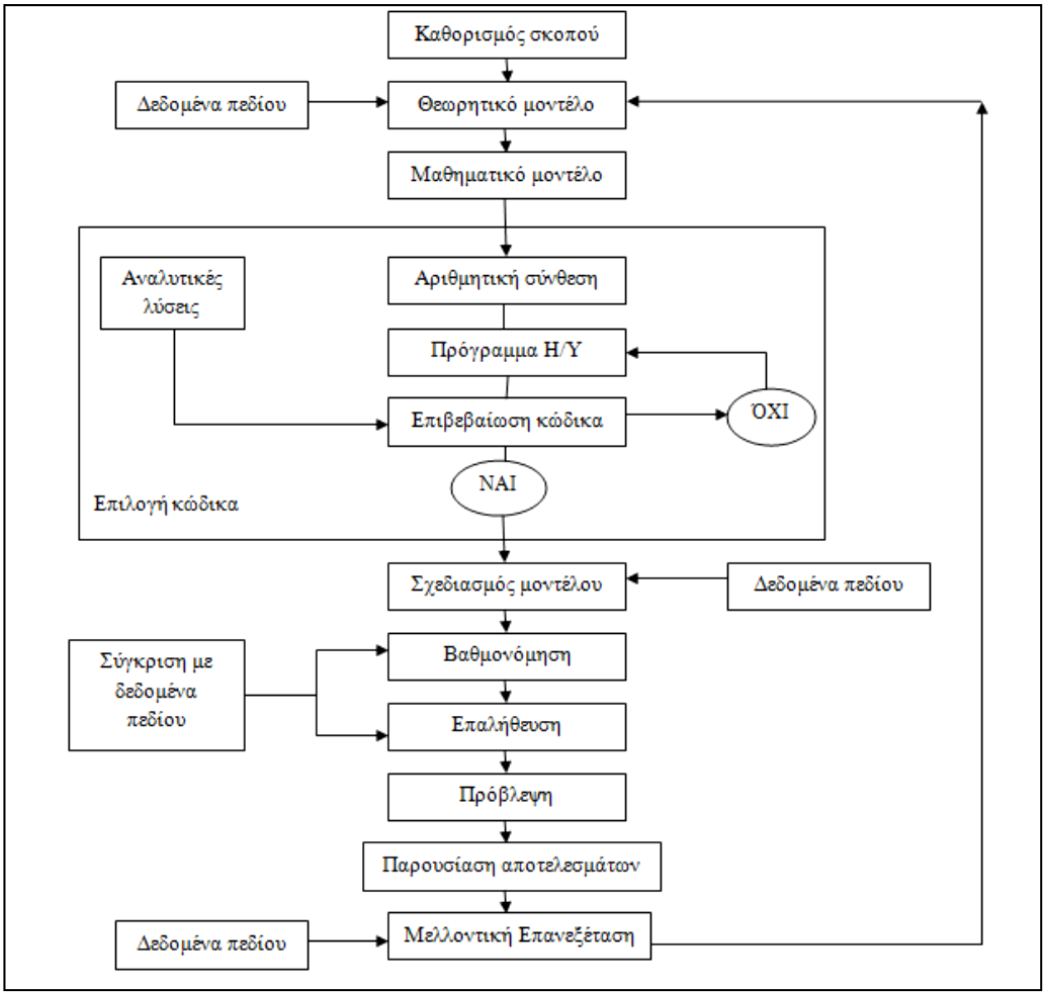
10. ΤΟ ΚΥΚΛΑΔΙΚΟ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

10.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μαθηματική προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων στη νήσο Νάξο, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η υδρογεωλογική δομή του μέσου ασυνεχειών της περιοχής μελέτης, οι διαδικασίες ροής και μεταβολής του πιεζομετρικού φορτίου μέσα σε αυτό, καθώς και να μελετηθεί η πιθανή εξέλιξη του υδατικού δυναμικού μέσα από το πρίσμα μελλοντικών σεναρίων λόγω κλιματικής αλλαγής.

Με τον όρο μαθηματική προσομοίωση ενός υπόγειου υδροφορέα νοείται η απεικόνιση αυτού του φυσικού συστήματος με τη μορφή μαθηματικών εξισώσεων, με σκοπό τη βελτίωση της κατανόησης της δομής του και των διαδικασιών ροής και μεταφοράς μάζας που το διέπουν, ενώ η πρακτική εφαρμογή της σε συγκεκριμένα προβλήματα έχει μεγάλη σημασία για την ορθολογική ανάπτυξη και διαχείριση των υδατικών πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος. Η μαθηματική προσομοίωση - μοντέλο της υπόγειας ροής περιλαμβάνει πέντε κύριες φάσεις (Anderson & Woessner, 1992, Εικόνα 10.1):

- Ανάπτυξη του μοντέλου. Στη φάση αυτή γίνεται η διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, ο καθορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς και η αρχική επιλογή των υδραυλικών παραμέτρων και των τάσεων - φορτίσεων.
- Βαθμονόμηση του μοντέλου. Στη φάση αυτή προσδιορίζεται το σύνολο των παραμέτρων και τάσεων που προσεγγίζουν καλύτερα τα πραγματικά υδραυλικά φορτία (πιεζομετρία) και την ποιότητα του ύδατος. Η βαθμονόμηση γίνεται είτε με την κλασική μέθοδο της δοκιμής και αποτυχίας (trial and error) είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης ρύθμισης (inverse modelling).
- Ευαισθησία των παραμέτρων του μοντέλου ως προς την αλλαγή των τιμών τους. Στη φάση αυτή μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου από το χρήστη, ώστε να μελετηθούν οι αλλαγές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.
- Επαλήθευση του μοντέλου. Στη φάση αυτή συγκρίνονται τα προσομοιωμένα δεδομένα που παράγει το μοντέλο με αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου, προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το μοντέλο που δομήθηκε.
- Προβλέψεις - μελλοντικά σενάρια. Στο στάδιο αυτό γίνεται επανεκτέλεση του μοντέλου, όπου η μαθηματική προσομοίωση εκτελείται διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους βαθμονόμησης και μεταβάλλοντας τις φορτίσεις εκείνες που εκτιμάται ότι πρόκειται να αλλάξουν στο μέλλον, όπως για παράδειγμα οι κλιματικές συνθήκες.



Εικόνα 10.1: Πρωτόκολλο μοντελοποίησης υπόγειας ροής (Anderson & Woessner, 1992).

10.2 Το Λογισμικο Προσομοιωσης FeFlow

Το λογισμικό πρόγραμμα (υπολογιστικός κώδικας) που χρησιμοποιήθηκε για τη μαθηματική προσομοίωση των υπόγειων υδατικών συστημάτων μέσου ασυνεχειών της νήσου Νάξου ήταν το FeFlow, και συγκεκριμένα η έκδοση 6.1.

Το FeFlow (Finite element subsurface Flow system) είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα προσομοίωσης της ροής των υπόγειων νερών και της μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε τρισδιάστατη ή δισδιάστατη μορφή, το οποίο αναπτύχθηκε από το Institute for Water Resources Planning and Systems Research Inc. (DHI-WASY GmbH) στο Βερολίνο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να περιγραφεί η χωρική και χρονική κατανομή των ρύπων στα υπόγεια ύδατα, για να μοντελοποιηθούν γεωθερμικές διαδικασίες, για να προσδιοριστεί η διάρκεια και ο χρόνος μετακίνησης των ρύπων στους υδροφορείς, για να οργανωθούν και να σχεδιαστούν στρατηγικές αποκατάστασης, καθώς και για να διευκολυνθεί

ο σχεδιασμός εναλλακτικών και αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης (Diersch, 2003).

Το λογισμικό είναι διαθέσιμο για συστήματα Windows, καθώς και για διάφορες πλατφόρμες Unix. Από την δημιουργία του το 1979, το λογισμικό αναβαθμίζεται συνεχώς. Ο πηγαίος κώδικάς του (source code) είναι γραμμένος σε ANSI C/C++ και περιλαμβάνει περισσότερες από 1.100.000 γραμμές. Χρησιμοποιείται ευρέως σαν εργαλείο μοντελοποίησης σε πανεπιστήμια, ερευνητικά ινστιτούτα, κυβερνητικά γραφεία και επιχειρήσεις (Diersch, 2003).

Επιπλέον, σημαντικό είναι το γεγονός ότι το λογισμικό μπορεί να αλληλεπιδράσει με διάφορες εφαρμογές Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, όπως είναι το ArcGIS, καθώς τα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της υπόγειας ροής, απαιτούν μία λεπτομερειακή γνώση των παραμέτρων πεδίου, όπως η αγωγιμότητα, η αποθηκευτικότητα, κ.τ.λ. Αυτές οι παράμετροι είναι δυνατόν να εισαχθούν στο μοντέλο προσομοίωσης μέσω δημιουργίας συμβατών αρχείων σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS 10.2 για τη δημιουργία των αρχείων αυτών.

10.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το FeFlow, όπως έχει προαναφερθεί χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση ροής ή και μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε υπόγεια υδροφόρα συστήματα, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μία συναρτησιακή σχέση (functional), η οποία σχετίζεται με την ίδια την μερική διαφορική εξίσωση. Η συναρτησιακή σχέση προϋποθέτει μία αντιστοιχία η οποία εκχωρεί έναν αριθμό σε κάθε εξίσωση που ανήκει σε κάποια τάξη. Είναι ένα ιδιαίτερο είδος εξίσωσης, όπου κάθε εξαρτημένη μεταβλητή είναι και μία εξίσωση. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου αυτής είναι η ακόλουθη (Bear, 1988):

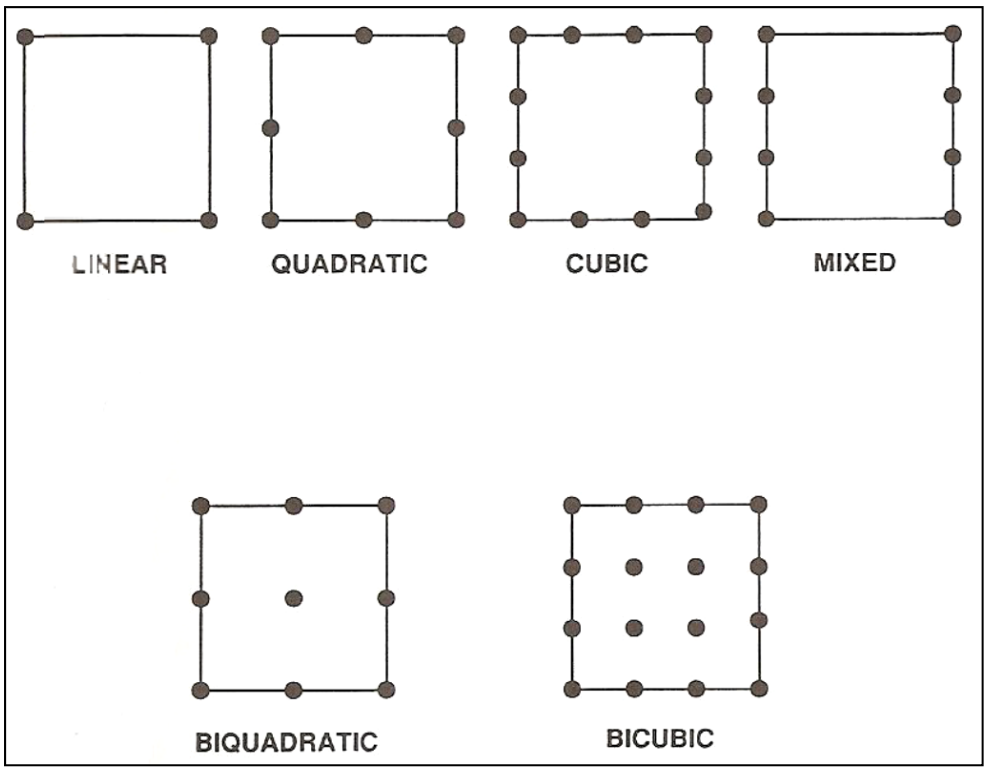
1. Εξάγεται το παραμετρικό πρόβλημα (variational problem) για την μερική διαφορική εξίσωση που διέπει την υπό εξέταση ροή.
2. Διαχωρίζεται το πεδίο σε στοιχεία.
3. Διαμορφώνεται η παραμετρική συναρτησιακή σχέση (variational functional) εντός του στοιχείου.

4. Λαμβάνονται παράγωγα σε σχέση με τις εξαρτημένες μεταβλητές σε όλους τους κόμβους του στοιχείου.
5. Συλλέγονται οι εξισώσεις για όλα τα στοιχεία.
6. Εκφράζονται οι οριακές συνθήκες σε όρους κομβικών τιμών.
7. Ενσωματώνονται οι οριακές συνθήκες στις εξισώσεις και λύνεται το πρόβλημα.

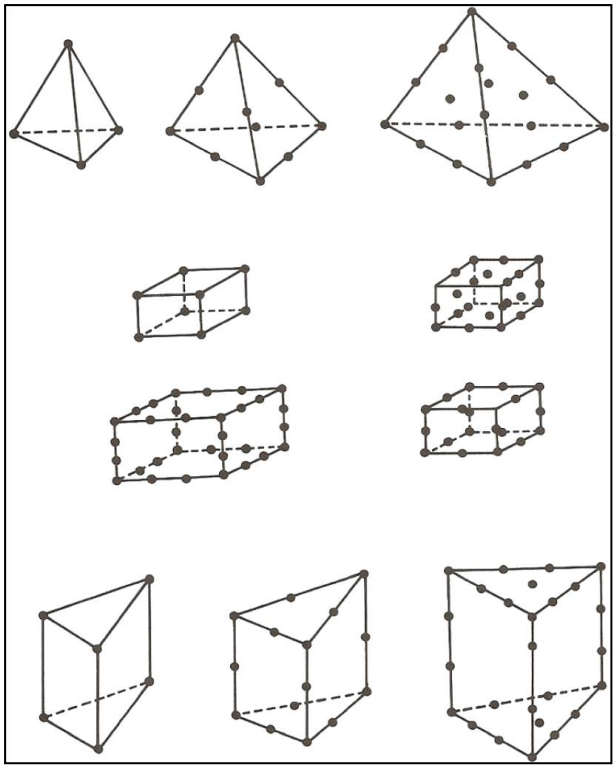
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο αποδοτική για την προσέγγιση ορίων με ανώμαλο σχήμα, καθώς είναι ευκολότερη η διευθέτηση των ξεχωριστών στοιχείων όπως επίσης και ο καθορισμός της θέσης των διαφόρων συνθηκών (αρχικών ή οριακών). Επίσης ορίζεται επακριβώς η διακύμανση του υδραυλικού ύψους εντός ενός στοιχείου με χρήση της μεθόδου της παρεμβολής. Τέλος, επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία όσο αφορά το σχεδιασμό του δικτύου των κόμβων (grid) λόγω των διαφορετικών σχημάτων των στοιχείων.

Τα μοντέλα που παράγονται μέσω αυτού του προγράμματος μπορεί να αναφέρονται είτε σε δύο είτε σε τρεις διαστάσεις αναλόγως με την επάρκεια των δεδομένων πεδίου, τον υπολογιστικό φόρτο και τον τρόπο, απλό ή πολύπλοκο, που θέλει ο μελετητής να αποδώσει την φυσική πραγματικότητα. Τα δισδιάστατα στοιχεία είναι είτε τρίγωνα είτε τετράεδρα, ενώ τα τρισδιάστατα στοιχεία είναι τετράεδρα, εξάεδρα ή πρίσματα (Εικόνες 10.2 & 10.3). Η φύση της παρεμβολής που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του υδραυλικού ύψους εντός του στοιχείου, ορίζει αν το στοιχείο θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό με τα γραμμικά στοιχεία να είναι αυτά που χρησιμοποιούνται συχνότερα (Anderson and Woessner, 1992).

Τα δισδιάστατο μοντέλα ενός φυσικού υπόγειου συστήματος, δημιουργούνται με την παραδοχή της οριζόντιας ροής, σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται έλλειψη δεδομένων πεδίου ή για λόγους απλότητας και υπολογιστικού φόρτου. Αποτελεί δηλαδή μία απλοποίηση του αντίστοιχου τρισδιάστατου και διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τα οριζόντια, τα κάθετα και τα αξονοσυμμετρικά. Τα τρισδιάστατα μοντέλα ενός φυσικού υπόγειου συστήματος, μπορεί να αποτελούνται από επιφάνειες (slices), όχι υποχρεωτικά επίπεδες, και στρώσεις (layers) είτε κατά την οριζόντια διεύθυνση, είτε κατά την κατακόρυφη, ανάλογα με το φαινόμενο που πρόκειται να μελετηθεί. Το κάθε επίπεδο (slice) διακριτοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και οι ενδιάμεσες στρώσεις (layers) δεν είναι τίποτα άλλο παρά η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών επιπέδων (δίκτυο πεπερασμένων πρισμάτων). Πρέπει όμως να τονιστεί πως ένα τρισδιάστατο μοντέλο αποδίδει καλύτερα την φυσική πραγματικότητα από ένα δισδιάστατο, όμως είναι πιο πολύπλοκο και απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο.



Εικόνα 10.2: Δισδιάστατα στοιχεία του μοντέλου.



Εικόνα 10.3: Τρισδιάστατα στοιχεία του μοντέλου.

10.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι κύριες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν από το λογισμικό FeFlow 6.1, στο υδρογεωλογικό μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής της νήσου Νάξου.

10.4.1 Εξίσωση ροής

Η εξίσωση ροής του νερού στο μοντέλο είναι η εξής:

$$S_o = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = Q_\rho + Q_{EB}, \text{ με i j = 1, 2, 3}$$

Όπου:

S_o: ο συντελεστής εναποθήκευσης (συμπιεστότητα)

h: το υδραυλικό ύψος

q_i^f : η ταχύτητα Darcy

Q_{EB}: ο παράγοντας της επεκταμένης προσέγγισης Boussinesq

Q_ρ: η συνάρτηση της ροής

10.4.2 Ταχύτητα Darcy

Η εξίσωση του Darcy περιγράφει την κίνηση του νερού σε ένα πορώδες μέσο σε μακροσκοπικό επίπεδο και επομένως αποτελεί την εξίσωση ροής του νερού. Η εξίσωση της ταχύτητας Darcy δίνεται από τον τύπο:

$$q_i^f = -K_{ij} f_m \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_o^f}{\rho_o^f} e_j \right), \text{ με i j = 1, 2, 3}$$

Όπου:

q_i^f : η ταχύτητα Darcy

K_{ij}: ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας

f_m: η καταστατική εξίσωση σχετιζόμενη με την πυκνότητα

h: το υδραυλικό ύψος

ρ^f , ρ_o^f : η πυκνότητα του νερού και η πυκνότητα αναφοράς του νερού αντίστοιχα

10.4.3 Το υδραυλικό ύψος

Το υδραυλικό ύψος υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$h = \frac{\rho^f}{\rho_o^f \times g} + x_l$$

Όπου:

h: το υδραυλικό ύψος

ρ^f, ρ_o^f: η πυκνότητα του νερού και η πυκνότητα αναφοράς του νερού αντίστοιχα

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

x_l: η ανύψωση σε καρτεσιανές συντεταγμένες υπό την επίδραση της βαρύτητας.

10.4.4 Η υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία το νερό ρέει μέσα στο πορώδες ενός γεωλογικού σχηματισμού και υπόλογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$K_{ij} = \frac{k_{ij} \times \rho_o^f \times g}{\mu_o^f}, \text{ με i j = 1, 2, 3}$$

Όπου:

K_{ij}: η υδραυλική αγωγιμότητα

k_{ij}: ο τανυστής της διαπερατότητας

ρ_o^f: η πυκνότητα αναφοράς του νερού

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

μ_o^f : η τιμή αναφοράς του δυναμικού ιξώδους

10.4.5 Οι αρχικές συνθήκες (initial conditions)

Αποτελούν τις τιμές των υδραυλικών υψών σε όλη την έκταση της υπό μελέτης περιοχής τη χρονική στιγμή για την οποία ξεκινάει η προσομοίωση της ροής, δηλαδή για t=0.

$$h(x_i, 0) = h_I(x_i)$$

Όπου:

h_I: η γνωστή, χωρικά μεταβαλλόμενη σχέση των αρχικών κατανομών των υδραυλικών υψών

10.4.6 Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions)

Από προεπιλογή, το FeFlow θεωρεί ότι δεν υφίσταται ροή. Για να επιτραπούν οι προσομοιώσεις της ροής στο μοντέλο, πρέπει να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες (boundary conditions). Το λογισμικό παρέχει τέσσερις βασικούς τύπους οριακών συνθηκών για τη ροή, τη μεταφορά μάζας και τη μεταφορά θερμότητας, ενώ υπάρχουν επιπρόσθετοι τύποι οριακών συνθηκών για τη ροή και τη μεταφορά θερμότητας. Συνολικά, οι τύποι οριακών συνθηκών που παρέχει το λογισμικό είναι οι εξής:

- 1ου είδους (τύπος του Dirichlet), ο οποίος περιγράφει ένα σταθερό δυναμικό σε έναν κόμβο με καθορισμένες οριακές τιμές του υδραυλικού ύψους.
- 2ου είδους (τύπος του Neumann), ο οποίος περιγράφει την εισροή νερού μέσα σε δισδιάστατα ή τρισδιάστατα στοιχεία.
- 3ου είδους (τύπος του Cauchy), ο οποίος χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις των ποταμιών, λιμνών και γνωστών υδραυλικών υψών.
- 4ου είδους (μοναδικός τύπος πηγαδιού), ο οποίος περιγράφει την άντληση ύδατος, θαρμότητας ή μάζας από έναν συγκεκριμένο κόμβο.
- 5ου είδους (τύπος με πολλαπλά πηγάδια), ο οποίος χρησιμοποιείται για την προσομοίωση επαναπλήρωσης ή άντλησης νερού από πηγάδια.
- 6ου είδους (τύπος μεταφοράς θερμότητας από γεώτρηση), ο οποίος χρησιμοποιείται για την προσομοίωση γεωθερμικών εγκαταστάσεων κλειστής διαδρομής.

