

Κεφάλαιο Θ1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΚΑΡΣΤ – ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

α. Γενικά

Στο κεφάλαιο Β1 (Τόμος Πρώτος) είδαμε τις δύο κύριες κατηγορίες πετρωμάτων και σχηματισμών ως προς την αποθήκευση και τη ροή του υπόγειου νερού:

- Τα *κοκκώδη* (πορώδη) πετρώματα ή σχηματισμοί
- Τα *ρωγμώδη* πετρώματα ή σχηματισμοί

Είδαμε τις βασικές ιδιότητες και τη διαφοροποίηση των δύο αυτών κατηγοριών.

Ειδικότερα στα ρωγμώδη πετρώματα (fractured rocks ή fissured rocks, παλιότερα αναφερόμενα και ως hard rocks) υπάγονται και οι ανθρακικοί σχηματισμοί. Όμως λόγω του ότι υδρογεωλογικά αυτοί παρουσιάζουν αφενός ειδική, διαφορετική συμπεριφορά και αφετέρου ιδιαίτερο, σημαντικό ενδιαφέρον, θεωρούνται ως ιδιαίτερος τύπος των ρωγμωδών σχηματισμών ή κατ' άλλους, ιδιαίτερη κατηγορία, οι *καρστικοί σχηματισμοί*.

Οι καρστικοί σχηματισμοί για τη λιθολογία των οποίων βλ. πιο κάτω, έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Υδρογεωλογία γιατί:

- Καλύπτουν περίπου το 30% της επιφάνειας των Ηπείρων και ειδικά στην Ελλάδα ίσως περισσότερο (βλ. Τόμος Τρίτος, Σχήμα ΣΤ9.3).
- Περισσότερο από το 50% (ή ίσως από το 60%) του υπόγειου νερού αρχίζει την υπόγεια διαδρομή του από καρστική περιοχή, δηλ. περισσότερο από το 50% ή 60% του κατεισδύοντος κάθε έτος νερού κατεισδύει στο υπέδαφος από καρστική περιοχή και οι καρστικοί σχηματισμοί δημιουργούν πλούσια υδροφόρα στρώματα, αν και παλιότερα οι καρστικές περιοχές εθεωρούντο λείψυδρες έως ξηρές.

Έτσι η *καρστική Υδρογεωλογία* (karstic Hydrogeology) έχει καθιερωθεί ως ένας ιδιαίτερος διακριτός και σημαντικός κλάδος της Υδρογεωλογίας γιατί επιπλέον οι καρστικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες άξιες λόγου για καθαρά θεωρητικό, αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον. Η καρστική Υδρογεωλογία έχει ειδική μεθοδολογική προσέγγιση των αντίστοιχων θεμάτων. Μεγάλος αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων στην Ελλάδα

και Διεθνώς αναφέρονται στην Καρστική Υδρογεωλογία, όπως φαίνεται από την ενδεικτική παρατιθέμενη βιβλιογραφία που δείχνει και το επιστημονικό ενδιαφέρον. Στη χώρα μας ειδικά, μεγάλο ποσοστό του αντλούμενου υπόγειου νερού προέρχεται από καρστικές περιοχές.

β. Καρστ – Ορισμοί

Αφού θα ασχοληθούμε με την Υδρογεωλογία του καρστ, είναι προφανώς αναγκαίο να γνωρίσουμε το ίδιο το μέσο, το καρστ, κάνοντας έτσι μία εισαγωγή για υδρογεωλογική μελέτη του. Και αυτό γιατί σύμφυτες με τις ιδιότητες του καρστ είναι και οι δυσκολίες που παρουσιάζει η μελέτη της καρστικής Υδρογεωλογίας.

Κατ' αρχή είναι πολύ δύσκολο να δώσουμε στην έννοια “καρστ” ένα ορισμό επακριβή και περιεκτικό. Γιατί αν και ο όρος αυτός είναι συνδεδεμένος με τοπίο που έχει ορισμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά και περιγράφεται άρα από την εποπτική εμπειρική αντίληψη που έχουμε γιαυτό το τοπίο, εντούτοις δεν γίνεται κατανοητός με βάση κάποια συγκεκριμένη παράμετρο (ή κάποιες συγκεκριμένες παραμέτρους).

Ο διεθνής λοιπόν όρος καρστ είναι γεωλογικός όρος που αφορά περιοχές οι οποίες αποτελούνται από ανθρακικά πετρώματα και έχουν χαρακτηριστικό ανάγλυφο που είναι αποτέλεσμα μιας ιδιότυπης διάβρωσης της “καρστικής διάβρωσης”.

Ο GEZE, B. (1973) δίνει για το καρστ τον ακόλουθο ορισμό: “περιοχή συνιστάμενη από ανθρακικά πετρώματα, συμπαγή και διαλυτά, στα οποία εμφανίζονται χαρακτηριστικές επιφανειακές και υπόγειες μορφές”. Πρόκειται για τις “καρστικές μορφές”. Οι καρστικές λοιπόν μορφές (που οι επιφανειακές από αυτές δίνουν το χαρακτηριστικό ανάγλυφο για το οποίο μιλήσαμε πιο πάνω) είναι αποτέλεσμα της καρστικής διάβρωσης.

Από τους Υδρογεωλόγους ο όρος καρστ χρησιμοποιείται για να διαφοροποιήσει και να περιγράψει τον ιδιότυπο τρόπο κυκλοφορίας του υπόγειου νερού σ' αυτό.

Χρησιμοποιείται συχνά και ο όρος “καρστικοποίηση”. Μ' αυτόν κατά τον GEZE, B. (1973) εννοείται “το σύνολο των διαδικασιών γενέσεως και εξέλιξης των επιφανειακών και υπογείων μορφών μέσα σε μια περιοχή ανθρακικών πετρωμάτων”. Με άλλα λόγια εννοείται η διαδικασία και το αποτέλεσμα της καρστικής διάβρωσης.

Επομένως συνοπτικά η έννοια του καρστ είναι γενικά συνδεδεμένη με:

- τα ανθρακικά πετρώματα,
- την καρστική διάβρωση.

γ. Τα ανθρακικά πετρώματα

i. Τα ιζηματογενή αυτά πετρώματα (καθώς και τα αντίστοιχα μεταμορφωμένα) συνδέονται με την εξωτερική γεωδυναμική και τη ζωή. Μας φέρουν έτσι μαρτυρίες από το προκάμβριο μέχρι τις ημέρες μας. Καταλαμβάνουν κατ' όγκο το 2% της λιθόσφαιρας, αποτελούν το 30% περίπου των ιζηματογενών πετρωμάτων και καλύπτουν μεγάλο μέρος της επιφάνειας των ηπείρων: 10-15% (PETITJOHN, I. 1957, HAM, W. 1962). Ειδικά στην Ελλάδα ή σημασία τους είναι μεγαλύτερη και κατά εκτιμήσεις καλύπτουν το 30% περίπου της επιφάνειας της.