Για τη προσομοίωση της υπόγειας ροής του νερού στο μέσο ασυνεχειών της νήσου Νάξου, χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες 1ου, 2ου και 4ου είδους. Πιο συγκεκριμένα, οι οριακές συνθήκες ροής 1ου είδους (τύπος του Dirichlet) περιγράφει ένα σταθερό δυναμικό σε έναν κόμβο, δηλαδή:

$$h(x_i, t) = h_1^R(t)$$

Όπου:

h_1^R: οι καθορισμένες οριακές τιμές του υδραυλικού ύψους.

Ενώ, οι οριακές συνθήκες 2ου είδους (τύπος του Neumann) περιγράφουν την κατακόρυφη εισροή νερού, σύμφωνα με τον τύπο:

$$q_{n_h}(x_i, t) = q_h^R(t) = -K_{ij} f_m \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_o^f}{\rho_o^f} e_j \right) n_i$$

Όπου:

q_{n_h}: η κανονική ροή του ρευστού σύμφωνα με το νόμο του Darcy

q_h^R: η καθορισμένη κανονική οριακή ροή του ρευστού

K_{ij}: ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας

f_m: η καταστατική εξίσωση σχετιζόμενη με την πυκνότητα

ρ^f , ρ_o^f : η πυκνότητα του νερού και η πυκνότητα αναφοράς του νερού αντίστοιχα

e_j: το μοναδιαίο διάνυσμα της ταχύτητας

n_i: το κανονικό μοναδιαίο διάνυσμα

Τέλος, οι οριακές συνθήκες 4ου είδους περιγράφουν την άντληση ή εκφόρτιση υπόγειου ύδατος από έναν συγκεκριμένο κόμβο και περιγράφονται από τον τύπο:

$$Q_\rho^w(x_i, t) = \sum_m Q_m^W \prod_i \{\delta(x_i - x_i^m\}$$

Όπου:

Q_ρ^w: η εξίσωση λειτουργίας του πηγαδιού, της γεώτρησης ή της πηγής

Q_m^w: η άντληση (γεώτρηση, πηγάδι) ή η εκφόρτιση (πηγή)

x_i^m: οι συντεταγμένες του υδροσημείου (πηγή, γεώτρηση ή πηγάδι)

10.4.7 <u>Εξίσωση ροής στις ασυνέχειες (discrete features)</u>

Το FeFlow, όπως προαναφέρθηκε, έχει τη δυνατότητα προσέγγισης της υπόγειας ροής σε μέσο ασυνεχειών, καθώς τα ρήγματα της περιοχής έρευνας εισάγονται στο μοντέλο ως δισδιάστατα στοιχεία, τα οποία διέπονται από το νόμο Hagen – Poiseulle (Dokou & Karatzas, 2012). Σύμφωνα με το νόμο αυτό ισχύει ότι:

$$v = -Kf_m(\nabla h + \alpha\eta_j)$$

Όπου:

v: η μέση ταχύτητα του νερού εντός του ρήγματος

K: η υδραυλική αγωγιμότητα

f_m: η καταστατική εξίσωση σχετιζόμενη με τη πυκνότητα του νερού

h: το υδραυλικό ύψος

α: ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων

η_j: το διάνυσμα της βαρύτητας.

Στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, ισχύει ότι:

$$K = \frac{b^2 \rho_f g}{12\mu_f} I$$

Όπου:

K: η υδραυλική αγωγιμότητα

b: το άνοιγμα του ρήγματος

ρ_f: η πυκνότητα του ρευστού

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

μ_f: το ιξώδες του ρευστού

I: ο μοναδιαίος πίνακας

Ενώ όσον αφορά την εκφόρτιση ενός ρήγματος, ισχύει ότι (Dokou & Karatzas, 2012):

$$Q = -\frac{\pi b^4}{8\mu_f}(\nabla h + \alpha \eta_j)$$

Όπου:

Q: η εκφόρτιση του ρήγματος

b: το άνοιγμα του ρήγματος

μ_f: το ιξώδες του ρευστού

h: το υδραυλικό ύψος

α: ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων

η_j: το διάνυσμα της βαρύτητας.

10.5 Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FEFLOW

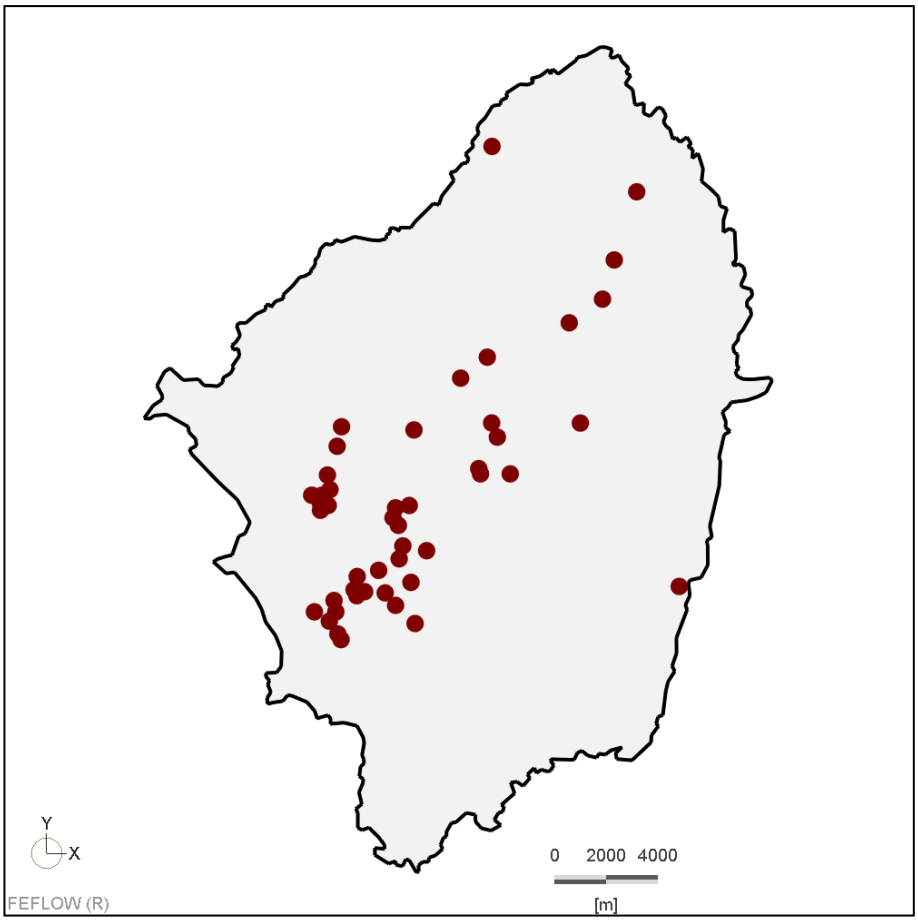
10.5.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν, προκειμένου να προσομοιωθεί μαθηματικά τα υπόγεια υδατικά συστήματα της νήσου Νάξου. Ουσιαστικά πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του υδραυλικού μέρους - ροής των υπόγειων υδατικών συστημάτων, με θεώρηση ενιαίας πυκνότητας νερού (γλυκό νερό), χωρίς μεταφορά μάζας. Αυτό έγινε προκειμένου να προσδιοριστούν οι εισροές νερού προς τους υδροφορείς και η υδραυλική αγωγιμότητα. Ο προσδιορισμός αυτός πραγματοποιήθηκε με τη διαδικασία της βαθμονόμησης, ενώ στο μοντέλο επιλύονται μόνο οι εξισώσεις ροής που παρουσιάστηκαν παραπάνω, καθώς δεν μελετάται η μεταφορά μάζας ή θερμότητας.

10.5.2 Οριοθέτηση της περιοχής (Supermesh)

Η δημιουργία του αρχικού αυτού πλαισίου έχει ως σκοπό την εισαγωγή όλων των βασικών γεωμετρικών πληροφοριών, οι οποίες είναι απαραίτητες στη συνέχεια για τη δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Το πλαίσιο αυτό ονομάζεται στο λογισμικό Supermesh και ουσιαστικά καθορίζονται τα εξωτερικά όρια της περιοχής έρευνας και η θέση των γεωτρήσεων.

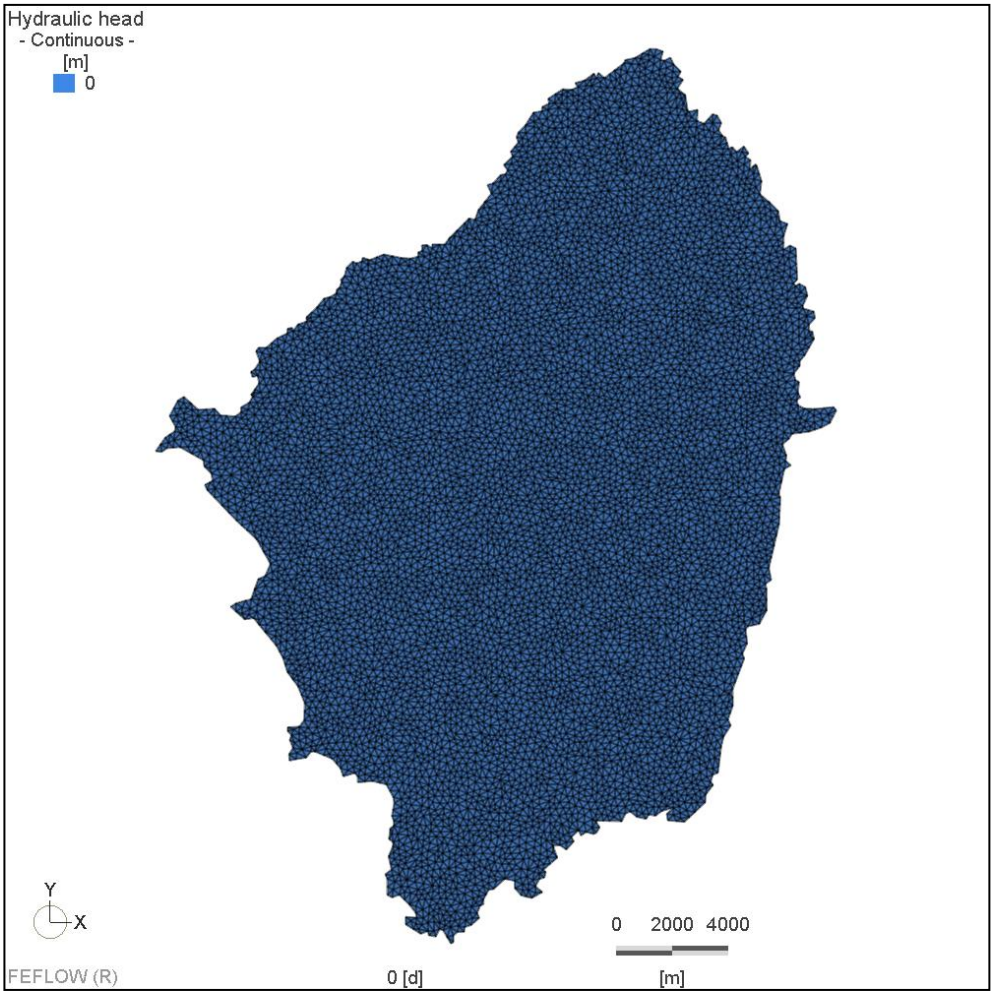
Πιο συγκεκριμένα, εισήχθηκαν αρχικά όλα τα απαραίτητα διανυσματικά αρχεία (vector files), τα οποία ήδη έχουν κατασκευαστεί στο ArcGIS. Τα αρχεία αυτά είναι η περιοχή μελέτης και οι γεωτρήσεις, για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα αντλήσεων. Στη συνέχεια, με την επιλογή Convert to Supermesh Polygons, οριοθετήθηκε το περίγραμμα της περιοχής έρευνας, ενώ με την επιλογή Convert to Supermesh Points εισήχθησαν οι θέσεις των γεωτρήσεων στο μοντέλο (Εικόνα 10.4). Σημειώνεται ότι το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς παραμένει το Ε.Γ.Σ.Α. ’87, καθώς αναγνωρίζεται από το λογισμικό ως ένα τοπικό σύστημα αναφοράς (Local Coordinate System).



Εικόνα 10.4: Καθορισμός των εξωτερικών ορίων της περιοχής προσομοίωσης, του υδρογραφικού δικτύου, των ασυνεχειών, καθώς και της θέσης των πηγών, των πηγαδιών και των γεωτρήσεων.

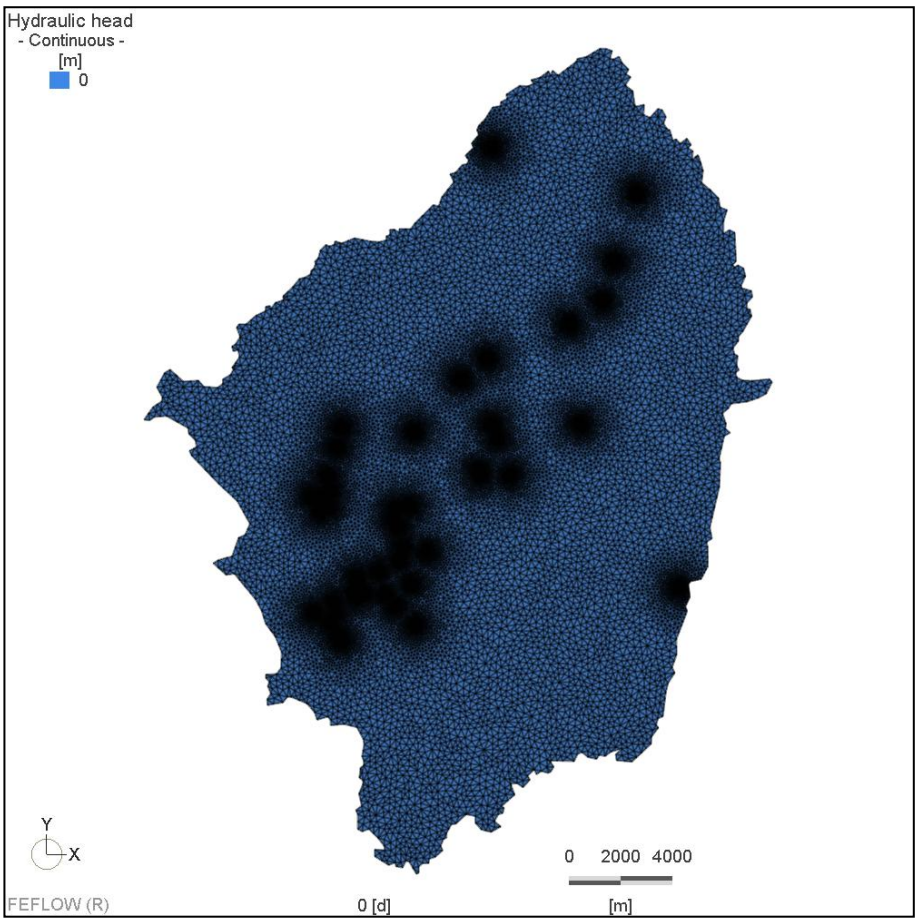
10.5.3 Δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh)

Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh) κατασκευάζεται μέσω της εργαλειοθήκης Generator. Εκεί εισάγονται οι επιλογές σχεδιασμού του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και οι εντολές για δημιουργία πιο πυκνών κόμβων στις περιοχές γύρω από τις γεωτρήσεις που προστέθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Η κατασκευή του δικτύου γίνεται αυτόματα σύμφωνα με μια από τις τρεις μεθόδους που προσφέρει το λογισμικό (Advancing Font, Triangle & Gridbuilder) και το πλήθος των κόμβων - πεπερασμένων στοιχείων που εισάγονται από το χρήστη, με αποτέλεσμα την οριζόντια διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε η μέθοδος Triangle, καθώς λειτουργεί καλύτερα σε πολύπλοκα όρια, όπως για παράδειγμα μια ακτογραμμή, ενώ το πλήθος των κόμβων επιλέχθηκε να είναι ίσο με 10000, ώστε η διακριτοποίηση να είναι αρκετά λεπτομερής, καθώς θα χρειαστεί αργότερα να επιλεχθούν οι κόμβοι που αντιστοιχούν στις ασυνέχειες της περιοχής έρευνας. (Εικόνα 10.5).



Εικόνα 10.5: Δίκτυο οριζόντιας διακριτοποίησης της περιοχής μελέτης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση κρίθηκε αναγκαία η πύκνωση των κόμβων κατά περιοχές μετά την κατασκευή του δικτύου, ώστε να δοθεί μια πιο ομαλή εικόνα και να αποκτήσουν μεγαλύτερη ακρίβεια οι υπολογισμοί του μοντέλου. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερη έμφαση κατά τη διάρκεια πύκνωσης δόθηκε στη θέση των γεωτρήσεων με στόχο την ακριβέστερη προσαρμογή της ζώνης διήθησης (όσον αφορά τις φορτίσεις) και της υδραυλικής αγωγιμότητας (όσον αφορά τις υδραυλικές παραμέτρους). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μεσω της εντολής Mesh Enrichment του μενού Generator Properties. Να σημειωθεί ότι το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι γραμμικό πρισματικής μορφής. Το τελικό αποτέλεσμα της δημιουργίας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.6.



Εικόνα 10.6: Δίκτυο οριζόντιας διακριτοποίησης της περιοχής μελέτης, με πύκνωση στις θέσεις των υδροσημείων (πηγές, πηγάδια και γεωτρήσεις) και περιμετρικά του υδρογραφικού δικτύου.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ σε αρκετές προσομοιώσεις η πύκνωση των κόμβων γίνεται και κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, ώστε να είναι ακριβέστερη η προσαρμογή της ζώνης διήθησης. Όμως, καθώς το σύνολο των υδατορεμάτων χαρακτηρίζεται από μεγάλες

κατά μήκος κλίσεις, μικρά πλάτη και σχετικά μεγάλα βάθη, ενώ η ροή τους είναι εποχιακή και εστιάζεται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα τους χειμερινούς μήνες, θεωρήθηκε προτιμότερο να μην γίνει πύκνωση των κόμβων, μιας και το υδρογραφικό δίκτυο θεωρήθηκε σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της δυναμικότητας κατείσδυσης στην περιοχή έρευνας.

10.5.4 Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

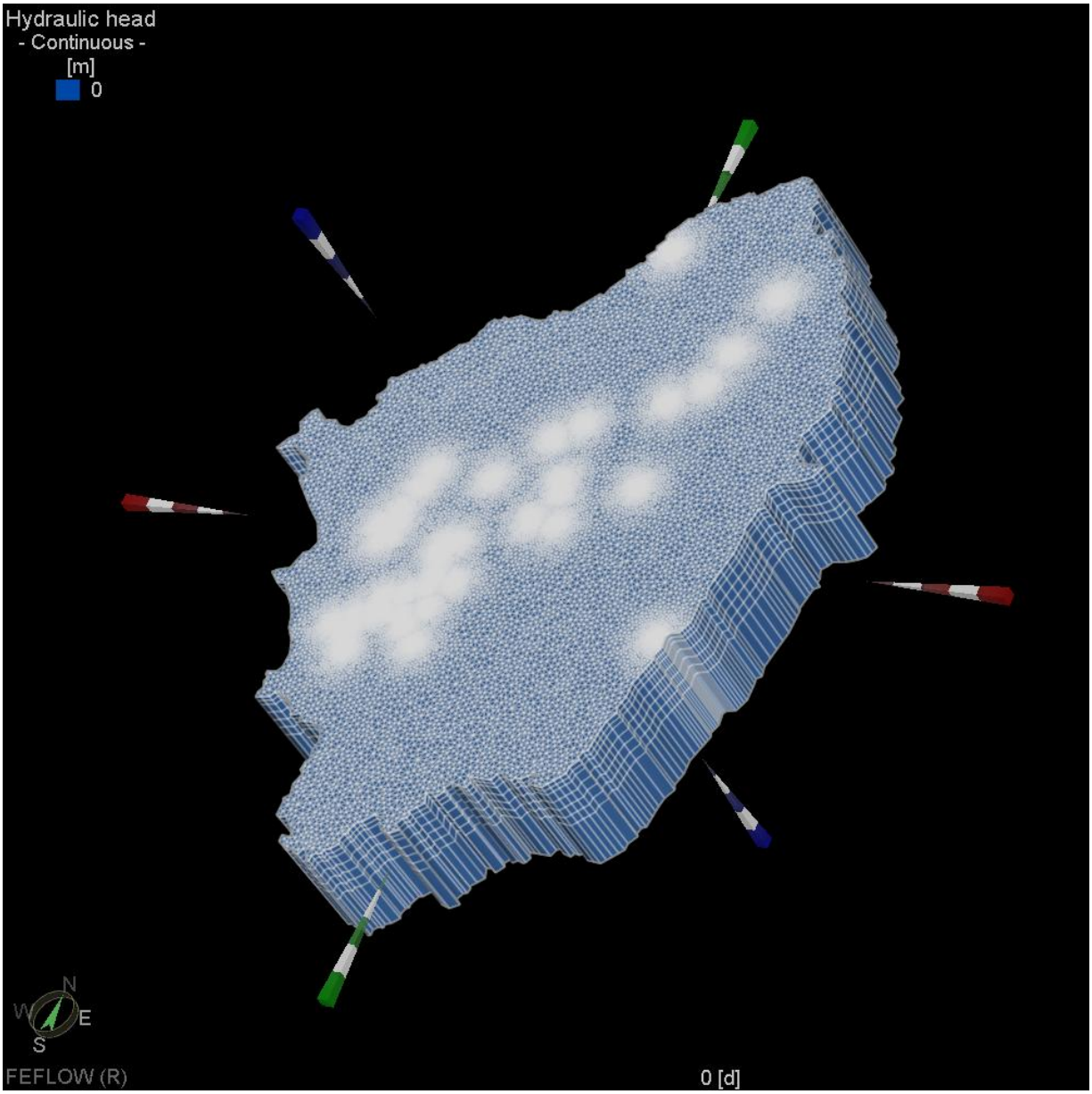
Μέχρι το σημείο αυτό, το δίκτυο που έχει προκύψει από τα προηγούμενα βήματα είναι δισδιάστατο, όμως στα πλαίσια της εργασίας αυτής απαιτείται η εισαγωγή και της τρίτης διάστασης, δηλαδή του βάθους. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από κομβικά επίπεδα, τα οποία ονομάζονται slices. Τα κομβικά αυτά επίπεδα θεωρούνται ως το άνω και κάτω επίπεδο του κάθε στρώματος (layer). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η δημιουργία 8 κομβικών επιπέδων και ως εκ τούτου 7 στρώματα μέσω του μενού 3D Layer Configuration (Πίνακας 10.1). Μετά το πέρας όλων των παραπάνω εργασιών το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων στην τελική του μορφή αποθηκεύεται ξεχωριστά, ώστε να μην αλλοιωθεί κατά τη διάρκεια των επόμενων βημάτων.

Πίνακας 10.1: Τα υψόμετρα που αντιστοιχούν σε κάθε κομβικό επίπεδο του τρισδιάστατου μοντέλου.

Κομβικό Επίπεδο (Slice)	Υψόμετρο (m)
1	0 έως 1000
2	-50
3	-100
4	-200
5	-300
6	-400
7	-500
8	-1000

Η εισαγωγή του υψομέτρου που αντιστοιχεί σε κάθε κομβικό επίπεδο πραγματοποιήθηκε μέσω του ίδιου μενού (3D Layer Configuration). Μοναδική περίπτωση αποτελεί το πρώτο κομβικό επίπεδο, καθώς λόγω της τοπογραφίας της περιοχής το υψόμετρο διαφέρει σε κάθε σημείο. Η εισαγωγή της τοπογραφίας περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Να σημειωθεί ότι το υψόμετρο των 0 m αντιστοιχεί στην επιφάνεια της θάλασσας. Η μορφή του τρισδιάστατου μοντέλου μετά τον καθορισμό των κομβικών επιπέδων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.7.

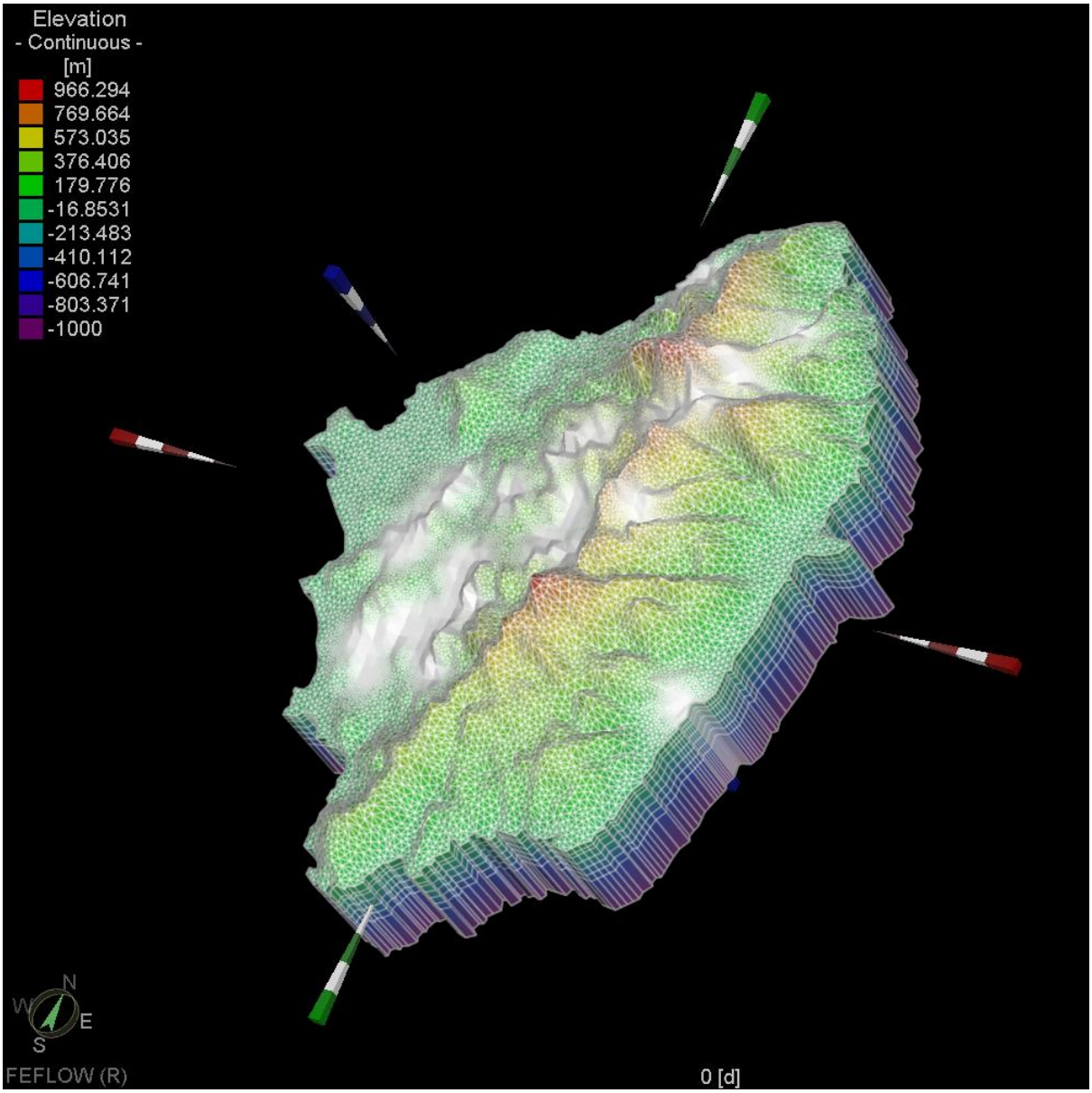
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα κομβικά επίπεδα επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα δεδομένα των υδραυλικών υψών και όχι με βάση τη στρωματογραφία, καθώς είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και επειδή πρακτικά η υδροφορία στη νήσο Νάξο θεωρείται ενιαία, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν σχηματισμοί που δεν επικοινωνούν υδρογεωλογικά. Έτσι, η παράμετρος της γεωλογίας εισήχθηκε στο μοντέλο μέσω της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους, διαδικασία η οποία περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 10.7: Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή των κομβικών επιπέδων (slices).

10.5.5 Εισαγωγή της τοπογραφίας

Για την εισαγωγή της τοπογραφίας, χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου, το οποίο παρουσιάστηκε προηγουμένως. Όμως, καθώς το FeFlow δεν αναγνωρίζει αρχεία σε πλεγματική μορφή (raster) κατασκευάστηκε κωδικοποιημένο αρχείο κειμένου ASCII (.dat), στο οποίο περιέχονται τα υψόμετρα για κάθε σημείο της περιοχής μελέτης. Το αρχείο αυτό εισήχθηκε στο λογισμικό και επιλέχθηκε η εισαγωγή των υψομέτρων στο τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μέσω της εντολής Link to Parameter. Η μορφή του τρισδιάστατου μοντέλου, μετά την εισαγωγή της τοπογραφίας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.8.



Εικόνα 10.8: Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή της τοπογραφίας.

10.5.6 Τάξη του προβλήματος (Problem Class)

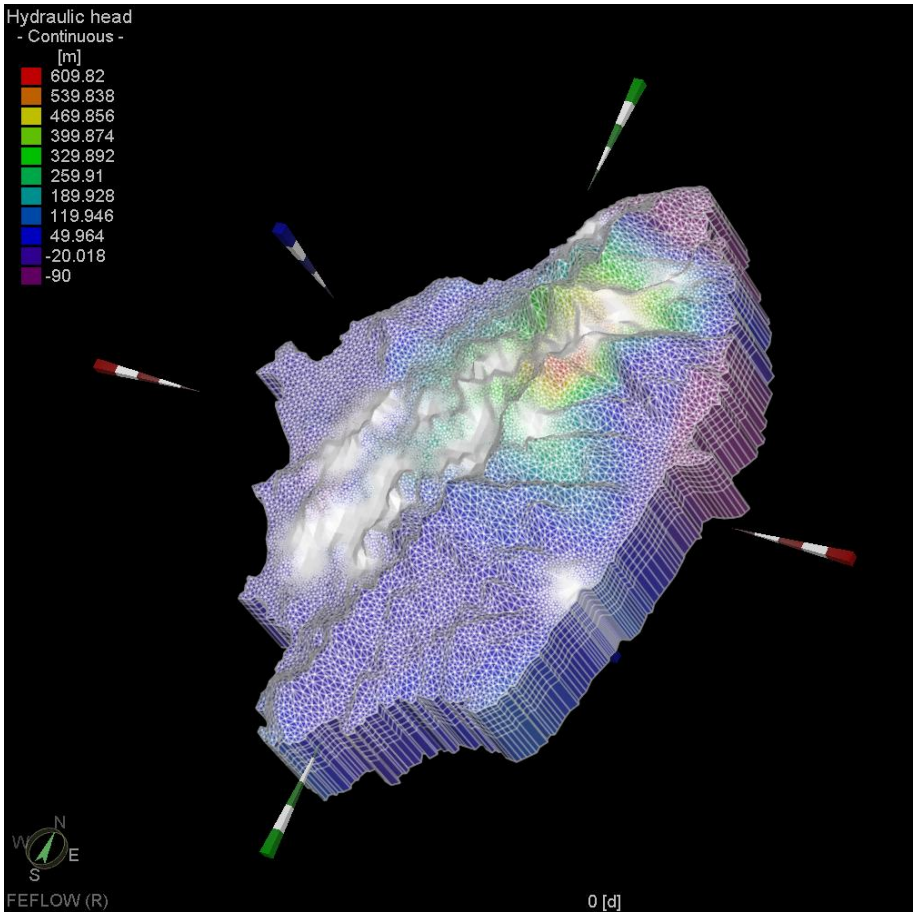
Το βήμα αυτό πραγματοποιείται για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου μέσω του Problem Settings του μενου Edit. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής επιλέχθηκε η ροή σε μη μόνιμες συνθήκες (trancient flow) στην κορεσμένη ζώνη (saturated media) ενός υπό πίεση υδροφορέα (confined aquifer). Η επιλογή αυτή έγινε με βάση τη γενικότερη γεωλογική δομή της νήσου, η οποία χαρακτηρίζεται από πολλές εναλλαγές μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων σε συνδυασμό με την παρουσία γεωλογικών σχηματισμών χαμηλής υδροπερατότητας. Η ανώτερη επιφάνεια του τέθηκε ελέυθερη και μετακινούμενη, δηλαδή ως ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας, ώστε να ενσωματωθούν οι τιμές των υδραυλικών υψών από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις, αλλά και για να εισαχθούν οι ασυνέχειες, με στόχο τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

10.5.7 Δεδομένα ροής (Flow Data)

10.5.7.1 Αρχικές συνθήκες (Flow Initials)

Οι αρχικές συνθήκες επιτρέπουν τον προσδιορισμό της επιφάνειας του υδροφορέα στην αρχή της διαδικασίας της προσομοίωσης. Η εισαγωγή των αρχικών συνθηκών, οι οποίες στην ουσία είναι οι τιμές του υδραυλικού φορτίου για χρόνο t=0 μέρες, πραγματοποίηκε με όμοιο τρόπο όπως έγινε η εισαγωγή της τοπογραφίας, μέσω ενός κωδικοποιημένου αρχείου κειμένου ASCII, το οποίο περιείχε την τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε πηγάδι και γεώτρηση της περιοχής έρευνας, καθώς και τις συντεταγμένες αυτών. Τόσο στις γεωτρήσεις, όσο και στα πηγάδια, οι μετρήσεις της στάθμης, για τον υπολογισμό του υδραυλικού φορτίου, πραγματοποιήθηκαν κατά τη θερινή περίοδο του 2000 (Μάιος - Οκτώβριος), οπότε πρακτικά η προσομοίωση ξεκινά από τον Μάιο του 2000.

Αφού εισήχθηκε το παραπάνω αρχείο, με τη χρήση της μεθόδου παρεμβολής Akima inter/extrapolation, υπολογίστηκε η τιμή του υδραυλικού φορτίου σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης (Εικόνα 10.9). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι αρχικές συνθήκες είναι σταθερές για όλα τα κομβικά επίπεδα, καθώς η τιμή του υδραυλικού φορτίου αφορά όλα τα κομβικά επίπεδα ανεξαρτήτου βάθους.



Εικόνα 10.9: Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή των τιμών του υδραυλικού φορτίου.

10.5.7.2 Οριακές συνθήκες (Flow Boundaries)

Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες 1ου, 2ου και 4ου είδους. Οι οριακές συνθήκες 1ου είδους εφαρμόστηκαν κατά μήκος της ακτογραμμής, ενώ οι οριακές συνθήκες 2ου είδους εφαρμόστηκαν σε όλη την υπόλοιπη επιφάνεια της νήσου, καθώς αφορούν το ρυθμό με τον οποίο εισρέει ή εκρέει νερό από τα υπόγεια υδατικά συστήματα. Οριακές συνθήκες 4ου είδους εφαρμόστηκαν στις περιοχές των πηγών γεωτρήσεις και πηγάδια), καθώς χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα παροχών και αντλήσεων.

Αναλυτικότερα, οι οριακές συνθήκες 1ου είδους εφαρμόστηκαν κατά μήκος της ακτογραμμής, καθώς στην περιοχή αυτή το γλυκό νερό έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό και χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των υδραυλικών υψών σε ισοδύναμα υδραυλικά ύψη, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Density Depend. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το υδραυλικό ύψος ορίστηκε ίσο με μηδέν για το πρώτο κομβικό επίπεδο, ενώ για τα υπόλοιπα ορίστηκε μια ισοδύναμη με το γλυκό νερό τιμή. Θεωρώντας τη πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με

1025 kg/m3, ο λόγος πυκνότητας α (density ratio) στην περίπτωση αυτή προκύπτει ίσος με 0,025 (Περάκη, 2013). Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των υδραυλικών υψών σε ισοδύναμα υδραυλικά ύψη είναι:

$$h_{eq} = (1 + a)h - az$$

Όπου:

h_{eq}: το ισοδύναμο υδραυλικό ύψος

h: το υδραυλικό ύψος

α: ο λόγος πυκνοτήτων

z: το υψόμετρο που αντιστοιχεί σε κάθε κομβικό επίπεδο

Στον Πίνακα 10.2 εμφανίζονται τα ισοδύναμα υδραυλικά ύψη, που προέκυψαν μέσω της προαναφερθείσας εξίσωσης και τα οποία εισήχθησαν στο τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης.

Οι οριακές συνθήκες 2ου είδους εφαρμόστηκαν στην υπόλοιπη επιφάνεια της περιοχής μελέτης, καθώς είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι εισροές και οι εκροές νερού στα υπόγεια υδατικά συστήματα, μέσω της κατανομής των υδραυλικών υψών που εισήχθηκαν στο μοντέλο μέσω των αρχικών συνθηκών.

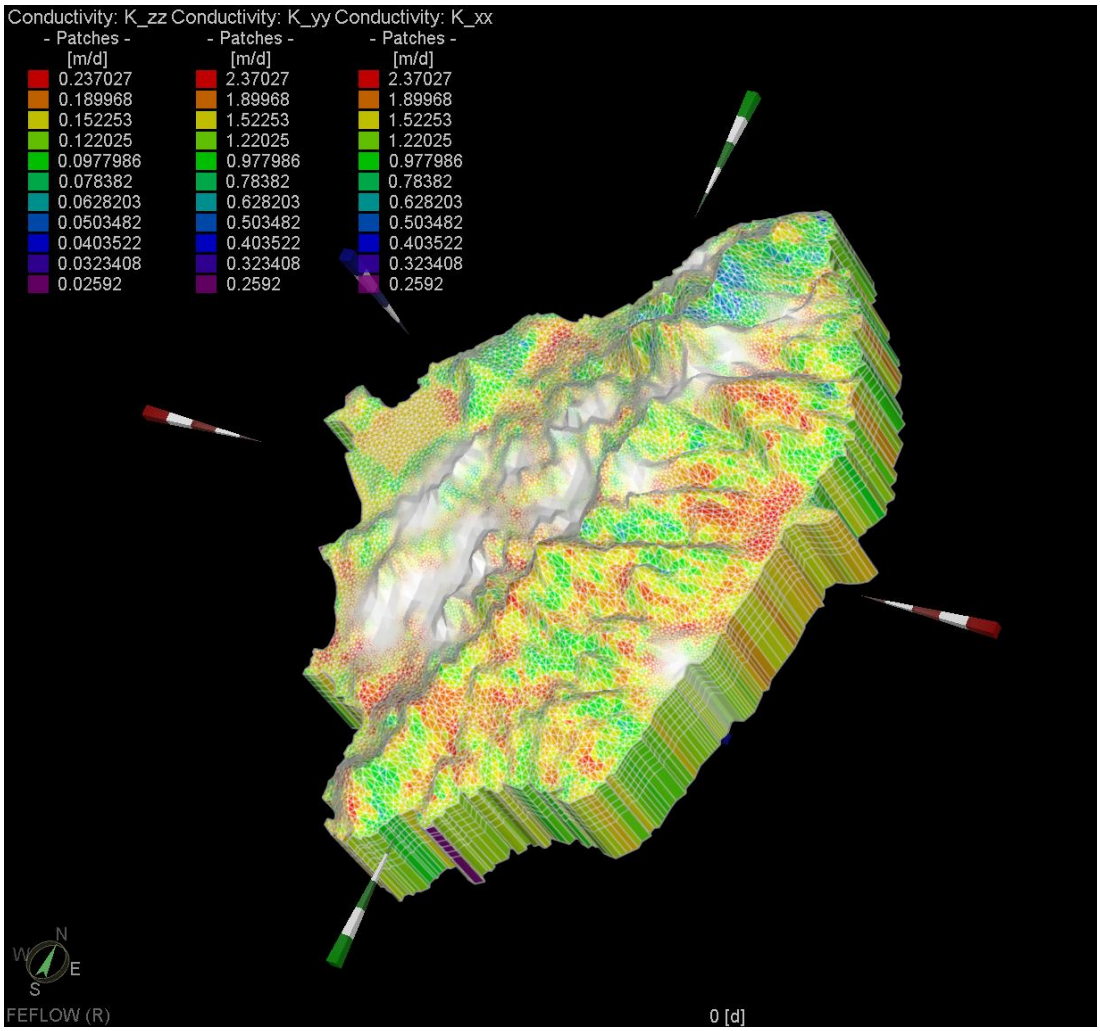
Τέλος οι οριακές συνθήκες 4ου είδους εφαρμόστηκαν στις θέσεις των γεωτρήσεων και των πηγών, καθώς μέσω των συνθηκών αυτών είναι δυνατή η εισαγωγή δεδομένων άντλησης από τις γεωτρήσεις και εκφορτίσεων (παροχών) των πηγών υπό μορφή χρονοσειρών. Μάλιστα όσον αφορά τις γεωτρήσεις, τα δεδομένα αντλήσεων προστέθηκαν στο αντίστοιχο βάθος με βάση το υδραυλικό φορτίο, με αποτέλεσμα το μοντέλο να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν στις πραγματικές συνθήκες.

Πίνακας 10.2: Τα ισοδύναμα υδραυλικά ύψη που αντιστοιχούν στις οριακές συνθήκες 1ου είδους.

Κομβικό Επίπεδο (Slice)	Υψόμετρο (m)	Υδραυλικό Ύψος (m)	Ισοδύναμο Υδραυλικό Ύψος (m)
1	0	0	0
2	-50	0	1,25
3	-100	0	2,5
4	-200	0	5
5	-300	0	7,5
6	-400	0	10
7	-500	0	12,5
8	-1000	0	25

10.5.8 Υδραυλική αγωγιμότητα γεωλογικών σχηματισμών

Για την εισαγωγή της υδραυλικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης (AHP analysis). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο τελικός χάρτης δυναμικότητας κατείσδυσης, όπου όσο μεγαλύτερη προέκυψε η δυναμικότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η υδραυλική αγωγιμότητα. Τα δεδομένα αυτά εισήχθηκαν στο λογισμικό σε διανυσματική μορφή (shapefile). Μέσω του μενού Flow Materials ορίστηκε η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}) που αντιστοιχεί σε κάθε είδος γεωλογικού σχηματισμού που απαντάται σε κάθε σημείο του ανώτερου στρώματος. Για να εισαχθεί και η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας συναρτήσει του βάθους, θεωρήθηκε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση του βάθους, και συγκεκριμένα λήφθηκε υπόψη ότι $K_{xx}=K_{yy}=0,1xK_{zz}$ βάση εμπειρικών δεδομένων (Εικόνα 10.10).



Εικόνα 10.10: Το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, μετά την εισαγωγή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας.

10.5.9 Ασυνέχειες (Discrete Elements)

Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή διακρίνεται από την ύπαρξη πολλαπλών ασυνεχειών, επομένως για την επίτευξη μιας άρτιας προσομοίωσης της υπόγειας ροής είναι αναγκαία η εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τις ασυνέχειες αυτές. Ο ορισμός της θέσης των ασυνεχειών έγινε με τη χρήση δισδιάστατων, τριγωνικών, οριζόντιων στοιχείων (2D triangular horizontal elements), μέσω της χρήσης του αντίστοιχου διανυσματικού αρχείου (shapefile) που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή μεθόδων τηλεπισκόπισης και εργασίας υπαίθρου. Ο νόμος που εφαρμόστηκε είναι του Haagen - Poiseuille, ενώ το πάχος και το άνοιγμα των ασυνεχειών ορίστηκε ίσο με 0.005 m. Οι τιμές αυτές δεν ορίστηκαν τυχαία, καθώς τιμή ανοίγματος και τιμή πάχους ίση με 0,005 m είναι συνήθης τιμή ανοίγματος και πάχους ρηγμάτων και διακλάσεων (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

10.5.10 Κατείσδυση ύδατος

Κάθε είδους γεωλογικού σχηματισμού επιτρέπει τη κατείσδυση διαφορετικού ποσοστού ύδατος από εκείνο που προκύπτει από τις βροχοπτώσεις. Για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν οι κατεισδύσεις που προέκυψαν από την εκτέλεση του μοντέλου SWAT για τις δυο περιόδους προσομοίωσης (1958-2010 & 2011-2100), οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

Για την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου, επιλέχθηκε η προσομοίωση να ξεκινά από το Μάιο του 2000, καθώς χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα άντλησης από τις γεωτρήσεις, και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές κατείσδυσης από το μοντέλο SWAT για την περίοδο 2000-2010. Αντίστοιχα, η προσομοίωση τελειώνει χρονικά το Μάιο του 2100, όπου εισήχθησαν για την περίοδο αυτή η υπολογισμένη κατείσδυση για την περίοδο 2011-2100.