Πρόκειται δηλαδή για μια σημαντική κατηγορία πετρωμάτων που έχουν μάλιστα οικονομικό ενδιαφέρον είτε γιατί χρησιμοποιούνται ποικιλότροπα (επεξεργασμένα ή όχι) ως κατασκευαστικά υλικά, είτε γιατί με την παρουσία τους δημιουργούν συνθήκες (“επαφής” κ.λπ.) που δίνουν γένεση σε διάφορα μεταλλοφόρα κοιτάσματα (βιωτίτες κλπ), είτε γιατί μπορούν να φιλοξενούν υδρογονάνθρακες, κυρίως όμως νερό.

ii. Χημική σύσταση

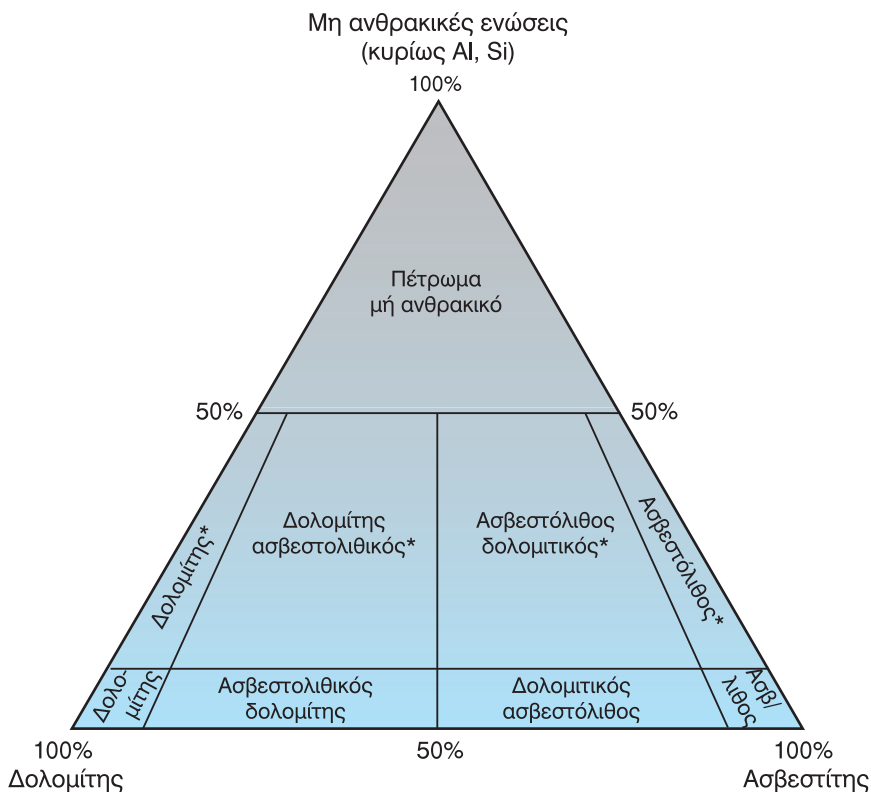
Όπως δηλώνει και το όνομα τους ανθρακικά πετρώματα είναι αυτά που συνίστανται κυρίως από ανθρακικές ενώσεις.

Η πιο διαδεδομένη από αυτές είναι το άλας με ασβέστιο, το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) με τους δύο ορυκτολογικούς τύπους: τον ασβεστίτη και τον αραγονίτη.

Ο ασβεστίτης είναι πιο σταθερός για τις επιφανειακές συνθήκες της λιθόσφαιρας και άρα πιο άφθονος μέσα στα πετρώματα.

Το ανθρακικό άλας με μαγνήσιο, το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO_3), ο μαγνησίτης, είναι σχετικά σπάνιο ορυκτό και σχηματίζει κοιτάσματα (λευκόλιθου). Όμως είναι πολύ συχνό σε ισόμορφη παράμειξη με ασβέστιο, δηλ. ως μικτό ασβεστομαγνησιούχο άλας ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) που είναι ο γνωστός δολομίτης. Τα άλλα άλατα (με Fe, Mn, Zn) εμφανίζονται ως δευτερεύοντα συστατικά, εκτός από περιορισμένες περιπτώσεις μεταλλοφόρων κοιτασμάτων.

Αλλά τα ανθρακικά πετρώματα πέρα από τα δύο πιο πάνω βασικά ανθρακικά άλατα, τον ασβεστίτη (ή αραγονίτη) και το δολομίτη, μπορούν να περιέχουν και άλλες μη ανθρακικές ενώσεις (αργίλλο, πυριτικές ενώσεις κ.λπ.). Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα μεγάλο φάσμα ποικιλιών των ανθρακικών και μη ανθρακικών πετρωμάτων. Στο σχήμα Θ1.1 έχουμε μία κατάταξή τους σε τριγωνικό διάγραμμα κατά τους LEIGHTON, M. – PENDEXTER, C. (1961). Κατά το διάγραμμα αυτό ένα πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως ανθρακικό όταν περιέχει πάνω από 50% ανθρακικά άλατα και ως “μη ανθρακικό” όταν περιέχει κάτω από 50%. Βλέπουμε λοιπόν ότι μέσα στα ανθρακικά περιλαμβάνονται πετρώματα που περιέχουν βέβαια σ' ένα μεγάλο ποσοστό τους ανθρακικά



*αργιλούχος, ψαμμικός, πυριτικός, κ.λπ.

Σχήμα 01.1. Τριγωνικό διάγραμμα κατάταξης των ιζηματογενών πετρωμάτων που καθορίζει την ονοματολογία και τους τύπους των ανθρακικών πετρωμάτων σε συνάρτηση με την ορυκτολογική σύστασή τους.

άλατα, αλλά μπορούν να περιέχουν επίσης και σε σημαντικό ποσοστό και σε μεγάλη ποικιλία μάλιστα, άλλα ορυκτά ή στοιχεία, οπότε θα έχουν και αντίστοιχη ονομασία (π.χ. χαλαζιακός ασβεστόλιθος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος κ.λπ.). Αυτό βέβαια θα παίζει κάποιο ρόλο στις ιδιότητές τους, συμπεριλαμβανομένων και των υδραυλικών. Ας σημειωθεί τέλος ότι ανθρακικά πετρώματα υπάρχουν τόσο ως ιζηματογενή (π.χ. ασβεστόλιθος), όσο φυσικά και ως αντίστοιχα μεταμορφωμένα (π.χ. μάρμαρο).

iii. Υφή και δομή

Η υφή των ανθρακικών πετρωμάτων, όπως παρατηρείται στο μικροσκόπιο (μικρίτης, σπαρίτης, κόκκοι, η μεταξύ τους σύνδεση και συσχέτιση κ.λπ.)

δείχνει μια μεγάλη διαφοροποίηση και επιτρέπει, μια σχετική κατάταξη. Εξ άλλου τα πετρώματα αυτά παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση ως προς τη δομή τους, όπως διαπιστώνεται, από μακροπαρατηρήσεις (λεπτοπλακώδεις, χονδροπλακώδεις, μαζώδεις κ.λπ. ασβεστόλιθοι). Αυτές οι διαφοροποιήσεις είναι φυσικά συνέπεια των συνθηκών ιζηματογένεσης, σε ό,τι αφορά βέβαια τα ιζηματογενή ανθρακικά. Προκειμένου για τα μεταμορφωμένα παίζουν ρόλο και οι συνθήκες και ο βαθμός μεταμόρφωσης. Όλα αυτά όμως, αν και γενικά είναι πολύ ενδιαφέροντα για τις γεωλογικές επιστήμες, εν τούτοις ειδικά για την Υδρογεωλογία έχουν έμμεση σχέση λόγω του ότι επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα του πετρώματος.

iv. Φυσικές ιδιότητες

Έχουν χαμηλό συντελεστή ειδικής θερμότητας που σημαίνει ότι η θερμοκρασία του νερού επηρεάζει βασικά τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Η θερμική αγωγιμότητά τους σε μονάδες C.G.T. είναι 0,005-0,008. Η πυκνότητα είναι περίπου κατά μέσο όρο: για τον ασβεστόλιθο 2,75 (2,6-2,9) gr/cm^3 , το δολομίτη 2,83 (2,80-2,85) gr/cm^3 και το μάρμαρο 2,85 (2,80-2,90) gr/cm^3 (RUIZ, M. 1966, JAKOSKY, J. 1957). Οι πιο πάνω τιμές αναφέρονται, στο συμπαγές πέτρωμα.