Η εισαγωγή της κατείσδυσης έγινε με παρόμοιο τρόπο όπως με το υψόμετρο και την υδραυλική αγωγιμότητα, με την εισαγωγή δύο αρχείων κωδικοποιημένου κειμένου ASCII, στο οποίο περιέχονται οι σημειακές τιμές κατείσδυσης για την περιοχή έρευνας για τις περιόδους 2000-2010 και 2011-2100. Στη συνέχεια έγινε σύνδεση των τιμών της κατείσδυσης με την παράμετρο Source/Sink του λογισμικού.

10.5.11 Πορώδες

Για την ολοκλήρωση της εισαγωγής των δεδομένων που αφορούν την προσομοίωση της υπόγειας ροής, ορίστηκε το πορώδες παντού ίσο με 0.1, τιμή που αντιστοιχεί σε μεταμορφωμένους βραχώδεις σχηματισμούς, όπως στην περιοχή έρευνας. Η τιμή αυτή αποτελεί επίσης αποτέλεσμα βαθμονόμησης του μοντέλου.

Η εισαγωγή της τιμής του πορώδους έγινε μέσω της εντολής Drain or fillable porosity.

10.5.12 Χρονικά δεδομένα και δεδομένα ελέγχου (Temporal Properties)

Μετά την εισαγωγή όλων των παραμέτρων που καθορίζουν την υπόγεια ροή στην περιοχή έρευνας, τελευταία εισήχθηκαν τα χρονικά δεδομένα και δεδομένα ελέγχου. Μέσω της εντολής Temporal Properties του μενού Problem Settings καθορίζονται και εισάγονται όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με το χρόνο, με τις λειτουργείες οι οποίες είναι χρονικά εξαρτώμενες και οι νόρμες που αφορούν το σφάλμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το χρονικό βήμα ρυθμίζεται αυτόματα μέσω της μεθόδου Forward Adams - Bashforth/Backwaed trapezoid (AB/TR second order accurate predictor - corrector scheme). Ως αρχικό μήκος του χρονικού βήματος ορίστηκε ο ένας μήνας και ως τελικός χρόνος τα 101 χρόνια, που αντιστοιχούν στην περίοδο 2000-2100. Ο χρόνος ορίστηκε σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα αντλήσεων γεωτρήσεων και πηγαδιών και εκφορτίσεων πηγών, ενώ λήφθηκαν υπόψη κλιματικά δεδομένα που μελετήθηκαν προηγουμένως, ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της υπόγειας ροής τη σημερινή χρονική περίοδο, αλλά και να προβλεφθεί η υπόγεια ροή σύμφωνα με το σενάριο Α2 των κλιματικών αλλαγών. Τέλος, η μέγιστη τιμή του χρονικού βήματος ορίστηκε στο ένα έτος και η ανοχή σε σφάλμα του μοντέλου (RMS) στο 0,001.

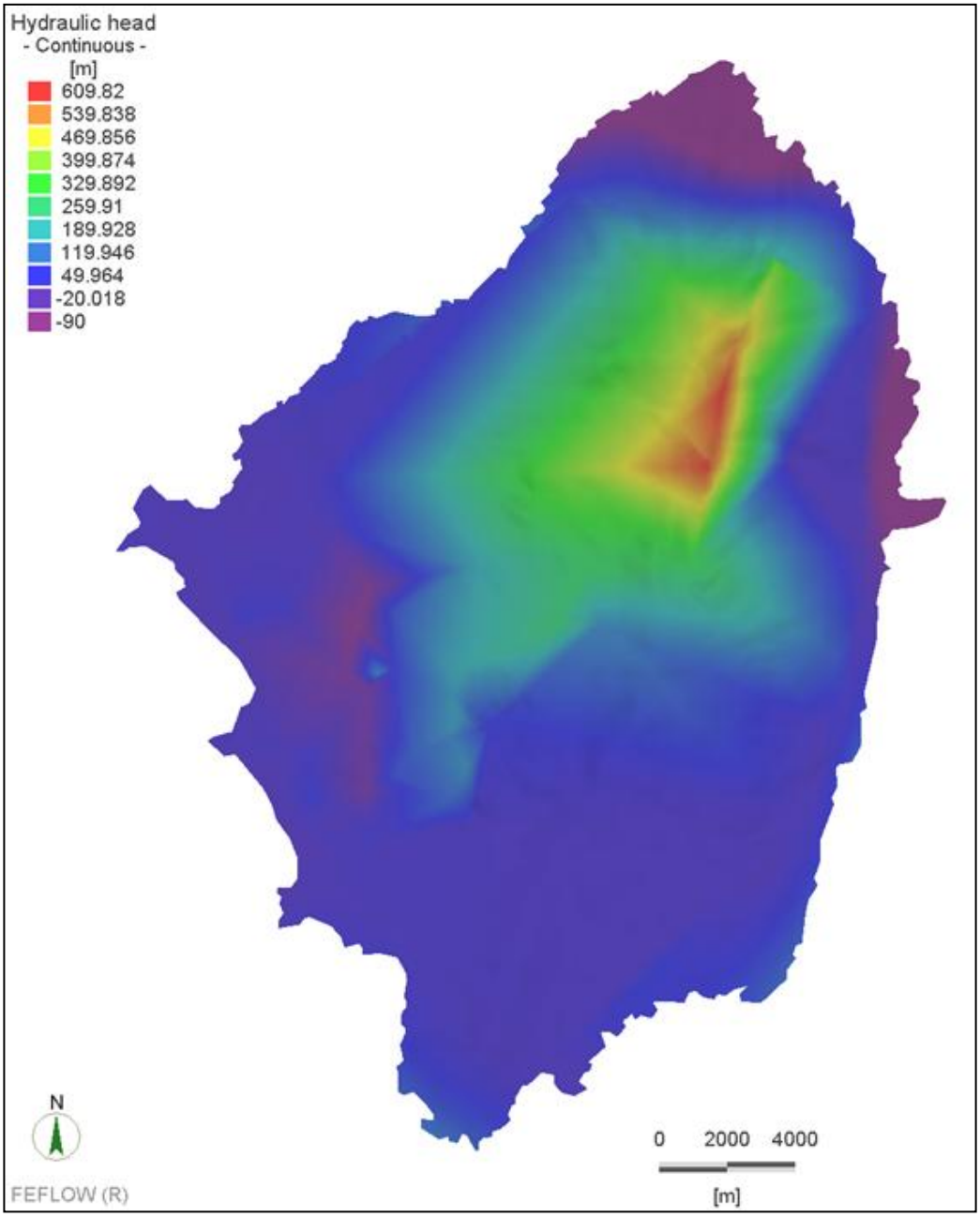
.

Κεφάλαιο 11^{ο} - Αποτελέσματα Προσομοίωσης

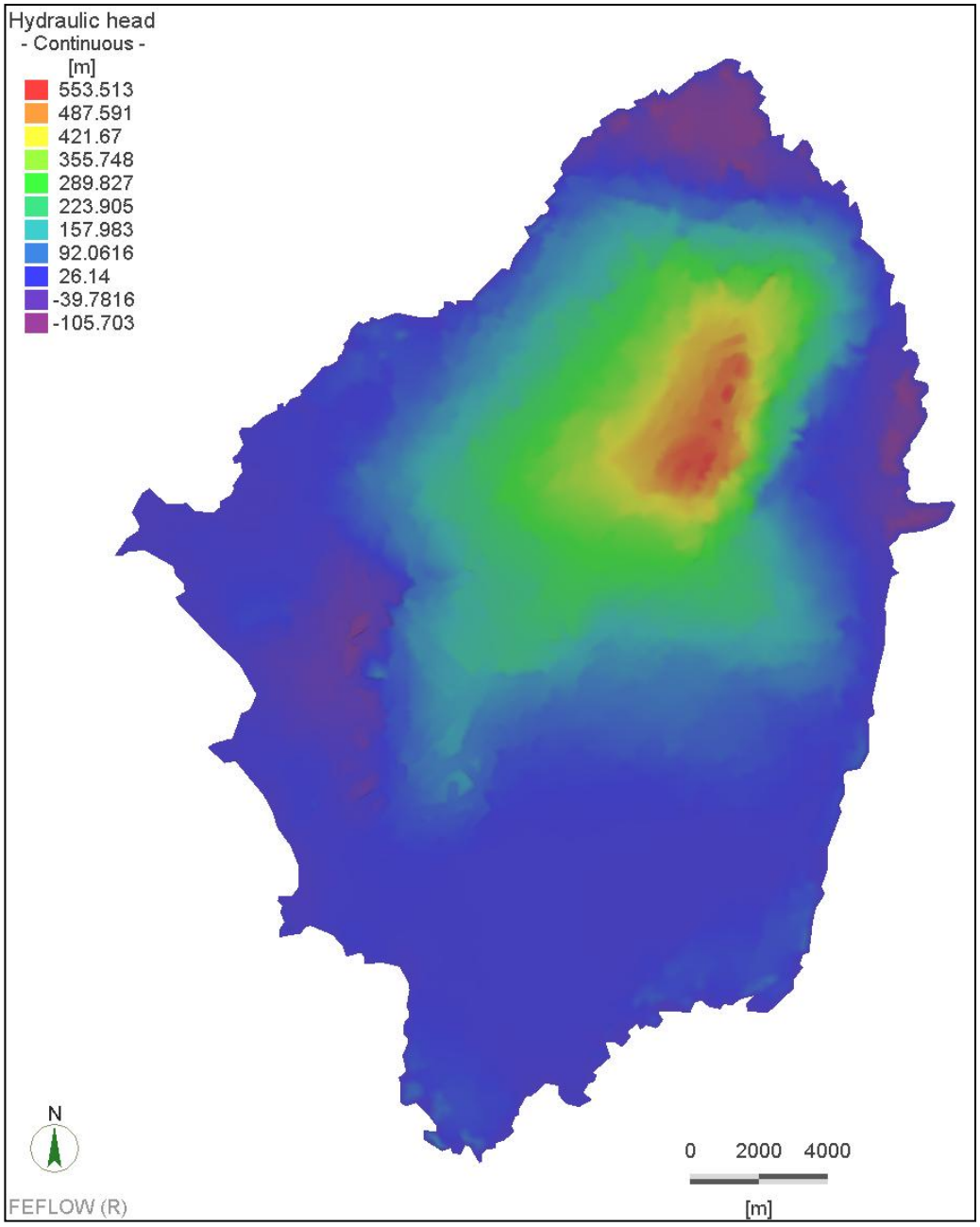
11. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

11.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 2000-2010

Όπως, προαναφέρθηκε, η προσομοίωση ορίστηκε να ξεκινά από τον Μάιο του 2000, λόγω των διαθέσιμων δεδομένων αντλήσεων από τις γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας. Μετά το πέρας της προσομοίωσης, η τιμή του υδραυλικού φορτίου για χρόνο t=0 μέρες (Μάιος, 2000) παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.1, ενώ η τιμή του υδραυλικού φορτίου για χρόνο t=3650 μέρες (Μάιος, 2010), παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.2.



Εικόνα 11.1: Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=0 μέρες (Μάιος, 2000).



Εικόνα 11.2: Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=3650 μέρες (Μάιος, 2010).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης, είναι δυνατόν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι διαθέσιμοι υπόγειοι υδατικοί πόροι συγκεντρώνονται κυρίως στο κεντρικό και ορεινό τμήμα της νήσου, όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του υδραυλικού φορτίου. Στο υπόλοιπο τμήμα της νήσου, η παρουσία νερού παρατηρείται κυρίως σε απόλυτα υψόμετρα έως 100 m περίπου.

- Οι τιμές του υδραυλικού φορτίου μετά την πάροδο των 10 ετών αλλάζουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό, ιδιαίτερα στις πεδινές περιοχές, όπου γίνεται άντληση για αρδευτικούς ακοπούς. Έτσι, ενώ στα ορεινά παρατηρείται μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου κατά 10%, η οποία άμεσα μπορεί να δικαιολογηθεί από την αλλαγή των κλιματικών συνθηκών (αύξηση θερμοκρασίας και μείωση βροχοπτώσεων), στις πεδινές περιοχές, η μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου υπολογίζεται στο 17%, γεγονός που υποδεικνύει τις επιπτώσεις από τις εκτεταμμένες αντλήσεις από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις.

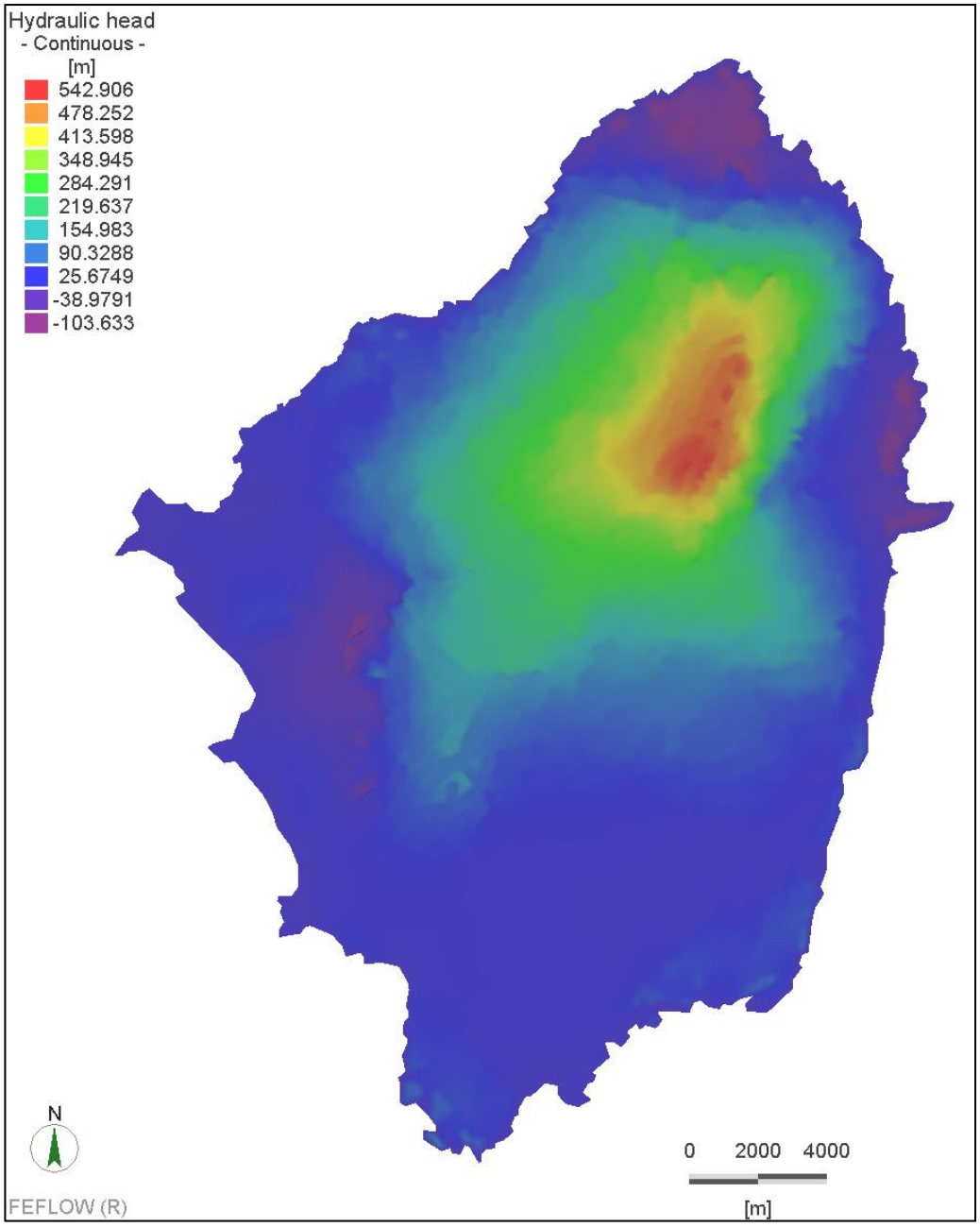
  Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια εργασίας υπάιθρου που πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2010, είχε παρατηρηθεί ότι πολλές πηγές στα ορεινά της νήσου είχαν στερέψει, γεγονός που υποδεικνύει το μηχανισμό των πηγών αυτών (υπερπλήρωσης) και ότι το μοντέλο προσομοίωσης δείχνει μια αντικειμενική εικόνα.

Το λογισμικό επίσης υπολογίζει επίσης την αύξηση ή τη μείωση του διαθέσιμου υπόγειου νερού την περιοχή έρευνας. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, η μείωση του διαθέσιμου υπόγειου νερού υπολογίζεται σε $3 \cdot 10^7$ m^3/d για τα δέκα έτη, και άρα μέχρι το Μάιο του 2010, η συνολική μείωση του υπόγειου νερού υπολογίζεται σε $10950 \cdot 10^7$ m^3.

11.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 2010-2100

Η δεύτερη προσομοίωση, η οποία αφορά την περίοδο 2010 – 2100, ξεκινά από τον Ιούνιο του 2010 και τελειώνει το Μάιο του 2100. Μετά το πέρας της προσομοίωσης, η τιμή του υδραυλικού φορτίου για χρόνο t=0 μέρες (Ιούνιος, 2010) παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.3, ενώ η τιμή του υδραυλικού φορτίου για χρόνο t=3650 μέρες (Μάιος, 2100), παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.4.

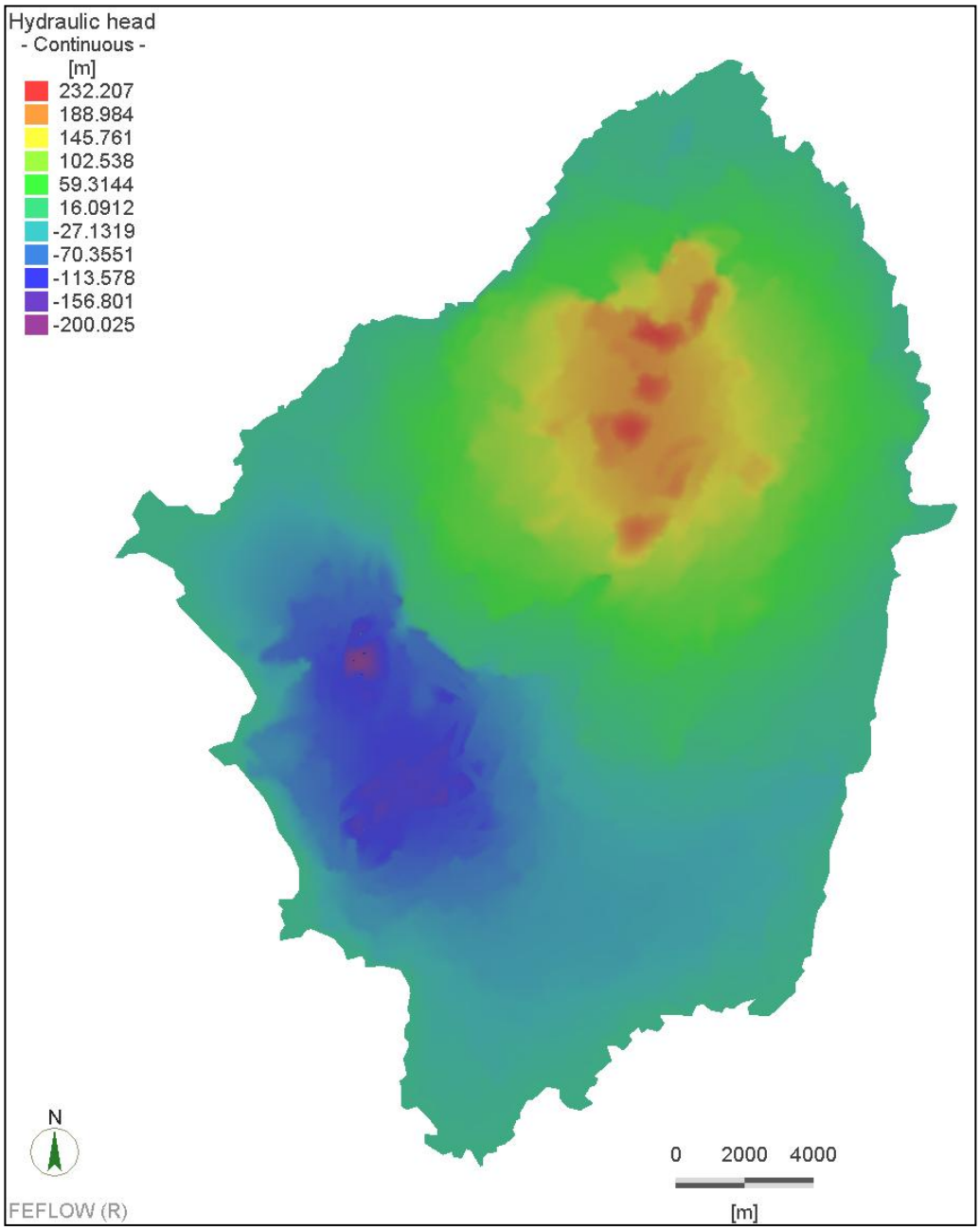
Για την πρώτη περίπτωση, η οποία αφορά τον Ιούνιο του 2010, οι διαφορές από τον προηγούμενο μήνα είναι ελάχιστες, με μια μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου της τάξεως του 2%, η οποία οφείλεται στην εκτεταμένη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων στις καλλιέργειες και στην εξυπηρέτηση του κοινού, καθώς παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Εικόνα 11.3: Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=3651 μέρες (Ιούνιος, 2010).

Για τη δεύτερη περίπτωση, η οποία αφορά το τέλος της προσομοίωσης, το Μάιο του 2100, οι διαφορές είναι ιδιαίτερα εμφανείς, με μια μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου σε όλη την περιοχή έρευνας, το οποίο σημαίνει τη δραματική μείωση των διαθέσιμων υπόγειων υδάτινων πόρων. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του απόλυτου υψομέτρου των υπόγειων υδάτων εκτιμάται στο 60%, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η άντληση νερού από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις που ήδη υφίστανται, καθώς η στάθμη θα βρίσκεται πολύ χαμηλότερα από το βάθος των γεωτρήσεων και των πηγαδιών.