Η ειδική αντίσταση του ασβεστόλιθου είναι 10^4 - 10^7 Ohm/cm και του μάρμαρου $6 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^7$ Ohm/cm (JAKOSKY, J. 1957).

Η ταχύτητα μετάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων στον ασβεστόλιθο είναι, περίπου 2.500-2.700 m/sec και των επιμήκων 4.300-5.000 m/sec. Για το μάρμαρο οι αντίστοιχες τιμές είναι περίπου 2.600-2.900 m/sec και 4.800-5.300 m/sec περίπου (YOUASH, Y. 1970).

Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι $9 \cdot 10^{-7}$ - $14 \cdot 10^{-7}$ (C.G.S) για τον δολομίτη και $4 \cdot 10^{-6}$ (C.G.S) για τον ασβεστόλιθο (JAKOSKY, J. 1957) .

Βέβαια εξυπακούεται ότι ανάλογα με το δείγμα μπορούν να παρατηρούνται αποκλίσεις, πάρα πολύ μεγάλες μάλιστα, ως προς τις πιο πάνω τιμές που είναι απλά ενδεικτικές. Ακόμα ας σημειώσουμε εδώ ότι αναφέραμε μόνο τις τιμές των ιδιοτήτων και παραμέτρων εκείνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διασκόπηση καρστικών υδροφόρων οριζόντων.

v. Χημικές ιδιότητες

Θα αναφέρουμε μόνο τη διαλυτότητα στο αποσταγμένο νερό. Αυτή για τον ασβεστόλιθο είναι πολύ χαμηλή: 14-15 mgr/lit στους 25° C για κανονικές συνθήκες πίεσης (SCHOELLER, H. 1962). Για τους δολομίτες δεν έχουμε πληροφορίες. Αντίθετα για το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO_3) είναι σχετικά μεγάλη: 94-117 mgr/lit. Αλλά για το θέμα αυτό θα επανέλθουμε (βλ. καρστικοποίηση).

vi. Μηχανικές ιδιότητες

Αυτές μας ενδιαφέρουν πολύ γιατί παίζουν καθοριστικό ρόλο στο βαθμό διαρρηκτικότητας και κατ' επέκταση και στην καρστικοποίηση.

Οι μηχανικές λοιπόν ιδιότητες θα περιγραφούν πιο καλά με τις μηχανικές παραμέτρους των υπόψη πετρωμάτων. Όμως θα πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι η σημαντική λιθολογική ποικιλία των ανθρακικών πετρωμάτων συνεπάγεται και αντίστοιχη διαφοροποίηση στη μηχανική συμπεριφορά και φυσικά στις μηχανικές παραμέτρους. Έτσι οι τιμές που θα δοθούν πιο κάτω είναι απλά ενδεικτικές και όχι αυστηρά καθοριστικές, αφού μπορούμε να βρούμε ανάλογα πετρώματα με σημαντικά διαφορετικές τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων, έστω και αν οι τελευταίες προσδιορίστηκαν με την ίδια μέθοδο και υπό ίδιες συνθήκες.

Οι μηχανικές παράμετροι που μας ενδιαφέρουν λοιπόν είναι:

- το μέτρο ελαστικότητας E,
- το μέτρο ολίσθησης (ή ακαμψίας) G,
- η αντοχή σε θλίψη (μονοαξονική) $\bar{\sigma}$,
- η συνοχή C,
- η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , και,
- ο λόγος του Poisson ν .

Στον πίνακα Θ1 έχουμε τις συνήθεις τιμές των πιο πάνω παραμέτρων για τα συνηθέστερα ανθρακικά πετρώματα: ασβεστόλιθο, δολομίτη, μάρμαρο.

Οι πιο πάνω τιμές του E και του G είναι 30-40 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της αργίλλου και περίπου παραπλήσιες με αυτές του γυαλιού. Έτσι τα ανθρακικά πετρώματα έχουν μικρή ελαστικότητα, δηλ. μεγάλο E και G, και έχουν σχετικά μικρή αντοχή $\bar{\sigma}$, δηλ. βρίσκονται σχεδόν μέσα στα όρια των πετρωμάτων μέσης αντοχής. Κατά συνέπεια τα ανθρακικά πετρώματα συμπεριφέρονται ως θραυσίγενή: απέναντι στις διάφορες τάσεις θραύονται και δεν παραμορφώνονται. Ανταποκρίνονται στον αγγλοσαξονικό όρο “ικανά πετρώματα”. Ας σημειωθεί ότι οι δολομίτες είναι σχετικά λιγότερο θραυσίγενείς και τα μάρμαρα είναι τα σχετικά περισσότερο θραυσίγενή. Βέβαια η υφή, η

Πίνακας Θ1. Τομές μηχανικών παραμέτρων ανθρακικών πετρωμάτων

	E (Kg/cm ²)	G (Kg/cm ²)	$\bar{\sigma}$ (Kg/cm ²)	C (Kg/cm ²)	ϕ (°C)	ν
Ασβεστόλιθος	3,5-6,0·10 ⁵	1,7-2,5·10 ⁵	750-1200	350-500	28°-45°	0,22-0,31
Δολομίτης	3,8-6,4·10 ⁵	2,0-3,0·10 ⁵	950-1300	400-600	30°-45°	0,11-0,14
Μάρμαρο	4,5-7,2·10 ⁵	2,2-3,3·10 ⁵	1000-1300	450-600	30°-38°	0,29-0,33

ακριβής λιθολογική σύσταση, κ.λπ. διαφοροποιούν κατά κατηγορίες και τους ασβεστόλιθους και τους δολομίτες και τα μάρμαρα. Πάντως οι πιο πάνω μηχανικές ιδιότητες των ανθρακικών πετρωμάτων, σε συνδυασμό μάλιστα με τη διαλυτότητα τους, είναι καθοριστικές για την τεκτονική, την υδρογεωλογική και γενικά τη γεωλογική συμπεριφορά τους.

δ. Καρστική διάβρωση

Με τον ορό “καρστική διάβρωση” χαρακτηρίζεται ή μεικτή μορφή διάβρωσης-αποσάθρωσης τόσο της επιφάνειας του καρστ, όσο και της εσωτερικής μάζας του. Τα αίτια που προκαλούν την καρστική διάβρωση είναι κυρίως χημικά (διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων από το νερό) και κατά δεύτερο λόγο μηχανικά (μηχανική δράση του νερού, όπως και των άλλων παραγόντων εξωγενών, π.χ. θερμότητα, ή ενδογενών, π.χ. τεκτονισμός κ.λπ.)

Η χημική διάβρωση οφείλεται στη διαλυτότητα του CaCO_3 (ή του MgCO_3 ή του $(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3$) των ανθρακικών πετρωμάτων. Η διαλυτότητα αυτή, όπως είδαμε είναι πολύ χαμηλή, αλλά πάντως μακροχρόνια είναι ικανή να προκαλέσει διάλυση μεγάλων μαζών.