Επιπλέον εκτιμάται ότι οι περισσότερες, αν όχι όλες οι πηγές θα στερεύσουν, καθώς το απόλυτο υψόμετρο του νερού βρίσκεται πολύ χαμηλότερα σε σχέση με την τοπογραφία, ενώ το ελάχιστο νερό που θα κατεισδύει από τις βροχοπτώσεις, είναι πιθανότερο να εισρέει σε βάθος μεσω του εκτεταμένου δικτύου του μέσου ασυνεχειών, παρά να εκφορτίζεται μέσω κάποιας πηγής.

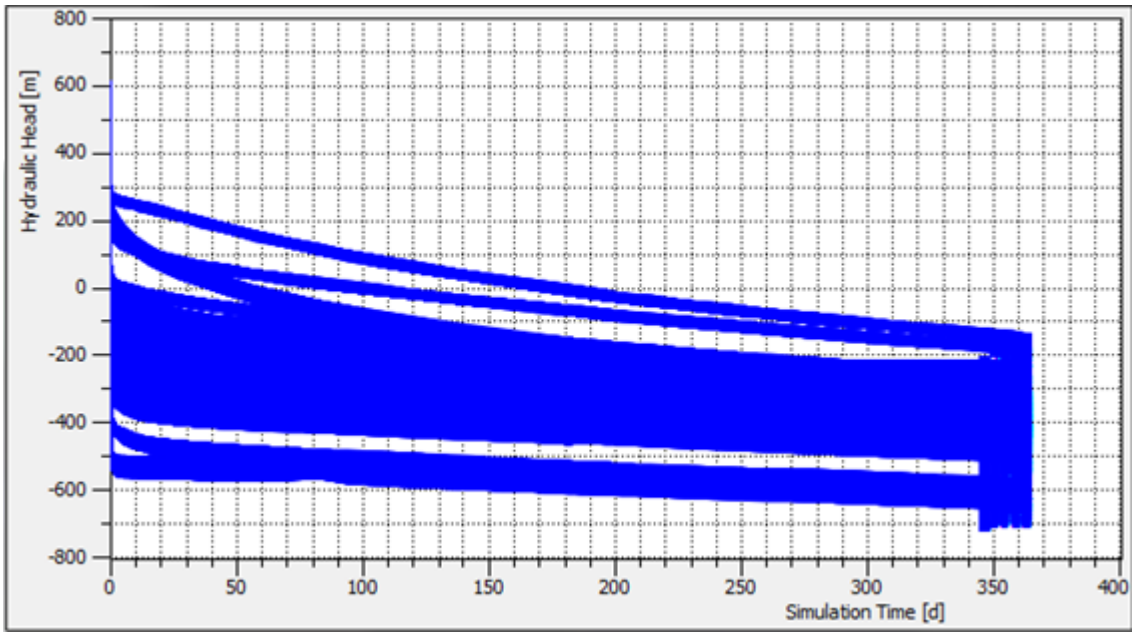


Εικόνα 11.4: Η τιμή του υδραυλικού φορτίου για t=36500 μέρες (Μάιος, 2100).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση, η μείωση του διαθέσιμου υπόγειου νερού από τον Ιούνιο του 2010, μέχρι το Μάιο του 2100 υπολογίζεται σε $70299 \cdot 10^7$ m^3, ενώ η συνολική μείωση από την αρχή της προσομοίωσης μέχρι το τέλος της υπολογίζεται σε $78840 \cdot 10^7$ m^3. Η μείωση αυτή οφείλεται στην εκτεταμένη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων, σε συνδυασμό με την μεγάλη αλλαγή των κλιματικών συνθηκών, όπου οι ήδη ελάχιστες βροχοπτώσεις προβλέπεται να μειωθούν κατά 10%, ενώ η θερμοκρασία να αυξηθεί κατά 20%.

11.3 Εκτιμηση Διαθεσιμοτητας Υπογειων Υδατινων Πορων

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα σε συνδυασμό με τις μέσες ετήσιες τιμές του υδραυλικού φορτίου για τα 100 χρόνια προσομοίωσης (Εικόνα 11.5) και τη μέση ταχύτητα κατείσδυσης (Εικόνα 11.6) η νήσος Νάξος θα αντιμετωπίσει στο άμεσο μέλλον σοβαρό πρόβλημα όσον αφορά την εξασφάλιση νερού για τις υδρευτικές και αρδευτικές της ανάγκες.

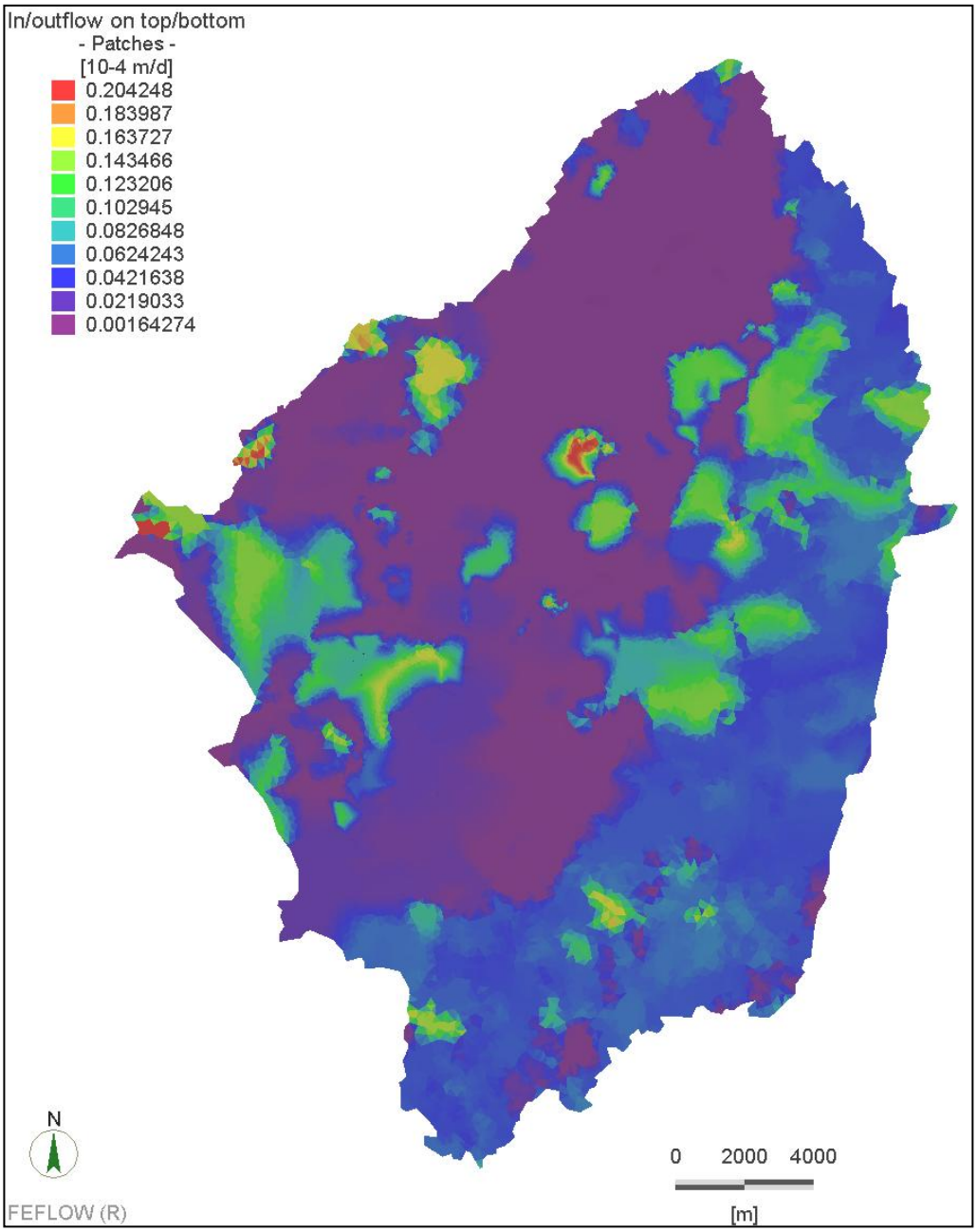


Εικόνα 11.5: Οι μέσες ετήσιες τιμές του υδραυλικού φορτίου για τα 100 χρόνια προσομοίωσης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 11.5, καθόλη τη διάρκεια του έτους, το ύψος του υδραυλικού φορτίου μειώνεται, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όπου οι υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες είναι μεγαλύτερες. Συγκεκριμένα, για t=0, όπου αντιστοιχεί στο μήνα Μάιο κάθε έτους, η τιμή του υδραυλικού φορτίου παρουσιάζει τη

μέγιστη τιμή, καθώς αποτελεί την αρχή της θερινής περιόδου και μόλις ξεκινά η εκτεταμένη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων.

Από το Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο, η τιμή του υδραυλικού φορτίου συνεχίζεται να μειώνεται, όπου από τον Οκτώβριο και μετά που ξεκινά η χειμερινή περίοδος, η κλιση των ευθειών του διαγράμματος μειώνεται, γεγονός που υποδεικνύεοι ότι η μείωση του υδραυλικού φορτίου είναι μικρότερη, λόγω της μικρότερης εκμετάλλευσης και της μερικής επαναφόρτισης των υδάτινων αποθεμάτων από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

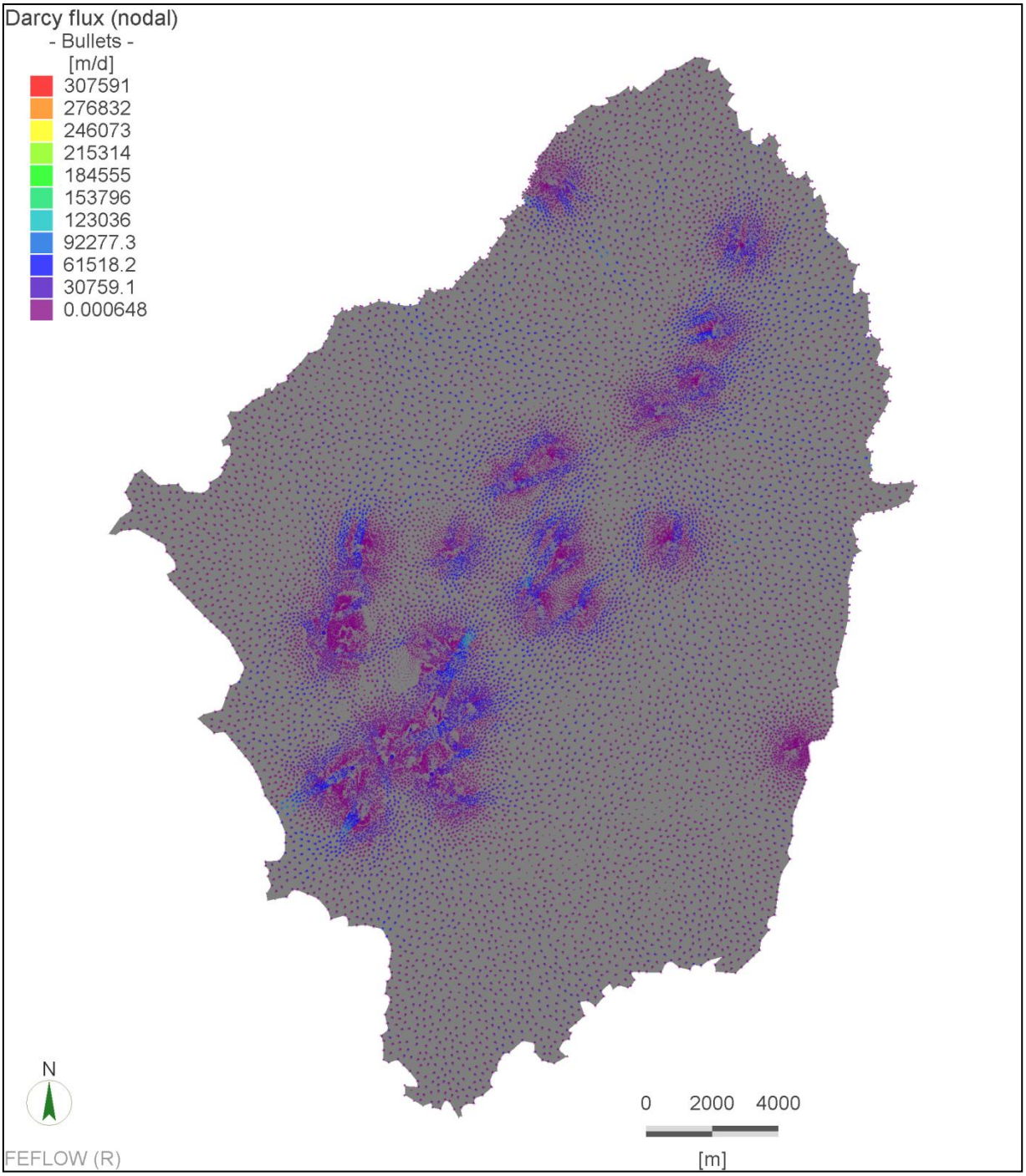


Εικόνα 11.6: Οι μέσες τιμές ταχύτητας κατείσδυσης ανά ημέρα για τα 100 χρόνια προσομοίωσης.

Όσον αφορά την ταχύτητα κατείσδυσης, υπολογίζεται ότι στην περιοχή όπου επικρατούν τα μάρμαρα, η ταχύτητα ισούται με $0{,}06 \cdot 10^{-4}$ m/d, ενώ στην περιοχή όπου επικρατούν οι σχιστόλιθοι, η ταχύτητα ισούται με $0{,}001 \cdot 10^{-4}$ m/d. Μέγιστη ταχύτητα κατείσδυσης, από $0{,}12 \cdot 10^{-4}$ m/d έως $0{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/d, παρατηρείται σε περιοχές όπου παρατηρείται η εμφάνιση μεταλπικών αποθέσεων, όπου οι τοπογραφικές κλίσεις είναι μικρές και σε περιοχές όπου παρατηρείται η μέγιστη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών. Το γεγονός αυτό όχι μόνο πιστοποιεί την αξιοπιστία του μοντέλου, αλλά υποδεικνύει πόσο μικρή είναι η επανατροφοδότιση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, καθώς αυτή καθιστάται δύσκολη από το συνδυασμό της μικρής ταχύτητας κατείσδυσης με το χαμηλό ετήσιο ύψος των βροχοπτώσεων.

Επιπλέον, σύμφωνα με τις γραμμές ροής των υπόγειων υδάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση (Εικόνα 11.7), το υπόγειο νερό συγκεντρώνεται κυρίως σε μια ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ στην ορεινή ζώνη της νήσου, καθώς και στα ΒΔ. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση πηγών μεγάλης παροχής, γεγονός που καθιστά το μοντέλο προσομοίωσης αξιόπιστο και όσον αφορά τη ροή. Ακόμη, παρατηρώντας κατά μήκος της ακτογραμμής, οι γραμμές ροής υποδεικνύουν τη διείσδυση θαλασσινού νερού στα δυτικά, ενώ αντιθέτως στα ανατολικά παρατηρούνται σημεία όπου αναμένονται να υπάρχουν υποθαλάσσιες πηγαίες εκφορτίσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι την παρούσα χρονική περίοδο και τα επόμενα χρόνια, αναμένεται το πρόβλημα εξασφάλισης νερού για τις εκάστοτε ανάγκες, να περιορίζεται μόνο το καλοκαίρι, όπως ήδη συμβαίνει. Όμως με τη συνεχή μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου και την πολύ μικρή επανατροφοδότιση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, το πρόβλημα θα επεκταθεί και τους χειμερινούς μήνες, καθώς δεν θα είναι δυνατή η άντληση νερού από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις, καθώς το βάθος τους θα βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη των υπόγειων υδάτων, ενώ δεν θα είναι δυνατή και η αξιοποίηση του νερού των πηγών, όπως γίνεται στην παρούσα φάση, καθώς η παροχή τους θα μειωθεί σημαντικά με το χρόνο. Επιπλεόν θα υπάρχει σοβαρό πρόβλημα με την ποιότητα του νερού στα δυτικά της νήσου, λόγω της εκτεταμένης διείσδυσης θαλασσινού νερού στον ελεύθερο υδροφορέα που βρίσκεται στις μεταλπικές αποθέσεις.



Εικόνα 11.7: Οι γραμμές ροής του υπόγειου νερού που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Κεφάλαιο 12^{ο} - Συμπεράσματα

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανεξάρτητα του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, οι ανάγκες για νερό παραμένουν, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι χαμηλή και οι υδατικοί πόροι περιορισμένοι, όπως είναι στα νησιά των Κυκλάδων, τα οποία χαρακτηρίζονται από την παρουσία σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων. Για το λόγο αυτό, η περιγραφή, η μελέτη και η ανάλυση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική και η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στην εκτίμηση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών.
Η συγκεκριμένη έρευνα με στόχο τη διερεύνηση και προσομοίωση της υδροφορίας του ετερογενούς μέσου ασυνεχειών στη νήσο Νάξο, είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων.

Η νήσος Νάξος είναι το μεγαλύτερο νησί των Κυκλάδων και έχει συνολική έκταση περίπου 429 km^2. Το σχήμα της είναι επίμηκες, με μέγιστο άξονα μήκους 32,77 km και μέγιστο άξονα πλάτους 23,86 km. Το ανάγλυφό της είναι ορεινό, με μια ορεινή ράχη σχεδόν ενιαία, γυμνή και βραχώδης, να την κατατέμνει από το βόρειο άκρο της μέχρι το νότιο. Το μέγιστο υψόμετρο του νησιού παρατηρείται σχεδόν στο κέντρο της ράχης αυτής, στο όρος Ζευς, και ισούται με 1001 m.

Στη Νάξο, οι υδατικοί πόροι είναι περιορισμένοι, λόγω της έντονης αγροτικής και τουριστικής δραστηριότητας, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, με αποτέλεσμα η εξασφάλιση νερού για τις υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες του νησιού να είναι δύσκολη. Το γεγονός αυτό συνέβαινε ανέκαθεν, αν και έχει παρατηρηθεί ότι λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους και του ορεινού όγκου του νησιού, η κατάστασή της όσον αφορά το νερό είναι καλύτερη από τα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων. Οι αιτίες περιορισμού των υπόγειων αποθεμάτων του νησιού είναι τόσο φυσικές, όσο και ανθρωπογενείς και ανεξάρτητα του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, οι ανάγκες για νερό παραμένουν.

Όσον αφορά το κλίμα της περιοχής έρευνας αν και κατατάσσεται στο μεσογειακό τύπο κλίματος, σύμφωνα με την κατάταξη του κλίματος κατά Thornwaite, το κλίμα της είναι ξηρό, και πιο συγκεκριμένα ξηροθερμικό, με έντονη επίδραση της θάλασσας στη διαμόρφωση του θερμικού χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, στις Κυκλάδες η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται στους 19^{ο} C, ενώ το έτος από μετεωρολογικής και κλιματικής άποψης διαιρείται σε δύο εποχές, την ψυχρή και τη θερμή. Η ψυχρή εποχή διαρκεί από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο, ενώ η θερμή από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο.

Όσον αφορά τη βροχοβαθμίδα και τη θερμοβαθμίδα στη νήσο Νάξο, η βροχοβαθμίδα ισούται με 0,7682, δηλαδή η βροχόπτωση αυξάνεται κατά 76,82 mm ανά 100 m υψομέτρου, ενώ θερμοβαθμίδα ισούται με -0,0073 ^{o}C/m, δηλαδή η θερμοκρασία μειώνεται κατά 0,73 ^{o}C ανά 100 m υψομέτρου.

Η εκτίμηση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών της νήσου Νάξου έγινε σύμφωνα με το σενάριο εκπομπών Α2 της τρίτης έκθεσης του Ο.Η.Ε. για την κλιματική αλλαγή. Από την εκτίμηση προέκυψαν τα εξής:

- Μείωση της βροχόπτωσης κατά 16,4% μέχρι το 2080, κατά 22,4% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 10,3% μέχρι το 2100 σε σχέση με τη βροχόπτωση που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990.
- Μείωση της σχετικής υγρασίας κατά 0,7% μέχρι το 2080, κατά 1,0% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 1,3% μέχρι το 2100 σε σχέση με τη σχετική υγρασία που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990.
- Αύξηση της θερμοκρασίας κατά 16,7% μέχρι το 2080, κατά 17,9% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 21,9% μέχρι το 2100 σε σχέση με τη θερμοκρασία που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990.
- Αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 1,2% μέχρι το 2080, κατά 2,0% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 1,5% μέχρι το 2100 σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990.
- Αύξηση των ταχυτήτων των ανέμων κατά 1,5% μέχρι το 2080, κατά 2,8% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 3,4% μέχρι το 2100 σε σχέση με τις ταχύτητες ανέμων που παρατηρήθηκαν την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990.
- Μείωση του κλάσματος νεφοκάλυψης κατά 12,9% μέχρι το 2080, κατά 16,3% μέχρι το 2090 και τελικώς κατά 15,3% μέχρι το 2100 σε σχέση με το κλάσμα νεφοκάλυψης που παρατηρείται την περίοδο αναφοράς μέχρι το 1990.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, οι επιπτώσεις στα υδατικά, κυρίως τα υπόγεια υδατικά συστήματα της περιοχής έρευνας, από τις κλιματικές αλλαγές μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Γενική μειωμένη τροφοδοσία και ανανέωση του νερού των υδροφόρων οριζόντων από τη μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της εξατμισιδιαπνοής.
- Αυξημένη υφαλμύρωση των παράκτιων και υποθαλάσσιων υδροφόρων οριζόντων, ιδιαιτέρως των καρστικών, με προέλαση προς τη ενδοχώρα του μετώπου

υφαλμύρωσης λόγω του μειωμένου δυναμικού της χερσαίας υδατικής φάσης από τη μειωμένη τροφοδοσία και την υπεράντληση.

- Αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντικού φορτίου στα παράκτια υδατικά σώματα και στη θάλασσα λόγω μικρότερης αραίωσης.
- Εντατικοποίηση της αποδόμησης των δελταϊκών περιοχών, που ήδη έχει ξεκινήσει λόγω της κατασκευής εγκάρσιων φραγμάτων στην ανάντη ζώνη (μείωση απορροής και στερεοπαροχής) και παραλλήλων αναχωμάτων στην πεδινή ζώνη του δέλτα (άφιξη μεταφερόμενου υλικού σε ένα και μοναδικό στόμιο).
- Ρύπανση ή αποξήρανση των παράκτιων υγροτόπων.
- Επιδείνωση του φαινομένου της ερημοποίησης λόγω υδατικού ελλείμματος και εδαφικών μεταβολών (συμπυκνώσεις στεγανοποιήσεις κ.λπ.).

Γεωλογικά, η νήσος Νάξος μπορεί να περιγραφεί γενικά ως ελλειπτικής μορφής δόμος, κύριας διεύθυνσης Β15^{ο}Α, ο οποίος αποτελείται από μεταμορφωμένα και μαγματικά πετρώματα διαφορετικής ηλικίας και παραμορφώσεως, Μειοκαινικά αλλόχθονα μολασσικά ιζήματα και πυριγενή πετρώματα και από νεότερα, κυρίως χερσαία, Πλειοκαινικά και Πλειστοκαινικά ιζήματα. Γενικά, μπορούν να αναγνωριστούν τρεις κύριες ενότητες στο νησί, η ανώτερη μη μεταμορφωμένη ενότητα, η ενότητα των κυκλαδικών κυανοσχιστόλιθων και ο όγκος του γρανοδιορίτη. Η σημερινή τεκτονική δομή της νήσου Νάξου είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα προϋπαρχόντων συμπιεστικών δομών και εφελκυστικών - εκτατικών κινήσεων, που υπέστησαν τα πετρώματα μετά το Μειόκαινο και οι οποίες είναι παράλληλες με τη διάταξη του Ελληνικού Τόξου.

Για τη μελέτη και την περιγραφή του μέσου ασυνεχειών της νήσου Νάξου, κατασκευάστηκε χάρτης των φωτογραμμώσεων, ο οποίος προέκυψε από δορυφορικά δεδομένα σε συνδυασμό με δεδομένα από εργασία υπαίθρου. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο χάρτη, στην περιοχή μελέτης έχουμε την εμφάνιση 887 φωτογραμμώσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε πραγματικές ή δυνητικώς πραγματικές ρωγμές και διαρρήξεις, προερχόμενες από μεταλπικές κινήσεις.

Για την περιγραφή του μέσου ασυνεχειών σε σύγκριση με τη λιθολογία της νήσου Νάξου, καθορίστηκαν έξι υποπεριοχές στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με την κύρια λιθολογία. Η γεωγραφική κατανομή των ασυνεχειών έδειξε ότι στο μεγαλύτερο μέρος του νησιού χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό ασυνεχειών. Εξαίρεση αποτελεί μέρος του δυτικού τμήματος του νησιού, όπου παρατηρείται μικρός αριθμός ασυνεχειών, γεγονός που οφείλεται στις χαλαρές μεταλπικές αποθέσεις που παρατηρούνται στη συγκεκριμένη περιοχή.

Κατασκευάζοντας τα ροδοδιαγράμματα των διευθύνσεων των ασυνεχειών σε κάθε υποπεριοχή είναι δυνατόν να αναγνωριστούν τόσο κύριες, όσο και δευτερεύουσες διευθύνσεις αυτών. Πιο συγκεκριμένα, τα ρήγματα εμφανίζουν τρεις επικρατούσες διευθύνσεις, ΒΒΑ-ΝΝΔ, ΒΑ-ΝΔ και ΑΒΑ-ΔΝΔ, και δύο δευτερεύουσες διευθύνσεις, Α-Δ και Β-Ν. Τις ίδιες κύριες και δευτερεύουσες διευθύνσεις εμφανίζει και το ροδοδιάγραμμα των φωτογραμμώσεων, γεγονός που τις συνδέει με τα ρήγματα της περιοχής μελέτης. Η σχέση αυτή μεταξύ των ρηγμάτων και των φωτογραμμώσεων είναι εμφανής και μεταξύ των ροδοδιαγραμμάτων των διευθύνσεων των ασυνεχειών της κάθε περιοχής κύριας λιθολογίας και του ροδοδιαγράμματος των διευθύνσεων που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας υπαίθρου, καθώς και εκεί οι κύριες και δευτερεύουσες διευθύνσεις είναι ίδιες. Όμως, εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαίρεση στη παραπάνω συσχέτιση αποτελούν οι υποπεριοχές του γρανίτη, των μετακροκαλοπαγών και του γρανοδιορίτη με τις μεταλπικές αποθέσεις, καθώς οι κύριες διευθύνσεις διαφέρουν. Οι συγκεκριμένες διαφορές μπορούν να μη ληφθούν υπόψη, καθώς το πλήθος των φωτογραμμώσεων στις συγκεκριμένες λιθολογίες είναι πολύ μικρός και δεν είναι αντιπροσωπευτικός του συνόλου αυτών.

Όσον αφορά το μήκος των ασυνεχειών, μια πρώτη στατιστική προσέγγιση του μήκους των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης, έδειξε ότι μήκη που επικρατούν κυμαίνονται μεταξύ 600 m και 2000 m. Υπολογίζοντας στη συνέχεια το συνολικό μήκος των ασυνεχειών και το μήκος τους ανά μονάδα επιφάνειας σε κάθε υποπεριοχή, έδειξε ότι τα μεγέθη αυτά είναι αντιστρόφως ανάλογα. Επίσης παρατηρήθηκε μεγάλη ομοιομορφία όσον αφορά τον κατακερματισμό της κάθε λιθολογίας, καθώς το μήκος των ασυνεχειών ανά μονάδα επιφάνειας δεν διαφέρει πολύ σε κάθε υποπεριοχή.

Όσον αφορά τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, παρατηρούνται μεγάλες τιμές πυκνότητας σε περιοχές όπου οι εναλλαγές μεταξύ μαρμάρων, μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και αμφιβολιτών είναι πολύ έντονες, υποδεικνύοντας ότι μεταξύ των λιθολογιών αυτών υπάρχει υδραυλική σύνδεση, καθώς το επιφανειακό νερό κυκλοφορεί μέσω αυτών των ασυνεχειών. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών. Από την άλλη πλευρά, μικρές τιμές χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών, παρατηρείται στους γρανοδιορίτες και στις μεταλπικές αποθέσεις και σε περιοχές όπου κυριαρχεί η εμφάνιση μίας μόνο λιθολογίας. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι περιοχές αυτές δεν έχουν επηρεαστεί από την τεκτονική δραστηριότητα της περιοχής, ενώ συγχρόνως είναι εμφανής η πολύπλοκη τεκτονική δομή της νήσου. Επίσης, συνδυάζοντας τους χάρτες της χωρικής πυκνότητας και του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών, επιβεβαιώνεται η ανομοιογενής χωρική κατανομή των

ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης, ενώ ταυτόχρονα αποκαλύπτεται ότι περιοχές με διαφορετικά λιθολογικά χαρακτηριστικά, εμφανίζουν ίδιες τιμές χωρικής πυκνότητας, αλλά και ίδιες τιμές βαθμού διασύνδεσης. Επίσης, παρατηρούνται μεγάλες τιμές του βαθμού διασύνδεσης στις ίδιες περιοχές όπου παρατηρούνται και υψηλές τιμές χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών. Το γεγονός ότι παρατηρείται όμοιος βαθμός διάρρηξης σε περιοχές με διαφορετική λιθολογία, ενισχύει την άποψη ότι ο βαθμός διάρρηξης, και κατά συνέπεια και το υδραυλικό δυναμικό του μέσου ασυνεχειών, είναι ανεξάρτητος της λιθολογίας και ταυτόχρονα εξαρτώμενος από το βαθμό της πλαστικής και εύθραυστης παραμόρφωσης των περιοχών αυτών.

Η γεωμορφολογική ανάλυση τόσο σε πεδινές, όσο και σε ορεινές συνθήκες, προσφέρει πολύτιμα στοιχεία για την κυκλοφορία του επιφανειακού και υπόγειου νερού. Επίσης, από τη μελέτη των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών μιας υδρογραφικής λεκάνης μπορούν να εκτιμηθούν οι υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής και άρα να εκτιμηθεί και η τρωτότητα της.

Η μορφολογία της νήσου Νάξου, όπως και των υπόλοιπων Κυκλάδων, εξαρτάται επίσης άμεσα από τη λιθολογία, τη δράση του τεκτονισμού και το κλίμα. Η Νάξος αποτελείται από ποικίλους σχηματισμούς διαφορετικής αντίστασης στη διάβρωση, ενώ το εύκρατο θαλάσσιο κλίμα που πρακτικά επιβάλλει τη σχεδόν πλήρη ανυπαρξία φυτοκάλυψης, σε συνδυασμό με τη δράση του υδρογραφικού δικτύου, έχουν σχηματίσει εντυπωσιακές γεωμορφές σε όλο το νησί, όπως μορφές κυψελοειδούς αποσάθρωσης, μορφές σφαιροειδούς αποσάθρωσης, χύτρες γιγάντων, hogbacks, κ.τ.λ.

Από την ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της Νάξου σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Strahler, προέκυψε ότι αποτελείται από 878 κλάδους, από τους οποίους οι 668 είναι 1ης τάξης, οι 163 είναι 2ας τάξης, οι 40 είναι 3ης τάξης και οι 7 είναι 4ης τάξης. Η γεωγραφική κατανομή των κλάδων δείχνει να είναι ασύμμετρη, καθώς στο νότιο και στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, το μήκος των κλάδων όλων των τάξεων είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με το υπόλοιπο νησί. Στο βόρειο τμήμα, το μήκος των κλάδων είναι επίσης μικρότερο από το κεντρικό τμήμα του νησιού, ενώ συγχρόνως το υδρογραφικό δίκτυο είναι καλύτερα ανεπτυγμένο σε σχέση με το νότιο τμήμα του νησιού. Επίσης το μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου συνδέεται άμεσα με τις μορφολογικές κλίσεις, καθώς στο βόρειο τμήμα όπου οι κλίσεις είναι μεγαλύτερες, το μήκος των κλάδων είναι μεγαλύτερο, ενώ το ακριβώς αντίθετο ισχύει για το νότιο τμήμα του νησιού. Όσον αφορά την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, παρατηρείται μεγαλύτερη πυκνότητα των υδατορεμάτων στα δυτικά

και τα ανατολικά και μικρότερη στα βόρεια και νότια του νησιού. Για το λόγο αυτό παρατηρείται επίσης ότι το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζει κατανομή περίπου ακτινωτή και κάθετη προς τον κύριο υδροκρίτη.

Όσον αφορά τον αριθμό των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ανά κύρια λιθολογία, προέκυψε ότι οι περισσότεροι εμφανίζονται στα μάρμαρα, τα οποία παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη υδρογραφική πυκνότητα. Αντίθετα, ο γρανίτης εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή υδρογραφικής συχνότητας. Ακόμη, στα μάρμαρα απαντώνται κλάδοι όλων των τάξεων, όπως και στους σχιστόλιθους, με τη διαφορά ότι στους τελευταίους παρουσιάζεται το μέγιστο μήκος κλάδων όσον αφορά τους κλάδους 4^{ης} τάξης. Αντίθετα, ο γρανίτης, τα μετακροκαλοπαγή και ο μιγματίτης δεν παρουσιάζουν κλάδους όλων των τάξεων, ενώ συγχρόνως εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές μήκους κλάδων στις τάξεις που εμφανίζουν.

Κατασκευάζοντας τα ροδοδιαγράμματα της διεύθυνσης των ρεμάτων όλων των τάξεων του υδρογραφικού δικτύου, προέκυψε ότι οι κύριες διευθύνσεις των ασυνεχειών σε κάθε κύρια λιθολογία της Νάξου ταυτίζονται με τις κύριες διευθύνσεις των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το υδρογραφικό δίκτυο είναι έντονα επηρεασμένο από τις νεοτεκτονικές διεργασίες που έχουν λάβει χώρα στη νήσο Νάξο. Ένα ακόμη στοιχείο, το οποίο υποδηλώνει την άμεση επιρροή του τεκτονισμού στο υδρογραφικό δίκτυο της νήσου, είναι το γεγονός ότι το πλήθος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου βρίσκονται σε περιοχές όπου παρατηρούνται αυξημένες τιμές της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών, ενώ σε πολλές περιπτώσεις, κλάδοι μεγαλύτερης τάξης αναπτύσσονται κατά μήκος των περιοχών αυτών.

Μια από τις πιο σημαντικές μεταβλητές του Κυκλαδικού Υδρογεωλογικού Μοντέλου, είναι οι τιμές των τοπογραφικών κλίσεων. Ο παράγοντας αυτός είναι καθοριστικός για την ποσότητα του νερού που κατεισδύει ή απορρέει επιφανειακά. Η ικανότητα κατείσδυσης εξαρτάται άμεσα από την μορφολογική κλίση, αφού όσο αυξάνει η τοπογραφική κλίση αυξάνει και ο συντελεστής επιφανειακής απορροής, ενώ όσο η κλίση μειώνεται αυξάνει ο συντελεστής κατείσδυσης (ανεξάρτητα του λιθολογικού σχηματισμού). Επιπλέον πρέπει να επισημανθεί ότι, όσο αυξάνει ο συντελεστής κατείσδυσης αυξάνει και ο κίνδυνος έκθεσης του υδροφόρου συστήματος σε ρυπαντικό φορτίο.

Όσον αφορά την υδρολογία της περιοχής έρευνας, για τον προσδιορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου και συνεπώς και τον υπολογισμό της κατείσδυσης, με σκοπό τη συσχέτιση της υπόγειας υδροφορίας με τις τεκτονικές και μικροτεκτονικές συνθήκες της περιοχής μελέτης,

κρίθηκε απαραίτητο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου της νήσου, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SWAT (Soil and Water Assessment Tool), το οποίο κατασκευάστηκε από το Πανεπιστήμιο A&M του Τέξας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της κατείσδυσης, της επιφανειακής απορροής, της εξατμισιδιαπνοής και των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων από το υδρολογικό μοντέλο, διαμορφώθηκε το υδρολογικό ισοζύγιο σε ετήσια βάση για τις περιόδους 1958-2010 και 2011-2100 στη νήσο Νάξο. Για την περίοδο 1958-2010, η εξατμισιδιαπνοή και η επιφανειακή απορροή είναι αρκετά υψηλές στην περιοχή με ποσοστό 69% και 29% αντίστοιχα επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ η κατείσδυση είναι αρκετά χαμηλή, με ποσοστό 2% επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά δικαιολογούνται επαρκώς από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, Επίσης, όσον αφορά το συντελεστή απορροής, εμφανίζει μέσες προς μικρές τιμές, γεγονός που οφείλεται τόσο στη μικρή ένταση και συχνότητα των βροχοπτώσεων, όσο και στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης πρόκειται για μια αγροτική και αραιοκατοικημένη περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρή φυτοκάλυψη.

Για την περίοδο 2011-2100 η εξατμισιδιαπνοή και η επιφανειακή απορροή εξακολουθούν να είναι αρκετά υψηλές στην περιοχή με ποσοστό 87% και 30% αντίστοιχα επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ η κατείσδυση υπολογίζεται σε ποσοστό 1,5% επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο υδρολογικό ισοζύγιο είναι αρνητικό, καθώς το άθροισμα των όγκων νερού της κατείσδυσης, της εξατμισιδιαπνοής και της επιφανειακής απορροής υπερβαίνουν τον όγκο νερού της εκτιμώμενης βροχόπτωσης.

Οι τιμές κατείσδυσης σύμφωνα με το υδρολογικό μοντέλο, κυμαίνονται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα σε όλο το νησί, ανεξαρτήτου χρονικής περιόδου. Όμως, κατασκευάζοντας έναν χάρτη κατείσδυσης, μπορεί να γίνει εμφανής η άμεση σχέση της κατείσδυσης με το μέσο ασυνεχειών της νήσου Νάξου, καθώς μεγάλες τιμές κατείσδυσης εμφανίζονται σε περιοχές όπου η πυκνότητα και ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών εμφανίζουν επίσης μεγάλες τιμές. Εξαίρεση αποτελεί το δυτικό τμήμα του νησιού, όπου παρουσιάζονται μεγάλες τιμές κατείσδυσης σε περιοχές όπου η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών είναι αρκετά μικρή. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται άμεσα από τη λιθολογία, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται από την παρουσία χαλαρών αποθέσεων (πρόσφατες αποθέσεις και κροκαλοπαγή). Επίσης, εμφανίζονται περιοχές όπου ενώ παρουσιάζουν μεγάλη χωρική πυκνότητα ασυνεχειών, παρουσιάζουν μικρές τιμές κατείσδυσης. Στην περίπτωση αυτή, ανασταλτικοί παράγοντες της κατείσδυσης αποτελούν τόσο η λιθολογία, όσο και οι

μορφολογικές κλίσεις της περιοχής σε συνδυασμό με την επεισοδιακού χαρακτήρα επιφανειακή απορροή. Όμως, σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ότι η κατείσδυση στο ανατολικό τμήμα της Νάξου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το δυτικό τμήμα, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία των μαρμάρων στο τμήμα αυτό, σε σχέση με την επικράτηση των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων στο δυτικό.

Όσον αφορά τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, προκύπτει ότι στη δομή του νησιού συμμετέχουν λιθολογικοί σχηματισμοί υψηλής, μέσης και χαμηλής περατότητας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της νήσου Νάξου, ανάλογα με το λιθολογικό τους χαρακτήρα και τη χωρική τους κατανομή, φιλοξενούν κατά θέσεις υπόγεια υδροφορία, όπου τα κυριότερα υδροφόρα συστήματα αναπτύσσονται στους ανθρακικούς σχηματισμούς, καθώς και στις προσχωματικές λεκάνες του Λιβαδιού και των Εγγαρών.

Από βιβλιογραφικά δεδομένα και από τις εργασίες υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφηκαν συνολικά 334 πηγές στη νήσο Νάξο, οι οποίες όμως δεν έχουν μελετηθεί υδρογεωλογικά στο σύνολό τους. Το γεγονός αυτό εμποδίζει την περαιτέρω μελέτη όσον αφορά την αύξηση της παροχής τους και συλλογικής τους εκμετάλλευσης με διάφορα τεχνικά έργα, ειδικά στα μέτωπα των πηγών υπερπληρώσεως, όπου θα ήταν δυνατή η εκτέλεση γεωτρήσεων για την αξιοποίηση του βαθύτερου υδροφόρου ορίζοντα στο πλαίσιο επαυξήσεως του υδατικού δυναμικού εκμεταλλεύσεως. Επίσης, η πλειοψηφία των απογραφέντων πηγών εμφανίζονται σχεδόν αποκλειστικά στο μεταμορφωμένο σύστημα και κυρίως στα κεντρικό και στο βόρειο τμήμα του νησιού, είναι αποκλειστικά εποχιακής λειτουργίας και ασήμαντης παροχής, κυρίως στις μισγάγγειες των ρεμάτων, οι οποίες δεν λειτουργούσαν κατά την περίοδο της απογραφής και δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί επακριβώς η θέση τους, παρά μόνο με τη βοήθεια των κατοίκων και χαρτών από παλαιότερες απογραφές.

Όσον αφορά το μηχανισμό λειτουργίας των πηγών, διακρίνουμε πηγές επαφής σαθρού σχιστολιθικού ή γνευσιακού ή γρανοδιοριτικού καλύμματος με υποκείμενο συμπαγές πέτρωμα και πηγές επαφής μαρμάρων με υποκείμενο υδατοστεγή σχηματισμό (γνεύσιο ή σχιστόλιθο). Ειδικά στον ορίζοντα των μαρμάρων παρουσιάζονται πηγές επαφής είτε υπερπληρώσεως σε φορέα σχιστολιθικό ή γνευσιακό και τέλος πηγές καρστικές. Υποθαλάσσιες εκφορτίσεις παρατηρούνται και στη ζώνη των ακτών, όπου απορρέουν στη θάλασσα μεγάλες ποσότητες νερού από την καθολική υδρομάστευση της ανθρακικής φάσεως (Χίλια Βρύση, όρμος Αμπράμ, κ.τ.λ.). Τέλος στο σύστημα κατάκλασης των μαγματικών πετρωμάτων (γρανοδιορίτης), αλλά και του γνευσιακού ορίζοντα, εκεί όπου οι ασυνέχειες δεν

έχουν επουλωθεί, παρατηρούνται εκλεκτικές συγκεντρώσεις νερού και αφίξεις στην επιφάνεια υπό μορφή πηγών.

Έχοντας υπολογίσει την επί τοις εκατό σχετική συχνότητα των πηγών σε κάθε υποπεριοχή της νήσου Νάξου, είναι δυνατό να συσχετιστεί η εμφάνιση των πηγών με το μέσο ασυνεχειών, καθώς όσο αυξάνεται το μήκος των ασυνεχειών και όσο μειώνεται το μήκος των ασυνεχειών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο αντίστοιχα, τόσο αυξάνεται και η σχετική συχνότητα των πηγών. Επίσης, από το ιστόγραμμα κατανομής σχετικής συχνότητας των πηγών και απόστασής τους από τις ασυνέχειες προέκυψε ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από τις ασυνέχειες, τόσο η σχετική συχνότητα των πηγών μειώνεται, δηλαδή τόσο μειώνεται η εμφάνιση πηγών στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, το 60,5% των πηγών της περιοχής μελέτης βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 150 m από τις ασυνέχειες, όπου η απόσταση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνει με σχετική βεβαιότητα ότι οι πηγές αυτές μπορούν να οφείλουν την ύπαρξή της στις παρακείμενες ασυνέχειες. Ακόμη, το 85,33% των πηγών βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 300 m, ενώ μόλις το 2,1% των πηγών βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 600 m, γεγονός που υποδεικνύει ότι ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό των πηγών σχετίζεται με το μέσο ασυνεχειών. Όμως, το γεγονός ότι μόνο το 60,5% των πηγών βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 150 m από τις παρακείμενες ασυνέχειες, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι οι υπόλοιπες πηγές είναι ανεξάρτητες από το μέσο ασυνεχειών. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι αυξανομένου της απόστασης από τις ασυνέχειες, ο βαθμός αβεβαιότητας μεγαλώνει. Τέλος, ένα άλλο κριτήριο, το οποίο απέδειξε ότι ένα μεγάλο ποσοστό των πηγών σχετίζεται με το μέσο ασυνεχειών είναι η χωρική κατανομή των πηγών σε σχέση με τη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των πηγών της περιοχής μελέτης βρίσκεται σε περιοχές μέσης ή υψηλής χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών, ή ακόμα βρίσκεται σε περιοχές όπου ενώ χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές χωρικής πυκνότητας, περικλείονται από περιοχές όπου οι τιμές της χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών είναι ιδιαίτερα υψηλές. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μέσω διαγραμμάτων συσχέτισης ότι, όσο αυξάνεται η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, αυξάνεται και η χωρική πυκνότητα των πηγών, κάτι που όμως δεν ισχύει και με το βαθμό διασύνδεσης.