Η διάλυση του CaCO_3 (και των αντίστοιχων) γίνεται σύμφωνα με την εξής χημική αντίδραση



Στην ουσία δεν πρόκειται για μια απλή διάλυση, αλλά για μια σύνθετη χημική διεργασία με παρουσία όξινων ιόντων κλπ και με πολλές φάσεις. Σε βιομηχανικές περιοχές με έκλυση μεγάλων ποσοτήτων CO_2 , όπως και άλλων όξινων παραπροϊόντων, η διαλυτότητα διευκολύνεται.

Με τη μεταβολή διαφόρων φυσικοχημικών παραγόντων η διαλυτότητα αυτή, αλλά και η ταχύτητα διάλυσης μεταβάλλονται πολύ. Οι λεπτομέρειες της διάλυσης αυτής, γνωστές στη βιβλιογραφία, δεν κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθούν εδώ. Θα σημειώσουμε μόνο ότι η χημική διάβρωση στο εσωτερικό μιας καρστικής μάζας απαιτεί ύπαρξη ασυνεχειών (ρωγμών) τεκτονικής προέλευσης ώστε να μπορέσει να διαρρεύσει το νερό. Επομένως η χημική διάβρωση ακολουθεί (ή έστω συμβαδίζει με) τη μηχανική διάβρωση. Η τελευταία άρα είναι προϋπόθεση της πρώτης στην περίπτωση αυτή, αλλά και συνέπεια της τεκτονικής.

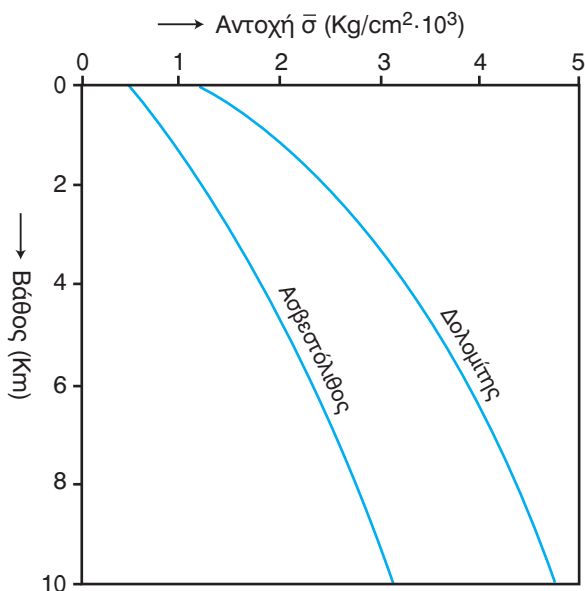
Πάντως πλην των άλλων η θερμοκρασία παίζει ρόλο στην καρστική διάβρωση. Π.χ. στη θερμοκρασία των 0°C η διαλυτική ικανότητα του νερού απέναντι στο CaCO_3 είναι 70 mg/lit νερού, ενώ σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία π.χ. στους 25°C είναι $14\text{-}15 \text{ mg/lit}$, άρα μειώνεται δραστικά. Η αύξηση της πίεσης, του CO_2 κλπ. αυξάνει τη διαλυτική ικανότητα του νερού κλπ.

Η μηχανική διάβρωση μπορεί να οφείλεται σε εξωγενείς ή ενδογενείς παράγοντες.

Αύτη που οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες (μηχανική δράση του ρέοντος νερού, μηχανικές συνέπειες των μεταβολών της θερμοκρασίας, μηχανική δράση ανέμων κ.λπ.) έχει βέβαια τη σημασία της αλλά δεν μπορεί παρά να προσβάλλει μόνο τα επιπόλαια τμήματα του καρστ.

Εκείνη όμως που οφείλεται σε ενδογενείς παράγοντες (τεκτονισμός με τις επάλληλες τεκτονικές τάσεις που επικρατούν στο υπέδαφος) είναι πρωταρχικής σημασίας γιατί θα προκαλέσουν τις αρχικές ασυνέχειες (ρωγμώσεις) μέσα στις οποίες θα ρεύσει το υπόγειο νερό και θα τις διευρύνει με τη διαλυτική του ικανότητα (χημική διάβρωση). Επίσης θα δοθεί έτσι η ευκαιρία να δράσουν ενδεχόμενα και άλλοι φυσικοχημικοί παράγοντες.

Ο τεκτονισμός μιας ανθρακικής μάζας είναι προϋπόθεση για την καρστικοποίηση της. Όμως ο ίδιος τεκτονισμός δεν προκαλεί τα ίδια αποτελέσματα σε όλο το πάχος του καρστ, έστω και αν αυτό είναι λιθολογικά ομογενές. Και αυτό γιατί με το βάθος αυξάνεται και η θερμοκρασία και κυρίως η πίεση και επομένως μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες, κυρίως το όριο θραύσης του ανθρακικού σχηματισμού, βλ. Σχήμα Θ1.2, με συνέπεια μια προοδευτική μείω-



Σχήμα Θ1.2. Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής σε θραύση $\bar{\sigma}$ του ασβεστόλιθου και του δολομίτη σε συνάρτηση με το βάθος στο οποίο βρίσκονται

ση της πυκνότητας των ρωγμών από την επιφάνεια προς το βάθος. Βέβαια στο θέμα αυτό μεγάλη σημασία έχει η παλαιογεωγραφική, παλαιοκλιματολογική και παλαιο- ή νεο- τεκτονική εξέλιξη μιας καρστικής περιοχής. Οι πληροφορίες που θα έχουμε από αυτούς τους παράγοντες θα αποτελούν άπια χρήσιμα και όχι καθοριστικά δεδομένα. Γιατί οι παράγοντες που υπεισέρχονται στην καρστικοποίηση και τη σημερινή διαμόρφωση μιας καρστικής μάζας, άρα οι παράμετροι που την προσδιορίζουν, είναι πολλοί και ποικιλότυποι (τεκτονική δομή, λιθολογία, γεωλογικό υπόβαθρο, εξέλιξη τεκτονική – παλαιογεωγραφική – παλαιοκλιματολογική κ.λπ.) και ο βαθμός επηρεασμού από τον κάθε παράγοντα μεταβλητός.

Αποτέλεσμα της καρστικής διάβρωσης είναι οι γνωστές καρστικές μορφές επιφανειακές και υπόγειες.

- Από τις επιφανειακές που ενδιαφέρουν λίγο αυτή τη μελέτη, αναφέρουμε απλά τις διάφορες γλυφές, χύτρες, δολίνες, ουβάλες, πόλγες κ.λπ.
- Από τις υπόγειες που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα αυτή τη μελέτη, θα σημειώσουμε εδώ μερικά είδη τα οποία θα αναφέρουμε σε επόμενα κεφάλαια: ρωγμές διάφορες (στενές, χαίνουσες κ.λπ.) οχετοί (αγωγοί), έγκοιλα, σπήλαια.

Η εξέλιξη ενός καρστ και των μορφών του, οι ιδιοτυπίες και οι λεπτομέρειες του, η παλαιογεωγραφία του και ο συσχετισμός των πιο πάνω με την τεκτονική και τη λιθολογία, με άλλα λόγια η μελέτη του καρστ και της καρστικοποίησης σε όλες τις εκφάνσεις τους είναι θέμα που μελετήθηκε και μελετάται ευρέως σε παγκόσμια κλίμακα από πολλούς ειδικούς μελετητές.