Από τη συσχέτιση της παροχής μερικών από των πηγών της περιοχής μελέτης με το μέσο ασυνεχειών, είναι επίσης σαφής η άμεση σχέση αυτών. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η χωρική πυκνότητα και ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών, αυξάνεται και η παροχή των πηγών, ενώ αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η απόσταση των πηγών από τις ασυνέχειες, τόσο μειώνεται η παροχή τους. Ο συντελεστής συσχέτισης στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν

σχετικά χαμηλός και στα τρία διαγράμματα που κατασκευάστηκαν, αλλά πιθανότατα οφείλεται στον μικρό αριθμό των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων αυτών, καθώς πρόκειται για μόλις 12 πηγές από τις 334 που εμφανίζονται στο νησί.

Προκειμένου να καθοριστούν οι ζώνες αυξημένης κατείσδυσης των υπόγειων υδάτων στη νήσο Νάξο, με σκοπό την προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, μια ομάδα παραγόντων ορίστηκαν και κατασκευάστηκαν για καθένα από αυτούς θεματικοί χάρτες, οι οποίοι επαληθεύτηκαν στην ύπαιθρο. Οι παράγοντες αυτοί ήταν η τοπογραφική κλίση, η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών, η υδρολιθολογία, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και οι χρήσεις γης.

Η επιλογή των συγκεκριμένων παραγόντων έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά του μέσου ασυνεχειών που υποδεικνύουν υψηλή ικανότητα κατείσδυσης και εναποθηκευτικότητας. Οι παράγοντες χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες, από τη χαμηλή (δείκτης 0) έως υψηλή ικανότητα κατείσδυσης του νερού (δείκτης 3) και σταθμίστηκαν σύμφωνα με την αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης (AHP - Analytic Hierarchy Process). Ως αποτέλεσμα, έγινε προσέγγιση της ικανότητας κατείσδυσης της περιοχής έρευνας, όπου το 58,37 % του νησιού χαρακτηρίζεται ως ζώνη μέτριας ικανότητας κατείσδυσης. Οι ζώνες υψηλής ικανότητας κατείσδυσης καταλαμβάνουν μόνο το 4,65% της συνολικής έκτασης, βρίσκονται διάσπαρτες στη νήσο και χαρακτηρίζονται από πολύ ήπιες κλίσεις, από πολύ υψηλή πυκνότητα ασυνεχειών, από χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα και από πυκνής βλάστησης. Οι περιοχές αυτές πρέπει να ληφθούν έντονα υπόψη, δεδομένου ότι μπορεί να είναι πηγές πόσιμου νερού για τους αγροτικούς πληθυσμούς.

Όσον αφορά την υδροχημεία των υπόγειων νερών, κατασκευάστηκαν διαγράμματα Piper και Strahler από εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων που πάρθηκαν τον Αύγουστο του 2013 και πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας και Γεωλογίας του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Από τα διαγράμματα αυτά προέκυψε ότι το νερό των πηγών που εκφορτίζουν στα μάρμαρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασβεστούχο-οξυανθρακικό ή νερό στο οποίο δεν επικρατεί κάποιο ιόν, ενώ το νερό των πηγών που εκφορτίζουν στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασβεστούχο-οξυανθρακικό ή ως νερό στο οποίο δεν επικρατεί κάποιο ιόν ή ως νατριούχο-χλωριούχο ή καλιούχο-χλωριούχο. Η σύσταση αυτή δικαιολογείται άμεσα από τη γεωλογία, όμως στις περιπτώσεις όπου το νερό είναι ασβεστούχο-οξυανθρακικό και προέρχεται από πηγή που εκφορτίζει σε μαρμαρυγιακούς

σχιστολίθους, σημαίνει ότι η προέλευση του νερού αυτού είναι από τα μάρμαρα και μπορεί να υποδείξει τη σχέση του νερού των πηγών με το μέσο ασυνεχειών, καθώς το νερό κατεισδύει μέσω των μαρμάρων και καταλήγει στους μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους μέσω της κίνησής του στις ρωγμές και τις ασυνέχειες.

Για τη συσχέτιση του μέσου ασυνεχειών με την ποιότητα των υπόγειων υδάτων, κατασκευάστηκε διάγραμμα συσχέτισης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και υψομέτρου των πηγών, όπου είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το υψόμετρο, τόσο η τιμή της αγωγιμότητας μειώνεται. Όμως, συγχρόνως παρατηρείται ότι υπάρχουν πηγές των οποίων το νερό παρουσιάζει αυξημένη αγωγιμότητα, μεγαλύτερη από 400 μS/cm, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι το νερό περιέχει αυξημένη ποσότητα διαλυμένων αλάτων, και συνεπώς υπάρχει άμεση συσχέτιση του υπόγειου νερού με το μέσο ασυνεχειών. Ένας δεύτερος τρόπος που υπέδειξε την άμεση σχέση της ποιότητας του υπόγειου νερού με το μέσο ασυνεχειών, είναι η αυξημένες τιμές νιτρικών που παρατηρήθηκαν στα νερά των πηγών, όπου παρατηρήθηκε ότι σε αρκετά δείγματα, η συγκέντρωση νιτρικών ξεπερνάει τα 10 mg/l. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει επίσης την άμεση σχέση του μέσου ασυνεχειών με την ποιότητα των υπόγειων νερών.

Σε γενικές γραμμές, όλα τα παραπάνω συμπεράσματα συγκλίνουν στο γεγονός ότι η υπόγεια υδροφορία του νησιού είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μέσο ασυνεχειών που παρουσιάζει το μεταμορφωμένο σύστημα της νήσου. Καθώς όμως η ανθρωπογενής παρέμβαση είναι έντονη σε αρκετές περιοχές του νησιού, η υπόγεια υδροφορία, η οποία είναι και η κύρια πηγή νερού, είναι ευάλωτη όσον αφορά τη ρύπανσή της, αφού οι ρύποι είναι πολύ εύκολο να κινηθούν προς τα υπόγεια υδάτινα συστήματα μέσω των ασυνεχειών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη της υπόγειας υδροφορίας του μεταμορφωμένου συστήματος όσον αφορά την τρωτότητά της.

Όμως, πέρα από τη συσχέτιση του μέσου ασυνεχειών με την υπόγεια υδροφορία στην περιοχή έρευνας, μελετήθηκε η ροή σε βάθος, μέσω της μαθηματικής προσομοίωσης του υδραυλικού μέρους - ροής των υπόγειων υδατικών συστημάτων, με θεώρηση ενιαίας πυκνότητας νερού (γλυκό νερό), χωρίς μεταφορά μάζας. Αυτό έγινε προκειμένου να προσδιοριστούν οι εισροές νερού προς τους υδροφορείς και η υδραυλική αγωγιμότητα, ενώ κύριος στόχος ήταν ο προσδιορισμός του υδραυλικού φορτίου και η ροή του υπόγειου νερού την παρούσα χρονική περίοδο, αλλά και μελλοντικά. Η μαθηματική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού FeFlow 6.1, καθώς υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής πολλών παραμέτρων ροής, καθώς και των χαρακτηριστικών του μέσου ασυνεχειών.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τις περιόδους 2000-2010 και 2010-2100, είναι δυνατόν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι διαθέσιμοι υπόγειοι υδατικοί πόροι συγκεντρώνονται κυρίως στο κεντρικό και ορεινό τμήμα της νήσου, όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του υδραυλικού φορτίου. Στο υπόλοιπο τμήμα της νήσου, η παρουσία νερού παρατηρείται κυρίως σε απόλυτα υψόμετρα έως 100 m περίπου. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις γραμμές ροής των υπόγειων υδάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση, το υπόγειο νερό συγκεντρώνεται κυρίως σε μια ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ στην ορεινή ζώνη της νήσου, καθώς και στα ΒΔ.
- Οι τιμές του υδραυλικού φορτίου μετά την πάροδο των 10 ετών αλλάζουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό, ιδιαίτερα στις πεδινές περιοχές, όπου γίνεται άντληση για αρδευτικούς σκοπούς. Έτσι, ενώ στα ορεινά παρατηρείται μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου κατά 10%, ενώ στις πεδινές περιοχές, η μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου υπολογίζεται στο 17%, γεγονός που υποδεικνύει τις επιπτώσεις από τις εκτεταμένες αντλήσεις από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις.

  Όσον αφορά τον Ιούνιο του 2010, οι διαφορές από τον προηγούμενο μήνα είναι ελάχιστες, με μια μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου της τάξεως του 2%, η οποία οφείλεται στην εκτεταμένη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων στις καλλιέργειες και στην εξυπηρέτηση του κοινού, καθώς παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Όμως, το Μάιο του 2100, οι διαφορές είναι ιδιαίτερα εμφανείς, με μια μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου σε όλη την περιοχή έρευνας, το οποίο σημαίνει τη δραματική μείωση των διαθέσιμων υπόγειων υδάτινων πόρων. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του απόλυτου υψομέτρου των υπόγειων υδάτων εκτιμάται στο 60%.
- Το λογισμικό επίσης υπολογίζει επίσης την αύξηση ή τη μείωση του διαθέσιμου υπόγειου νερού την περιοχή έρευνας. Για την περίοδο 2000-2010, η μείωση του διαθέσιμου υπόγειου νερού υπολογίζεται σε $3 \cdot 10^7$ m^3/d, και άρα μέχρι το Μάιο του 2010, η συνολική μείωση του υπόγειου νερού υπολογίζεται σε $10950 \cdot 10^7$ m^3.

  Για την περίοδο 2010-2100, η μείωση του διαθέσιμου υπόγειου νερού υπολογίζεται σε $70299 \cdot 10^7$ m^3, ενώ η συνολική μείωση από την αρχή της προσομοίωσης μέχρι το τέλος της υπολογίζεται σε $78840 \cdot 10^7$ m^3. Η μείωση αυτή οφείλεται στην εκτεταμένη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων, σε συνδυασμό με την μεγάλη

αλλαγή των κλιματικών συνθηκών, όπου οι ήδη ελάχιστες βροχοπτώσεις προβλέπεται να μειωθούν κατά 10%, ενώ η θερμοκρασία να αυξηθεί κατά 20%.

- Επιπλέον, καθόλη τη διάρκεια του έτους, το ύψος του υδραυλικού φορτίου μειώνεται, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όπου οι υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες είναι μεγαλύτερες. Συγκεκριμένα, για t=0, όπου αντιστοιχεί στο μήνα Μάιο κάθε έτους, η τιμή του υδραυλικού φορτίου παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή, καθώς αποτελεί την αρχή της θερινής περιόδου και μόλις ξεκινά η εκτεταμένη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων.

  Από το Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο, η τιμή του υδραυλικού φορτίου συνεχίζεται να μειώνεται, όπου από τον Οκτώβριο και μετά που ξεκινά η χειμερινή περίοδος, η κλίση των ευθειών του διαγράμματος μειώνεται, γεγονός που υποδεικνύει ότι η μείωση του υδραυλικού φορτίου είναι μικρότερη, λόγω της μικρότερης εκμετάλλευσης και της μερικής επαναφόρτισης των υδάτινων αποθεμάτων από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.
- Όσον αφορά την ταχύτητα κατείσδυσης, υπολογίζεται ότι στην περιοχή όπου επικρατούν τα μάρμαρα, η ταχύτητα ισούται με $0{,}06 \cdot 10^{-4}$ m/d, ενώ στην περιοχή όπου επικρατούν οι σχιστόλιθοι, η ταχύτητα ισούται με $0{,}001 \cdot 10^{-4}$ m/d. Μέγιστη ταχύτητα κατείσδυσης, από $0{,}12 \cdot 10^{-4}$ m/d έως $0{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/d, παρατηρείται σε περιοχές όπου παρατηρείται η εμφάνιση μεταλπικών αποθέσεων, όπου οι τοπογραφικές κλίσεις είναι μικρές και σε περιοχές όπου παρατηρείται η μέγιστη χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών. Το γεγονός αυτό όχι μόνο πιστοποιεί την αξιοπιστία του μοντέλου, αλλά υποδεικνύει πόσο μικρή είναι η επανατροφοδότιση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, καθώς αυτή καθιστάται δύσκολη από το συνδυασμό της μικρής ταχύτητας κατείσδυσης με το χαμηλό ετήσιο ύψος των βροχοπτώσεων.
- Τέλος, παρατηρώντας κατά μήκος της ακτογραμμής, οι γραμμές ροής υποδεικνύουν τη διείσδυση θαλασσινού νερού στα δυτικά, ενώ αντιθέτως στα ανατολικά παρατηρούνται σημεία όπου αναμένονται να υπάρχουν υποθαλάσσιες πηγαίες εκφορτίσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι την παρούσα χρονική περίοδο και τα επόμενα χρόνια, αναμένεται το πρόβλημα εξασφάλισης νερού για τις εκάστοτε ανάγκες, να περιορίζεται μόνο το καλοκαίρι, όπως ήδη συμβαίνει. Όμως με τη συνεχή μείωση της τιμής του υδραυλικού φορτίου και την πολύ μικρή επανατροφοδότιση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, το πρόβλημα θα επεκταθεί και τους χειμερινούς μήνες, καθώς δεν θα είναι

δυνατή η άντληση νερού από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις, καθώς το βάθος τους θα βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη των υπόγειων υδάτων, ενώ δεν θα είναι δυνατή και η αξιοποίηση του νερού των πηγών, όπως γίνεται στην παρούσα φάση, καθώς η παροχή τους θα μειωθεί σημαντικά με το χρόνο. Επιπλεόν θα υπάρχει σοβαρό πρόβλημα με την ποιότητα του νερού στα δυτικά της νήσου, λόγω της εκτεταμένης διείσδυσης θαλασσινού νερού στον ελεύθερο υδροφορέα που βρίσκεται στις μεταλπικές αποθέσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βασιλάκης Ε., 2006. Μελέτη της τεκτονικής δομής της λεκάνης Μεσσάρας, κεντρικής Κρήτης, με τη βοήθεια τεχνικών τηλεπισκόπισης και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών. Διδακτορική διατριβή, Αθήνα.
2. Βασιλάκης Ε., 2008. Τεχνικές τηλεπισκόπισης σε γεωεφαρμογές. Σημειώσεις μαθήματος GIS και Τηλεπισκόπιση, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
3. Βουδούρης Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος. Υπόγεια νερά και περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
4. Βουδούρης Κ., Αντωνάκος Α., 2001. Κατανομή των βροχοπτώσεων στο νομό Κορινθίας. Γεωγραφίες, Αθήνα, τεύχος 4.
5. Γαλανού Ε., Ρόκκος Δ., 1999. Η ανάλυση των Κύριων συνιστωσών στην οριοθέτηση λιθολογικών ενοτήτων και στην αναγνώριση γεωλογικών δομών της νήσου Νάξου με τη χρήση πολυφασματικών TM εικόνων Landsat. Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, Ι, τευχ. 3, Αθήνα.
6. Γιαννουλόπουλος Π., Λάππας Ι., 2010. Υδρογεωλογική Μελέτη – Υδατικό Διαμέρισμα Νήσων Αιγαίου (14). Γ΄ ΚΠΣ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα, ΙΓΜΕ, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας, Αθήνα.
7. Δήμος Δρυμαλίας (νυν Δήμος Νάξου και Μικρών Κυκλάδων), 2010. Πρότυπος Χωροταξικός Σχεδιασμός Δήμου Δρυμαλίας για την ανάδειξη και προστασία της φυσιογνωμίας του. Φάση Α΄.
8. Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015. Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροή Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου (GR14). Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης Περιβάλλοντος & Ενέργειας (www.ypeka.gr).
9. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος (ΕΣΥΕ). Πραγματικός πληθυσμός της Ελλάδος κατά νομούς, δήμους, δημοτικά διαμερίσματα και οικισμούς (αποτελέσματα απογραφής 2011), Πληροφορίες από την ιστοσελίδα της ΕΣΥΕ http://www.statistics.gr/.
10. ENVECO S.A., 2011. Ανάπτυξη αιολικών πάρκων στις νήσους Άνδρο, Νάξο, Πάρο και Τήνο και σχετικών έργων οδοποιίας και διασύνδεσης. Φορέας ΕΛΙΚΑ Ανώνυμη Εταιρεία Υπηρεσιών.

11. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011. Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα. Έκδοση Τράπεζας της Ελλάδος, Αθήνα.
12. Ευελπίδου Ν., 2001. Γεωμορφολογική και περιβαλλοντική μελέτη της Νήσου Νάξου με τη χρήση μεθόδων τηλεπισκόπισης και G.I.S. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, ΓΑΙΑ 13.
13. Ζάμπακας Ι.Δ., 1981. Γενική Κλιματολογία, Αθήνα.
14. Jansen J., 1973. Γεωλογικός χάρτης της νήσου Νάξου, κλίμακας 1:50.000. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
15. Καλλέργης Γ., 2000. Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β΄. Εκδόσεις Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος.
16. Καλογερόπουλος Κ., 2011. Αξιοποίηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT στη διερεύνηση δημιουργίας λιμνοδεξαμενών. Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
17. Καραλής Ι., 1969. Τύποι καιρού Ελλάδος. Διατριβή επί διδακτορία, Αθήνα.
18. Καρράς Γ.Σ., 1973. Κλιματική ταξινόμησης της Ελλάδος κατά Thorthwaite. Διατριβή επί διδακτορία, Αθήνα.
19. Καρύμπαλης Ε., Παυλόπουλος Κ., 2002. Σημειώσεις και Εργαστηριακές Ασκήσεις Υδρολογίας. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
20. Κατσούλης Β., 1970. Αι ανεμολογικαί συνθήκαι εις το Αιγαίον Πέλαγος. Διατριβή επί διδακτορία, Αθήναι.
21. Καψωμενάκης Ι., 2009. Εκτίμηση των προβλεπόμενων από τα πρότυπα προσομοίωσης κλιματικών αλλαγών στην Ελλάδα με μεθόδους υποκλιμάκωσης. Διατριβή επί διδακτορία, Αθήνα.
22. Καψωμενάκης Ι., Δουβής Κ., Γιαννακόπουλος Χ., Ζάνης Π., Τσελιούδης Γ., Ρεπαπής Χ., Ζερεφός Χ., 2011. Σενάρια Ανθρωπογενούς Παρέμβασης στην Κλιματική Αλλαγή και τα Προγράμματα Prudence και Ensembles. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα.
23. Κοντοπίδης Β., 2003. Υδατικές ανάγκες στη νησιωτική Ελλάδα, η περίπτωση της Νάξου. Πρακτικά Β΄ Πανελληνίου Συνεδρίου με θέμα «Η Νάξος δια μέσου των αιώνων», Χαλκί 4-7 Σεπτεμβρίου 1997, σ. 675-683.
24. Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2002. Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

25. Κουμαντάκης Ι., Μιμίδης Θ., Καπλανίδης Α., 1990. Έρευνα για αξιοποίηση υπόγειων και επιφανειακών νερών στη Νάξο. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, τομ. XXV/4, σελ. 143-157.
26. Λεωνιδοπούλου Δ., 2008. Γεωλογικοί και γεωμορφολογικοί παράγοντες διαμόρφωσης της εσωτερικής τρωτότητας σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων. Εφαρμογή στη νήσο Τήνο. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
27. Μανάκος Α., Τσιούμας Β., Ζόραπας Β., 2007. Υδρογεωλογική έρευνα σε περιοχές των ν. Λάρισας και Μαγνησίας με φαινόμενα εδαφικών ρωγμών, Ι.Γ.Μ.Ε., Γ2819 / Υ2047.
28. Μαριολόπουλος Η.Γ., 1938. Το κλίμα της Ελλάδος. Αθήναι.
29. Μαριολόπουλος Η.Γ., 1982. Επιτομή του Κλίματος της Ελλάδος. ΚΕΦΑΚ Ακαδημίας Αθηνών, Δημοσίευμα 7.
30. Μάρκου – Ιακωβάκου Π., 1979. Ο υετός εις τη νήσο Κρήτη. Διατριβή επί Διδακτορία, Αθήνα.
31. Μαρουκιάν Χ., Γάκη – Παπαναστασίου Κ., Παπαδοπούλου – Βρυνιώτη Κ., Ευελπίδου Ν., 2007. Σημειώσεις εργαστηρίου «Γεωμορφολογία». Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
32. Μουντράκης Δ., 1985. Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
33. Μπάνου Στ., 2007. Διαχείριση υδατικών πόρων Κυκλάδων, ευρύτερη περιοχή νήσων Πάρου και Νάξου. Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
34. Μπέλλος Β., 2005. Σημειώσεις Τεχνικής Υδρολογίας. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τομέας Υδραυλικών Έργων.
35. Μπορονκάυ Κ., 1995. Γεωτεκτονική εξέλιξη των Κυκλάδων Νήσων. Διδακτορική διατριβή, Πάτρα.
36. Μποτσιαλάς Κ., 2007. Ανάλυση, ερμηνεία και εκτίμηση του υδρογεωλογικού και τεχνικογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών. Εφαρμογή στο σχιστολιθικό σύστημα της νήσου Τήνου. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
37. Νικολάκης Δ., 1985. Ο υετός στη Θεσσαλία. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας.
38. Νικολάκης Δ., 2002. Κλιματολογία. Μια σύγχρονη επιστήμη του περιβάλλοντος. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.

39. Οδηγία 98/83 Ε.Κ./3-11-1998. Σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης.
40. Οδηγία 2000/60/ΕΚ. Περί της θέσπισης πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.
41. Οδηγία 2006/118/ΕΚ. Σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση.
42. Παπανικολάου Δ., 1986. Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις Επτάλοφος, Αθήνα.
43. Παπανικολάου Δ., 1988. Η ενδιάμεση τεκτονομεταμορφική ζώνη των Ελληνίδων. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, τόμος XX, σελ. 101-120, Αθήνα.
44. Παπανικολάου Δ., 2014. Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα.
45. Παπανικολάου Δ., Καροτσιέρης Ζ., 2005. Τεκτονική Γεωλογία. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος
46. Παπασταματίου Γ., 1950. Geologie von Naxos. Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους.
47. Παππά Γ., 2001. Υγειονομική σημασία των χημικών παραμέτρων στο πόσιμο νερό, Υπουργείο Υγείας και Πρόνοιας, www.waterinfo.gr/eedyp/Paros_papers/pappa_g.pdf.
48. Παρτσινεβέλου Α.Σ., 2012. Τεκτονική και μικροτεκτονική προσέγγιση στην υπόγεια υδροφορία του μεταμορφωμένου συστήματος Νάξου. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
49. Παρχαρίδης Ι., 1994. Τεκτονική ανάλυση της περιοχής Βόρειας Θεσσαλίας και Κεντρικής – Δυτικής Μακεδονίας με χρήση μεθόδων τηλεπισκόπισης. Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
50. Πλακά Κ., 2006. Δίκτυο αειφόρων νήσων ΔΑΦΝΗ – Νάξος. Ερευνητικό έργο για την αειφόρο ανάπτυξη στη Νάξο.
51. Προμπονά Α., 2006. Μελέτη των υδατικών πόρων της νήσου Νάξου. Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
52. Σαμπατακάκης Π., 2001. Υπόγεια Νερά – Το παρόν και το μέλλον στα νησιά του Αιγαίου. Πρακτικά συμποσίου Αιγαίο – Νερό – Βιώσιμη Ανάπτυξη, Πάρος.
53. Σαμπώ Β., 1991. Στοιχεία της γεωμορφολογίας των Κυκλάδων. Σημειώσεις Γεωμορφολογίας της Ελλάδας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
54. Σκαραντωνάκης Χ., 2010. Διερεύνηση Επιφανειακής Ξηρασίας στο Νομό Χανίων. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

55. Στουρνάρας Γ., 1989. Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας. Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
56. Στουρνάρας Γ., 1995. Επί της αναγκαιότητας σύνθετων ερευνών σε υδρογεωλογικές μελέτες ηφαιστειακών πεδίων. Η περίπτωση της περιοχής Πέρδικας Αίγινας. Πρακτικά 3ου Πανελλήνιου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο.
57. Στουρνάρας Γ., 1996. Υδραυλική και μηχανική σημασία των ασυνεχειών της βραχομάζας. Ειδικά μαθήματα γεωλογικών εφαρμογών, Ε.Κ.Π.Α.
58. Στουρνάρας Γ., 1998. Υδροδυναμική του μέσου ασυνεχειών. Ειδικά μαθήματα γεωλογικών εφαρμογών, Ε.Κ.Π.Α.
59. Στουρνάρας Γ., 2005. Τεχνική Γεωλογία – Γεωλογία Τεχνικών Έργων – Ειδικά Μαθήματα Γεωλογικών Εφαρμογών. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
60. Στουρνάρας Γ., 2007. Νερό. Περιβαλλονική διάσταση και διαδρομή. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
61. Στουρνάρας Γ., Νάστος Π., Γιόξας Γ., Ευελπίδου Ν., Βασιλάκης Εμμ., Παρτσινεβέλου Α.-Σ., Ηλιόπουλος Β., 2011. Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά και υπόγεια υδάτινα σώματα του Ελλαδικού Χώρου. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος.
62. Στουρνάρας Γ., Σταυροπούλου Μ., 2011. Τεχνική Γεωλογία. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 209.
63. Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003. Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας. Υδατικό διαμέρισμα νήσων Αιγαίου, Αθήνα (http://itia.ntua.gr/el/docinfo/571/).
64. Υπουργείο Ανάπτυξης, 2005. Ανάπτυξη συστημάτων και εργαλείων διαχείρισης υδατικών πόρων Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου. Τεύχος 25 – Νήσος Νάξος. Γενική Διεύθυνση Φυσικού Πλούτου, Διεύθυνση Υδατικού Δυναμικού και Φυσικών Πόρων, Αθήνα.
65. Υπουργείο Γεωργίας, 1986. Αναγνωριστική μελέτη λιμνοδεξαμενών στη νήσο Νάξο. Υπηρεσία έγγειων βελτιώσεων, Διεύθυνση Γεωλογίας – Υδρολογίας.
66. Χαρμανίδης Φ., 2002. Έρευνα Νοτίου Αιγαίου (Κυκλάδες – Δωδεκάνησα). Προτάσεις αξιοποίησης και εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών – Νήσος Νάξος, Ι.Γ.Μ.Ε.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Altherr R.H., Kreuzer J., Wendt I. , Lenz H., Wagner G.A., Keller J., Harre W., Hohndorf A., 1982. A late Oligocene/early Miocene high temperature belt in the Attic-Cycladic Crystalline Complex (SE Pelagonian, Greece). Geologisches Jahrbuch, v.23, pp. 97-164.
2. Anderson E.M., 1951. The dynamics of faulting. Eds. Oliver & Boyd.
3. Anderson P.M., Woessner W.W., 2002. Applied Groundwater Modelling. Simulation of Flow and Advective Transport, Elsevier.
4. Andriessen P.A.M., Boelrijk N.A.I.M., Hebeda E.H., Priem H.N.A., Verdrumen E.A.T., Verschure R.H., 1979. Dating the events of metamorphism and granitic magmatism in the alpine orogen of Naxos (Cyclades, Greece). Contributions to Mineralogy and Petrolology, 69, pp. 215–255.
5. Back W., 1966. Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain, U.S. Geological Survey Prof. Paper 498-A, pp. 42.
6. Back W., Hanshaw B., 1965. Chemical geohydrology. In V. T. Chow (Ed.), Advances in Hydroscience, Academic Press, Inc., New Yori, V. 2, pp. 49-109.
7. Bear J., 1988. Dynamics of Fluids in Porous Media. Republication, Dover Publications, New York.
8. Ben J., Jansen H., Schuiling R.D., 1976. Metamorphism on Naxos: petrology and geothermal gradients. American Journal of Science, Vol. 276, pp. 1225-1253.
9. Bonneau M., 1984. Correlation of the Hellenides nappes in the south-eastern Aegean and their tectonic reconstruction. Geol. Soc. London, 17, pp. 517-527.
10. Botsialas K., Vassilakis E., Stournaras G., 2005. Fracture pattern description and analysis of the hard rock hydrogeological environment, in a selected study area in Tinos island, Hellas. 7th Hellenic Hydrogeological Conference - Athens 2005, Volume II, pp. 91-100.
11. Brichau St, 2004. Constraining the tectonic evolution of extensional fault systems in the Cyclades (Greece) using low-temperature thermochronology. PhD Thesis, Mainz University.
12. Brunn J., 1956. Contribution a l'etude Geologique du Pinde septentrional et d'une partie de la Mcedoine Occidentale. Ann. Geol. Pays. Hellen., 7, pp. 1-358.
13. Buick I., 1988. The metamorphic and structural evolution of the Barrovian Overprint, Naxos, Cyclades, Greece. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
14. Caine .S., Evans J.P., Foster C.B., 1995. Fault zone architecture and permeability structure. Geology 24, pp. 1025-1028.

15. Campbell B., 1996. Introduction to Remote Sensing. The Guilford Publications Press, New York, pp. 352.
16. Castany G., 1968, Traité Pratique Des Eaux Souterraines, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 4, pp. 81–82. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1968.tb02913.x
17. Chaplot V., 2005. Impact of DEM size and soil map on SWAT runoff, sediment and NO_3-N loads predictions, Journal of Hydrology, Vol.132, pp. 207-222.
18. Chilton P.J., Lawrence A.R., Stuart M.E., 1995. The impact of tropical agriculture on groundwater quality, in Groundwater Quality, Chapman & Hall, London, pp. 113-122.
19. Cook G.P., 2003. A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers. CSIRO Land and Water, Glen Osmond, SA, Australia.
20. Dazy J., Drogue C., Charmanides Ph., Darlet Ch., 1997. The influence of marine inflows on the chemical composition of groundwater in small islands: the example of the Cyclades (Greece). Environmental Geology 31 (3/4), Springer-Verlag.
21. Denman K.L., et al., 2007. Chapter 7, Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
22. Deree D.U., Patton F.D., 1971. Slope stability in residual soils. In Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Juan Puerto Rico, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 1, pp. 87-170.
23. Diersch H.-J.G., 2003. FEFLOW – Physical basis of modeling, Berlin. WASY, Installation Guide and Demonstration Exercise.
24. Dokou Z., Karatzas G.P., 2002. Saltwater Intrusion Estimation in a Karstified Coastal System using Density-dependent Modeling and Comparison with the Sharp-interface Approach, Hydrological Sciences Journal, 57 (5), pp. 1-15.
25. Dürr S., Altherr R., Keller J., Okrush M., Seidel E., 1978. The median Aegean crystalline belt. Stratigraphy, structure, metamorphism, magmatism. In: Alps, Apennines, Hellenides, pp. 455-476.
26. Evelpidou N., Leonidopoulou D., Vassilopoulos A., Stournaras G., 2005. Procedures concluded to erosion geomorphological characteristics of Naxos, Mykonos, Tinos islands (Aegean Sea). 7th Hellenic Hydrogeological Conference - Athens 2005, Volume II, pp. 117-125.

27. Evelpidou N., Leonidopolou D., Vassilopoulos A., 2010. Tafoni and Alveole Formation. An example from Naxos and Tinos Islands. Natural Heritage from East to West. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, pp. 35-42.
28. Famin V., Philippot P., Jolivet L., Agard P., 2004. Evolution of hydrothermal regime along a crustal shear zone, Tinos Island, Greece. Tectonics 23.
29. Fetter C.W., 1990. Applied Hydrogeology. 2nd ed. Merril publ. Comp., U.S.A., pp. 592.
30. Freeze A., Cherry J., 1979. Groundwater. Hemel Hempstead: Prentice-Hall International.
31. Galanos I., Rokkos D., 1999. Exploring the possibility of lithological and structural mapping using principal component analysis on Landsat TM images of Naxos island. Tech. Chron. Sci. J. TCG, I, No 3, pp. 89-91.
32. Geza M., McCray J., 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. Journal of Environmental Management, Vol. 88, pp. 393-406.
33. Greenbaum D, 1985. Review of remote sensing applications to groundwater exploration in basement and regolith. British Geological Survey Report, OD 85/8, 36 pp.
34. Gülcan S., 2005, Lineament analysis from satellite images, north-west of Ankara, MSc Thesis, Middle East Technical University.
35. Hem J.D., 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geol. Surv. Water Supply. Pap. 1473, 2nd ed., pp. 363.
36. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp. 996.
37. Jacobs J., Angerer J., Vitale J., Shrinivasan R., Kaitho R., 2007. Mitigating Economic Damage in Kenya's Upper Tana River Basin: An application of Arc-View SWAT, Journal of Spatial Hydrology, Vol.7, No.1.
38. Jacobshagen V. et al., 1979. Structure and geotectonic evolution of the Hellenides. In Proc. 6th Coll. Geol. Aegean Region, vol.3, pp. 1355-1367, Athens.
39. Jansen J., 1977. The geology of Naxos. Institute of Geological and Mining Research, Greece.
40. Jensen J., 1986. Introductory digital image processing. A remote sensing perspective. Prentice - Hall, New Jersey, pp. 379.

41. Jouanna P., 1993. A summary of field test methods in fractured rocks, in Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock (eds Bear J, Tsang CF, de Marsily G), Academic Press, Inc., San Diego, pp. 437–543.
42. Krasny J., 1996. Hydrogeological Environment in Hard Rocks: An attempt at its schematizing and terminological consideration. Acta Univesitatis Carolinae Geologica, 40, pp. 115-122.
43. Krasny J., 2002. Hard Rock Hydrogeology. 1st Workshop on Fissured Rocks Hydrogeology Proceedings, Athens, pp. 11-18.
44. Lambrakis N., Tiniakos L., Voudouris K., Kallergis G., 2000. Hydrogeologische Untersuchungen auf der insel Serifos zur Beschaffenheit der granodioritischen Wässer. Beitrage zur Hydrogeologie 51, Graz 2000, pp. 95-110.
45. Larsson I., 1984. Groundwater in hard rocks, studies and reports in hydrology, Vol. 33, UNESCO, Paris.
46. Lillesand T., Kiefer R., 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. Eds. Wiley & Sons, USA, pp. 750.
47. Lister G., Foster G., 1996. Inside the Aegean metamorphic core complexes. Australian Crustal Research Centre, Melbourne, Australia, Technical Publication 45.
48. Lloyd J.W., 1999. Water resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones, UNESCO Publishing.
49. Mather P., 1994. Computer processing of remotely-sensed images. An introduction, Wiley & Sons, Great Britain, pp. 352.
50. Matthess G., 1982. The properties of groundwater. John Wiley & Sons, pp. 500.
51. Migiros G., Stournaras G., Stamatis G., Evelpidou N., Botsialas C., Antoniou V., Vassilakis E., 2008. Geological and tectonic study of the fissured rocks of the Hellenides and their hydrogeological patern. Procedures of 8th International Hydrogeological Congress of Greece, vol. 1, pp. 67-94.
52. Mountrakis D., Sapountzis E., Kilias A., Eleftheriadis G., Christofides G., 1983. Paleogeographic conditions in the western pelagonian margin in Greece during the initial rifting of the continental area. Canadian Journal of Earth Sciences, 20, pp. 1673-1681.
53. Nakićenović N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H-H, Sankovksi A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000. IPCC Special

Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

54. O'Leary D.W., Friedman J.D., Pohn H.A., 1976. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. Geological Society America Bulletin, Vol. 87, pp. 1463-1469.
55. Okrusch M., Brocker M., 1990. Eclogites associated with high-grade blueschist in the Cyclades archipelago, Greece: A review. Eur. J. Mineral, 2, pp. 451-478.
56. Papanikolaou D., 1984. The three metamorphic belts of the Hellenides: a review and a kinematic interpretation. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 17, pp. 551-561.
57. Papanikolaou D., 1986. Late Cretaceous Paleogeography of the Metamorphic Hellenides. Geol. Geoph. Res., IGME, Hors série volume in honor of Prof. Papastamatiou, pp. 315-328.
58. Papanikolaou D., 1987. Tectonic Evolution of the Cycladic blueschist belt (Aegean Sea, Greece). In: Helgeson, H.C. (ed.), Chemical Transport in Metasomatic Processes: NATO ASI Series, pp. 429-450.
59. Partsinevelou A.-S., Lozios S., Stournaras G., 2011. Fracture pattern description and analysis of the hard rock hydrogeological environment in Naxos Island, Hellas. Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences, 2011, Part 1, pp. 45-52.
60. Partsinevelou A.-S., Stournaras G., 2014. Groundwater potential zones in hard rock terrains using remote sensing methods and GIS techniques: A case study from Naxos Island, Greece. Proceedings of 10th International Hydrogeological Congress of Greece, Thessaloniki, Vol. 1, pp. 623-632.
61. Partsinevelou A.-S., Stournaras G., 2015. Groundwater potential zones and study of the groundwater flow regime in hard rock terrains using new technologies. A case study from Naxos Island, Greece. 42nd IAH Congress (AQUA), Rome, Poster Presentation.
62. Piper A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, Trans. Amer. Geophysical Union, V. 25, pp. 914-928.
63. Prasad R. K., Mondal N. C., Pallavi Banerjee, Nandakumar M. V., Singh V. S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. Environ Geol (2008), Vol. 55, pp. 467-475.
64. Repapis C., Zerefos C., Tritakis B., 1977. On the Etesians over the Aegean, Proc. Acad. Athens 52, pp. 572-606.

65. Richards J., 1993. Remote sensing digital image analysis. Springer – Verlag, Berlin, pp. 340.
66. Riedl H., Mariolakos I., Papanikolaou D., Sabot V., 1982. Η εξέλιξη των παλαιών μορφολογικών επιφανειών των Κυκλάδων, Annale Geologiques des pays Helleniques, XXXI, pp. 191-250.
67. Saaty T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of Mathematical Psychology, Vol. 15, pp. 234 – 281.
68. Saaty T.L., Vargas L., 1984. Inconsistency and Rank Preservation. Journal of Mathematical Psychology, 28, pp. 205-214.
69. Saaty T.L., HU G., 1997.Ranking by Eigenvector Versus Other Methods in the Analytic Hierarchy Process. Appl. Math. Lett., Vol. 11, No. 4, Elsevier Science Ltd., pp.121-125.
70. Sabot V., Papanikolaou D., 1976. Some geomorphological aspects of the Cyclades and their importance on the morphotectonic evolution of the area. IGME, pp. 259.
71. Sabot V., 1978. La geomorphologie et la geologie du Quaternaire de l'ile de Naxos, Cyclades – Gréce. PhD Thesis, Brussel.
72. Sawer C.N., McCarty P.L., 1967. Chemistry for sanitary engineers, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, pp. 518.
73. Scanvic J.Y, 1997. Aerospatial remote sensing in geology. Rotterdam, Balkema, p. 239.
74. Schäuble H., Marinoni O., Hinderer M, 2008. A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time, Computers & Geosciences, Vol. 34, pp. 935-943.
75. Schoeller H., 1962. Les eaux souterraines. Mason et cie ed. Paris.
76. Schuiling R.D., Kreulen R., 1979. Are Thermal Domes Heated by CO_2 - rich Fluids from the Mantle?, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 43, pp. 298-302, Amsterdam (Elsevier).
77. Sharp J.M., 1993. Fractured aquifers/reservoirs. Approaches, problems and opportunities. Mem. Of 24th Congress of IAH, Oslo, Part 1, pp. 103-114.
78. Singh D., 2012. Evaluation of long-term NDVI time series derived from Landsat data through blending with MODIS data. Atmosféra, Volume 25 (1), pp. 43-63.
79. Singhal B.B.S., Gupta R.P., 1999. Applied hydrogeology of fractured rocks. Kluwer Academic Publishers (now Springer).
80. Singhal B.B.S., 2008. Overview of the Hydrogeology of Hard Rock Aquifers: Applications for their Survey, Management, Modelling and Protection. In Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers. Sustainable Maanagement and Optimal Monitoring

Network Design. Edited by Shakeel Ahmed, Ramaswamy Jayakumar and Abdin Salih, Springer.

81. Singhal B.B.S., Gupta R.P., 2010. Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer, pp. 1-11.
82. Stournaras G., Alexiadou Ch., Leonidopoulou D., 2003. Correlation of hydrogeologic and tectonic characteristics of the hard rock aquifers in Tinos Island (Aegean Sea, Hellas). International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Prague.
83. Stournaras G., Migiros G., Stamatis G., Evelpidou N., Botsialas K., Antoniou B., Vassilakis Emm., 2003. The fractured rocks in Hellas. Groundwater in fractured rocks. Selected papers from the Groundwater in Fractured Rocks International Conference, Prague. Edited by Krasny J. and Sharp J.
84. Strahler A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Amer. Geophys. Union Trans., 38, pp. 913-920.
85. Theoharatos G.A., Tselepidaki I.G., 1989. Distribution of rainy days in the Aegean Area. Theoritical and Applied Climatology 42, pp. 111-116, Springer – Verlag.
86. Urai J.L., Schuiling R.D., Jansen J.B.H., 1990. Alpine deformation on Naxos (Greece). From Knipe R.J. & Rutter E.H. (eds.), 1990, Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. Geological Society Special Publication, No. 54, pp. 509-522.
87. Vasalakis A., Voudouris K., Fytikas M., Dimopoulos G., 2005. Groundwater quality in Naxos island, Cyclades, Greece. Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes Island, Greece.
88. Vijith H., 2007. Groundwater potential in the hard rock terrain of western Ghats: A case study from Kottayam district, Kerala using Resourcesat (IRS-P6) data and GIS techniques. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 35, No. 2.
89. Wijbrans J. R. & McDougall. L., 1988. Metamorphic evolution of the Attic Cycladic Metamorphic Belt on Naxos (Cyclades, Greece) utilizing ^{40}Ar-^{39}Ar age spectrum measurements. Journal of metamorphic Geology, v. 6, pp. 1-23.
90. Zanis P., Kapsomenakis I., Philandras C., Douvis K., Nikolakis D., Kanelopoulou E., Zerefos C., Repapis C., 2008. Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece. International J Climatology. DOI:10.1002/joc.1809.
91. Zheng J., Li G., Han Z., Meng G., 2010. Hydrological cycle simulation of an irrigation district based on a SWAT model, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 51, pp. 1312-1318.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Φωτογραφία 1: Πηγή Χάσκα.

Φωτογραφία 2: Γεώτρηση στο χωριό Μουτσούνα.

Φωτογραφία 3: Πηγή Αγιάς.

Φωτογραφία 4: Πηγάδι στο χωριό Λυώνας.

Φωτογραφία 5: Πηγή χωριού Δανακού.

Φωτογραφία 6: Πηγή χωριού Κωμιακής (Κορωνίδα).

Φωτογραφία 7: Πηγή Εμπολή (Απόλλωνας Νάξου).

Φωτογραφία 8: Γεώτρηση στην περιοχή Ψιλή Άμμος.

Φωτογραφία 9: Πηγή Μυρίση.

Φωτογραφία 10: Πηγή Άνω Ποταμιάς.

Φωτογραφία 11: Πηγή Αριών (Όρος Ζας).

Φωτογραφία 12: Πηγή χωριού Τσικαλαρειό.