ε. Το βάθος καρστικοποίησης

i. Η γνώση του βάθους καρστικοποίησης μιας ανθρακικής περιοχής είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την Υδρογεωλογία, γιατί μόνο η καρστικοποιημένη μάζα των ανθρακικών πετρωμάτων μπορεί να αποτελέσει υπόγειο ταμιευτήρα και να επιτρέψει τη ροή του υπόγειου νερού και μάλιστα ένας καρστικός υδροφορέας είναι τόσο καλύτερος, όσο περισσότερο καρστικοποιημένος είναι. Οι συμπαγείς ανθρακικές μάζες έχουν πολύ μικρό (συνήθως μηδενικό) ενεργό πορώδες και περίπου αμελητέα περατότητα. Είναι στεγανές μάζες, ανενεργές υδρογεωλογικά.

Για το βάθος λοιπόν καρστικοποίησης έχουμε τα πιο κάτω θεωρητικά δεδομένα:

ii. Η αρχή της εσωτερικής καρστικοποίησης μιας μάζας γίνεται από τις διάφορες ασυνέχειες (τις παντοειδείς ρωγμές και διακλάσεις) που δημιουργούνται σε αυτήν λόγω τεκτονισμού της, δηλ. λόγω διαφόρων τάσεων τεκτονικής και φυσικά λόγω της θραυσιγενούς συμπεριφοράς των ανθρακικών πετρωμάτων απέναντι των τάσεων.

Όμως όσο αυξάνεται το βάθος τόσο αυξάνεται και η θερμοκρασία και κυρίως η πίεση με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται οι μηχανικές σταθερές, δηλ. η συμπεριφορά των ανθρακικών πετρωμάτων. Κυρίως, κατά το νομό των Coulomb-Mohr, αυξάνεται το όριο αντοχής σε θλίψη. Πραγματικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Θ1.2, στην επιφάνεια του εδάφους, βάθος 0 m, η αντοχή αυτή του (καθαρού) ασβεστόλιθου είναι περίπου 600 Kg/cm^2 και του δολομίτη 1100 Kg/cm^2 , ενώ σε βάθος 2000 m, οι αντίστοιχες τιμές είναι 1300 Kg/cm^2 και 2400 Kg/cm^2 αντίστοιχα, δηλ. κάτι παραπάνω από διπλάσιες. Έτσι οι ίδιες τάσεις δεν έχουν τα ίδια μηχανικά αποτελέσματα σε όλο το πάχος (βάθος) μιας καυστικής μάζας. Άρα μια ορισμένη τεκτονική τάση συμπίεσης μπορεί να ρωγματώσει τα επιφανειακά τμήματα μιας καρστικής μάζας, όχι όμως κατ' ανάγκη και τα βαθύτερα. Άρα το δίκτυο των ρωγμών είναι πυκνότερο στα επιφανειακά τμήματα, από ό,τι στα βαθύτερα. Βέβαια οι τάσεις εφελκυσμού θραύουν ευκολότερα τα βαθιά στρώματα, όμως δεν εξαιρούν και τα επιφανειακά. Ακόμα τα όρια “πλαστικής συμπεριφοράς” είναι ευρύτερα για τα βαθύτερα στρώματα (λόγω συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας), ώστε μερικές φορές να θεραπεύονται τυχόν υπάρχουσες ασυνέχειες μικρού πλάτους και να προκαλείται μία “αναδιοργάνωση” των καρστικών πετρωμάτων. Παρατηρήσεις που γίνονται σήμερα σε επιφανειακά καρστικά πετρώματα που πρέπει κάποτε να ήταν βαθιά, επαληθεύουν αυτήν την άποψη.

iii. Το νερό που κατεισδύει θα “κορέσει” τη διαλυτική του ικανότητα στα επιπόλαια στρώματα οπότε θα παύσει πλέον να διαλύει ή θα διαλύει σχετικά λιγότερο στα βαθύτερα. Είναι ίσως φυσικό και αναμενόμενο, λόγω μεταβολής των συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση), στο βάθος να έχουμε κατακρήμνιση CaCO_3 (ή MgCO_3). Η εκ νέου “ενεργοποίηση” του νερού και η διαλυτική επανάδρασή του είναι προβληματική γενικά, φαίνεται ελάχιστα πιθανή και πάντως στην καλύτερη περίπτωση θα είναι πολύ περιορισμένη. Οι άλλοι εξωγενείς παράγοντες που συντείνουν στην καρστική διάβρωση (μεταβολή της θερμοκρασίας κ.λπ.) είναι προφανές ότι μειώνονται έντονα με το βάθος και πρακτικά δρουν στα πολύ επιπόλαια τμήματα των καρστικών μαζών, αφού κάτω από ένα μικρό βάθος έχουμε τη ζώνη ομοθερμίας.

Παίρνοντας υπόψη όλα τα πιο πάνω, όπως και τη λιθολογική ετερογένεια και τη μηχανική ετερογένεια και ανισοτροπία των ανθρακικών πετρωμάτων, μπορούμε να πούμε ότι ο βαθμός καρστικοποίησης μιας ανθρακικής μάζας αναμένεται κατά γενικό κανόνα να μειώνεται με το βάθος κατά ασυνεχή τρόπο και ότι από κάποιο βάθος και κάτω πρακτικά να μηδενίζεται. Δηλ. κάτω από κάποιο βάθος δεν θα είναι καρστικοποιημένη η ανθρακική μάζα, αλλά θα είναι σχεδόν συμπαγής ή με σχετικά αραιό δίκτυο ρωγμών .

Όμως αν δούμε πως μπορεί να γίνουν πιο συγκεκριμένα τα πιο πάνω με βάση τις παρατηρήσεις και τα πρακτικά δεδομένα που υπάρχουν από την υπαίθρια έρευνα.

Εδώ λοιπόν θα πρέπει να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- τις ανθρακικές μάζες που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο βάσης
- τις ανθρακικές μάζες που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο βάσης.

iv. Για την πρώτη περίπτωση (μάζες κάτω από το επίπεδο βάσης) έχουμε τα εξής στοιχεία:

- Σε *παράκτια καρστ* παρατηρήθηκε καρστικοποίηση ασβεστολίθων μέχρι μικρό βάθος (70-100 m) κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας: π.χ. Περιοχή Άργους, παράκτια ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, περιοχή πηγής Αλμιρού Ηρακλείου Κρήτης, περιοχή Κορινθίας κ.λπ.

Τα βάθη αυτά βέβαια δεν μπορεί να αποτελούν έκκληση. Βρίσκονται ασφαλώς μέσα στο αναμενόμενο φάσμα. Θα μπορούσαν να είναι και πολύ μεγαλύτερα, κάτι βέβαια που δεν αποκλείεται εντελώς από τους ερευνητές.

- Σε *άλλες περιπτώσεις παράκτιων καρστ*, όπως στη νήσο Κεφαλονιά, στην Απουλία της Ν. Ιταλίας παρατηρήθηκε επαφή γλυκού-αλμιρού νερού σε πλήρη συνέχεια κάτω από το υπέδαφος της από τη μια πλευρά (ανατολική) μέχρι την άλλη (δυτική).

Στις δύο αυτές περιπτώσεις αναφέρονται ενδείξεις ή υπόνοιες για καρστικοποίηση σε σημαντικό βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί αν ληφθεί υπόψη το μεγάλο εύρος των ανοδικών και καθοδικών κινήσεων στη Μεσόγειο κατά τα τελευταία γεωλογικά έτη.

- *Αναφέρονται ακόμη στην βιβλιογραφία περιπτώσεις σε διάφορες περιοχές του κόσμου, όπου παρατηρούνται καρστικές μορφές, κυρίως μεγάλων διαστάσεων, σε μεγάλα βάθη κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας: μέχρι 2000 m στη Φλόριδα, μέχρι, 3000 m και περισσότερο στις πετρελαιοπηγές της Μέσης Ανατολής κ.λπ.*

Οι μη αμφισβητούμενες αυτές παρατηρήσεις έρχονται κατ' αρχή σε κάποια αντίθεση με τα θεωρητικά δεδομένα. Μπορούν πάντως, τουλάχιστο μέχρι ορισμένο βαθμό, να εξηγηθούν από την παλαιογεωγραφική εξέλιξη των αντίστοιχων περιοχών: ανοδικές και καθοδικές κινήσεις μεταβάλλουν τα επίπεδα βάσης και μπορούν να φέρουν σε μεγάλη βάθη πρώην αβαθείς σχηματισμούς. Εξ άλλου το γεγονός ότι στα μεγάλα αυτά βάθη παρατηρούνται μόνο ευμεγέθεις καρστικές μορφές σημαίνει ότι έγινε κάποια “αναδιοργάνωση” του καρστ κάτω από τις νέες συνθήκες (πίεσης και θερμοκρασίας) και επουλώθηκαν οι μικρομεγέθεις καρστικές μορφές. Ή ακόμα για τις περιπτώσεις των πετρελαιούχων καρστ είναι συζητήσιμη η διαλυτότητα των

ανθρακικών πετρωμάτων από τους υδρογονάνθρακες υπό τις εκεί επικρατούσες συνθήκες. Πάντως για ορισμένες περιπτώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία δύσκολα μπορεί να βρεθεί εύλογη εξήγηση. Ίσως πρόκειται για μεμονωμένα «επεισόδια».

- Σε ενδοχωρικά καρστ: Στην περιοχή της Θεσσαλίας όπου τουλάχιστο 300 γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε καρστ ακάλυπτο ή καλυμμένο από προσχώσεις επιφανειακές, παρατηρήθηκε ότι η καρστικοποίηση είναι γενικά σημαντική στα πρώτα 30-40 m του καρστ, στη συνέχεια μικρότερη μέχρι τα 70 m. Κάτω από αυτό το βάθος και μέχρι τα 200 m που έφθασαν μερικές γεωτρήσεις, το καρστ είναι συνήθως συμπαγές. Αν δεν υπήρχε υδροφορία μέχρι τα 70 m, τότε συνήθως η γεώτρηση αποδείχονταν άγονη. Στην περιοχή της Άρρυσσας περίπου μια δωδεκάδα γεωτρήσεων έδειξε τα ίδια φαινόμενα. Ακόμη στην περιοχή αυτή υπάρχει η λίμνη Βεγορίτιδα προς το δυτικό τμήμα της που έρχεται σε επαφή, κατευθείαν με το καρστ. Σε απόσταση 2,5 km δυτικότερα υπάρχει η λίμνη των Πετρών που επίσης έρχεται σε επαφή με το καρστ. Μεταξύ της στάθμης των δύο αυτών λιμνών υπήρχε, σε φυσική κατάσταση, πριν από την επέμβαση του ανθρώπου, υψομετρική διαφορά 40 m, δηλ. υδραυλική κλίση 1,6% (σχεδόν πενταπλάσια του συνήθους). Αν το καρστ που παρεμβάλλεται, μεταξύ των δύο λιμνών δεν ήτο στεγανό, θα αναμενόταν μία συνεχής ροή από τη λίμνη Πετρών προς τη λίμνη Βεγορίτιδα, ώστε να επέλθει, κάποια περίπου εξίσωση των επιπέδων της στάθμης τους. Και όμως η διακύμανση της στάθμης κάθε μιας από τις δύο λίμνες αποδείχθηκε ότι ήτο ανεξάρτητη από την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι η ανθρακική μάζα (τριαδικο-ουρασικοί μαρμαροειδείς ασβεστόλιθοι) είναι ελάχιστα καρστικοποιημένη, ώστε να συμπεριφέρεται ως πρακτικά ελάχιστα περατή. Διαφορετικά δεν μπορεί να εξηγηθεί η τεράστια υδραυλική κλίση που παρατηρείται.

v. Για τη δεύτερη περίπτωση (μάζες πάνω από το επίπεδο βάσης) έχουμε τα εξής στοιχεία (για παράκτια ή ενδοχωρικά καρστ):

- Στην περιοχή της Γκιώνας κατά μήκος της σήραγγας που διανοίχτηκε για τη μεταφορά του νερού από το φράγμα του Μόρνου προς την Αθήνα, έγιναν βαθιές γεωτρήσεις μέχρι βάθος 1000 m (κάτω από την επιφάνεια του εδάφους) μέσα σε καρστ. Πιστοποιήθηκε λοιπόν έτσι εκεί ότι η έντονη επιφανειακή καρστικοποίηση μειώνεται με το βάθος κατά το μάλλον ή ήττον ασυνεχώς. Η ανάπτυξη της καρστικοποίησης σε μεγάλα βάθη είναι περιορισμένη. Αντίθετα η απλή ρωγμάτωση δεν φαίνεται να περιορίζεται με το βάθος. Ελάχιστα ίχνη κυκλοφορίας νερού διαπιστώθηκαν σε μεγάλα βάθη, ώστε το καρστ εκεί να μπορεί να θεωρείται στεγανό. Έχει αναφερθεί μάλιστα από διακεκριμένο Επιστήμονα που παρακολούθησε τη διάνοιξη της σήραγγας,

ότι κάτω από κάποιο, σχετικά μικρό βάθος, δεν υπάρχει καρστικοποίηση. Υπάρχει μόνο τεκτονική ρωγμάτωση, χωρίς διακλάσεις, ενδιάμεσα που να επιτρέπουν την κυκλοφορία υπόγειου νερού. Δηλ. το καρστ εκεί είναι σχεδόν στεγανό, αδιαπέρατο.

- Στο Ξεροβούνι (ΒΑ του Παρνασσού) γεωτρήσεις που έφθασαν σε βάθη από 170 m μέχρι 400 m έδειξαν ότι η καρστικοποίηση περιορίζεται με το βάθος και μάλιστα κάτω από ορισμένο βάθος το πέτρωμα είναι στεγανό, με εξαίρεση κάποιες ζώνες ρηγμάτωσης, όπου διατηρείται σημαντική περατότητα μέχρι άγνωστο βάθος. Αξιοσημείωτο είναι κατά ότι κατά την έρευνα τα πρηνή είναι περατά μέχρι 30-40 m βάθος, πλην των ισχυρά ρηγματωμένων, όπου υπάρχει μεγάλη περατότητα σε μεγαλύτερα βάθη.
- Στην καρστική περιοχή μεταξύ των πηγών του Αγγειτή και του οροπεδίου του Νευροκοπίου διαπιστώθηκε με ιχνηθεσία ότι υπάρχει υδραυλική επικοινωνία σε βάθος 400-500 m, αλλά κοντά στην επαφή του καρστ με το υποκείμενο κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο.

Είναι γενικά παρατηρημένο, ότι το καρστ στην επαφή του με υποκείμενους μεταμορφωμένους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι σχετικά εντονότερα καρστικοποιημένο ίσως λόγω διαφορετικής μηχανικής συμπεριφοράς.

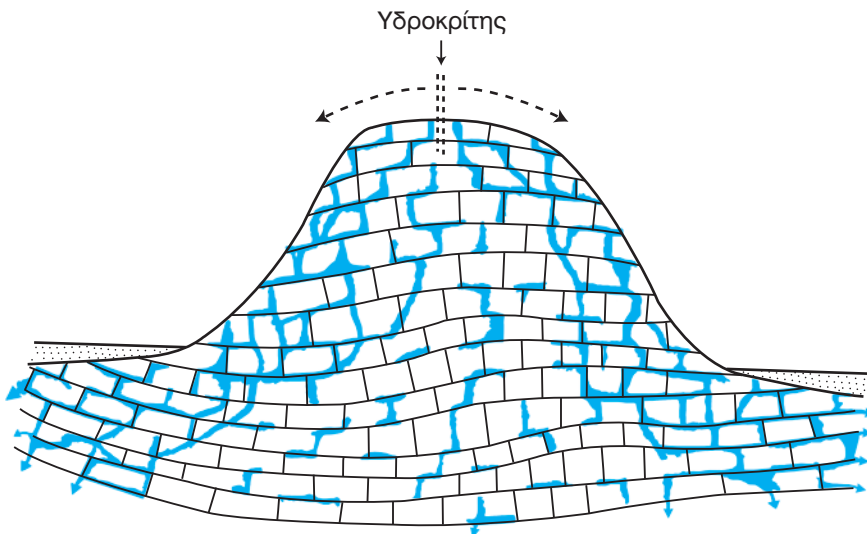
- Ακόμα στα κεντρικά Απέννινα, στην καρστική μάζα του Γκραν Σάσσο, με υψόμετρο 2000 m περίπου, για την κατασκευή του αυτοκινητόδρομου Ρώμης-Πεσκάρας, έγιναν δύο παράλληλες σήραγγες μήκους 11 Km και διατομής 80 m² η κάθε μία. Είχαν προηγηθεί τρεις βαθιές αναγνωριστικές γεωτρήσεις (1000 m, 1300 m και 1600 m). Διαπιστώθηκε σημαντική καρστικοποίηση και ύπαρξη υδροφόρων στρωμάτων μέχρι βάθη 200-300 m περίπου. Κάτω από αυτό το βάθος η ανθρακική μάζα είναι, συμπαγής και αδιαπέρατη με εξαίρεση μόνο μερικά ρήγματα (ή ζώνες ρηγμάτων) που έφεραν πάντως μέσα στις σήραγγες νερό υπό μεγάλη πίεση.

Ύστερα από όλα τα πιο πάνω γίνεται κατανοητό ότι δεν μπορούν να διατυπωθούν γενικά συμπεράσματα που θα είναι ακριβή και απόλυτα.

Προς αποφυγή συγχύσεων θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η “καρστικοποίηση” έτσι όπως ίσως την εννοούν οι γεωμορφολόγοι και οι γεωγράφοι του καρστ, συναντάται ασφαλώς σε πολύ μεγαλύτερα βάθη από αυτά που αναφέρθηκαν εδώ. Για την Υδρογεωλογία όμως έχει σημασία η καρστικοποίηση εκείνη που έχει δημιουργήσει ένα πλήρες δίκτυο από ρωγμές και κοιλότητες διαφόρων τύπων που βρίσκονται σε άμεση υδραυλική επικοινωνία, ώστε να επιτρέπουν τη ροή του νερού. Τα κενά καρστικής προέλευσης απομονωμένα και μη επικοινωνούντα έστω και αν είναι κάπως πυκνά, είναι πρακτικά αδρανή για την Υδρογεωλογία.

Με αυτή την έννοια η καρστικοποίηση που μας ενδιαφέρει εδώ, για τα καρστ που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο βάσης θα πρέπει να περιορίζεται σε μικρά σχετικά βάθη. Ως τέτοια διακινδυνεύουμε να προτείνουμε βάθη 100-150 m (ή έστω 200 m). Εκτός αν η παλαιογεωγραφική εξέλιξη μιας περιοχής είναι τέτοια που ευνόησε την καρστικοποίηση βαθύτερων καρστικών μαζών που άλλοτε βρισκόταν πάνω από το σημερινό επίπεδο βάσης. Αυτό είναι αρκετά σύνηθες στον ελληνικό χώρο και δυσκολεύει έτσι τις εκτιμήσεις.

Για τα καρστ που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο βάσης η καρστικοποίηση μπορεί να είναι κατ' αρχή γενική και ο βαθμός της εξαρτάται από το εξελικτικό στάδιο στο οποίο βρίσκεται το υπόψη καρστ. Όμως και στην περίπτωση αυτή για τον ελληνικό χώρο, όπως αναφέρθηκε σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (Γκιώνα, Παρνασσός, κ.λπ.) αυτή η καρστικοποίηση μειώνεται με το βάθος και τα διάφορα δίκτυα ρωγμών και κοιλοτήτων είναι αραιά και απομονωμένα μεταξύ τους, ώστε μετά από κάποιο βάθος, η περατότητα γίνεται χαμηλή. Αυτό έχει ως συνέπεια τα υπόγεια νερά να ρέουν κυρίως στα επιπόλαια τμήματα των καρστικών μαζών. Αυτό το τελευταίο είναι σημαντικό γιατί μας βοηθά στο διαχωρισμό των υδρογεωλογικών ενοτήτων και των υπόγειων λεκανών και υπολεκανών στις καρστικές περιοχές. Στο σχήμα Θ1.3 έχουμε ένα παράδειγμα. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι στην Υδρογεωλογία για την εκτίμηση



Σχήμα Θ1.3. Καρστική διάβρωση και κυκλοφορία του υπόγειου νερού σε σημαντική εδαφική προεξοχή (λόφο ή βουνό). Σημειώνεται και η πιθανή θέση του υδροκρίτη.

του ενεργού για βάθους καρστικοποίησης έχει μεγάλη σημασία η λιθολογική σύσταση του καρστ, η τεκτονική του δομή και η παλαιογεωγραφική και παλαιο- νεο- τεκτονική του εξέλιξη.

Ενδεικτική Βιβλιογραφία για το Κεφάλαιο Θ1

- ΑΘΑΝΑΣΙΑΣ, Σ. – ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ. (1994): «Συμβολή στη μελέτη χημισμού των νερών του καρστικού υδροφόρου συστήματος των πηγών Αγίου Νικολάου Νάουσας».
– *Πρακτικά 2^{ov} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, τόμος Α', σελ. 189-202*
- ARONIS, G. (1961): «A special case of karst Hydrology».
– *Mémoires de l' A.I.H., Reunion de Rome (1961), tome VI, p. 61-64, Rome.*
- ARONIS, G. (1964): «Observations on the coastal karst of Greece».
– *Mémoires de l' A.I.H., Reunion d; Athènes (1962), tome V, p. 256-265, Athènes.*
- ARONIS, G. – BURDON, D. – SERIS, K. (1961): «Development of a karst limestone spring in Greece».
– *Int. Ass. of Scient. Hydr., Symposium of Athens (1961), Vol. II, p. 564-585, Athens.*
- AVIAS, J. (1964): «Sur la méthodologie en hydrogéologie karstique».
– *Mémoires du C.E.R.H., tome I, p. 5-19, Montpellier.*
- BURDON, D. (1965): «Hydrogeology of some karstic areas of Greece».
– *Hydrology of fractured rocks, Symposium of Dubrovnik, p. 308-317, Louvain Belgium.*
- CARO, P. (1965): «La chimie du gaz carbonique et des carbonates, et les phénomènes hydrogéologiques karstiques».
– *B.R.G.M., Chron. d'Hydrogéologie, n° 7, 51 p.*
- CORBEL, J. (1959): «Les grandes cavités de France et leurs relations avec les facteurs climatiques».
– *Ann. de Spéléol., t. 14, n° 1-2, p. 31-47, Moulis (Ariège), France*
- CVIJIC, J. (1918): «Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst».
– *Rec. Trav. Inst. géograph. Alpine Vol. 6, n° 3, p. 1-56*
- DREISS, S.C. (1989): «Regional scale transport in karst aquifer».
– *Water Resourc., V. 25, n° 1, p. 126-134*
- ERASO, A. (1975): «Le rôle des facteurs physico-chimiques dans le processus de la karstification (conférence inaugurale)».
– *Ann. Spéléol., V 30, n° 4, p. 567-580.*
- HAM, W. (1962): «Classification of carbonate rocks».
– *A symposium (Amer. Ass. I. Petroleum geologists), April 1961, Denver Colorado, 279 p., Ed. At Tulsa, Oklahoma.*

- ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ. (1980β): «Το παράκτιο Καρστ. Οι παράγοντες διαμόρφωσής του και οι δυνατότητες αξιοποίησής του».
– *Πρακτικά II Παν/νίου Σεμιναρίου Υδρολογίας*, σελ. 483-508, Αθήνα.
- KIRALI, L. (1969): «Statistical analysis of fractures (orientation and density)».
– *Geol. Rundschau*, t. 59, p. 125-151, Stuttgart.
- ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ, Ι. – ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ, Κ. – ΠΑΤΕΡΑΚΗΣ Γ. (1986): «Μελέτη των μαρμάρων Μερέντας (ανατ. Αττικής) από τη σκοπιά της δυνατότητας παραγωγής αδρανών υλικών».
– *Δελτ. της Ε.Γ.Ε., Τ. XVII*, σελ. 99-109.
- LEHMANN, O. (1932): «Die Hydrographie des Karstes».
– *Enzyklopädie der Erkünde*, t. 6, 212 p., Denticke Leipzig und Wien.
- LEVEQUE, P. – ΠΑΡΑΚΙΣ, Ν. (1969): «Etude de l' activité en tritium de quelques résurgences karstiques en Grèce méridionale»
– *C.R. Acad. Sc.*, t. 268, p. 1023-1025, Paris.
- MARTEL, A. (1921): «Nouveau traité des eaux souterraines».
– *Din. Paris*, 840 p.
- MEINZER, O. (1923): «Outline of groundwater hydrology with definitions».
– *U.S. Geol. Surv. Water Supply, paper 494*, p. 1-67, Virginia
- ΜΙΛΑΤΟΒΙΤΣ, Β. – ΒΑΚΙΤΣ, Μ. (1967): «Le karst du Liban. Etude de son évolution d' après les recherches hydrogéologiques».
– *Chronique d' Hydrogéologie*, No 10, p. 95-107, Orlean,
- MISTARDIS, G. (1975): «Recherches sur le karst du mont Parnasse (Grèce moyenne orientale)».
– *Ann. Spéléol.*, V. 30, n° 4, p. 725-731.
- ΜΟΝΟΠΩΛΗΣ, Δ. (1974): «Υδρολογία του καρστ (μετ' ιδιαιτέρας μνείας του Ελληνικού καρστ)».
– *Δελ. Ε.Γ.Ε., Τόμος XI*, τεύχος 1 (*Χρονικά του I Παν/νίου Σεμιναρίου Υδρολογίας*), σελ. 267-295, Αθήνα.
- ΜΟΝΟΠΩΛΗΣ, Δ. – ΜΑΣΤΟΡΗΣ Κ. (1969): «Υδρογεωλογική μελέτη της υφαλμύρου πηγής Αλμυρού (Ηράκλειον Κρήτης)».
– *Ι.Γ.Ε.Υ. Υδρολ. Και Υδρογεωλ. Έρευναι*.
- ΜΠΟΥΛΟΥΚΑΚΗΣ, Η. ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ. (1995): «Οι υδροφόροι ορίζοντες των Αστερουσίων ορέων. Πρόδρομη ανακοίνωση των ερευνητικών εργασιών».
– *Πρακτικά 3^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου*, σελ. 39-53m
- MUDRY, J.-PUIG J.M. (1991): «Le karst de la domaine de Vaucluse (Vaucluse, Alpes de Haute Provence, Drôme)».
– *Karstologia*, V. 18, p. 29-38
- ΟΜΠΕΡΤΣΑΝΩΦ, Ι. – ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ, Ι. – ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ, Σ. (2002): «Καρστικές πηγές στην Ελλάδα. Αποτύπωση και αξιολόγηση με τη χρήση

- Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών».
 – *Πρακτικά 6^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, σελ. 311-324*
- PETITJOHN, E. (1957): «Sedimentary rocks».
 – *2nd Ed, p 1-718, Harper and Row, New York, Evanston, London.*
- RAZACK, M. (1981): «Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées. Numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens».
 – *Hydrogéol. et Geol. de l' Ing., n° 3, p. 257-263, Editions du B.R.G.M. Orléans, France.*
- SCHOELLER, H. (1965): «Sur la limitation de la circulation en profondeur dans le karst».
 – *Chronique d'Hydrogéologie, n° 7, p. 43-49*
- SOULIOS, G. (1982): «Quelques caractéristiques géotechniques des roches carbonatées: I: Introduction, données bibliographiques, problèmes».
 – *Geol. Appl. et Idrogeol., Vol. XVII, p. 186-196*
- STOURNARAS, G. et al (2004): «Karst features as world heritage in Hellas».
 – *Forum on karst and world heritage in Europe, Lipica Slovenia 10p.*
- ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ, Γ. et al (1992): «Γεωτεχνική ταξινόμηση και μηχανική ανάλυση βραχομάζας. Κριτική εφαρμογή σε συνθήκες αστάθειας καρστικού Σπηλαίου (Κρήτη, Ελλάδα)».
 – *Ann. Geol. Pays Hell. V. 35, p. 459-470.*
- SWEETINIG, M. (1972): «Karst landforms».
 – *Mac Millan Press Ltd, 362 p., London.*
- FOLK, R. (1959): «Practical petrographic classification of limestones».
 – *Amer. Assoc. Petroleum Geologists, Bull., t. 43, p. 1-38*
- FORD, D. (1973): «Development of the principal types of solution caves in limestone».
 – *Actes, 6th Cong. Int. Spéléol., Olomouc, Tchecoslovaquie*
- ΨΩΜΙΑΔΗΣ, Ε. et al. (1997): «Μελέτη των καρστικών συστημάτων στις λεκάνες νότιας Στερεάς Ελλάδας με χρήση δορυφορικών εικόνων LANDSAT και G.T.S.»
 – *Πρακτικά 4^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, σελ. 600-611*