

γεωτεχνικά επιστημονικά θέματα

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΤΟΥ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΤΟΜΟΣ	4	ΤΕΥΧΟΣ	1 / 1993
VOLUME		ISSUE	

*geotechnic
scientific issue*

Η Τεχνική Γεωλογία στην προστασία των Μνημείων

Βασίλης Χρηστάρας¹

Περίληψη

Η πέτρα, ένα από τα σπουδαιότερα υλικά που χρησιμοποιούνται είτε στις κατασκευές είτε για διακοσμητικούς σκοπούς, συνδέεται άμεσα με την ιστορία μας. Σημαντικά κτίρια και αγάλματα, κατασκευασμένα από φυσικούς λίθους, αποτελούν μαρτυρία της πολιτιστικής μας κληρονομιάς.

Ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους αυτών των ιστορικών μνημείων είναι η αποσάθρωση που προκαλείται τόσο από τις κλιματικές μεταβολές όσο και από τη ατμοσφαιρική ρύπανση. Η μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών μέσα στο χρόνο, συμβάλουν επίσης στην καταστροφή των μνημείων. Ο κεκλιμένος Πύργος της Πίζας αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αστοχίας της θεμελίωσης.

Ο ακριβής προσδιορισμός της αποσάθρωσης απαιτεί λεπτομερή καταγραφή των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των φυσικών λίθων. Κανένα μέτρο προστασίας δεν είναι δυνατό να ληφθεί σε ένα μνημείο, χωρίς προηγούμενο προσδιορισμό της φυσικής του κατάστασης. Η αποσάθρωση μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά με διάφορες μεθόδους, όπως οι υπέρυχοι, ο σημειομετρητής σε πολωτικό μικροσκόπιο, η απώλεια βάρους τριβής, το σφυρί Schmidt κλπ.

Η σύγκριση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων έδειξε ότι μικρή αύξηση της αποσάθρωσης προκαλεί μεγάλη μείωση της μηχανικής αντοχής και σημαντική μεταβολή των φυσικών χαρακτηριστικών ενός πετρώματος, αποδεικνύοντας τη σημασία των πετρολογικών δεδομένων των δομικών υλικών και των γεωτεχνικών συνθηκών της γύρω περιοχής.

Εισαγωγή

Οι φθοροποιές επιπτώσεις του χρόνου πάνω στα Μνημεία είναι ένα γεγονός που, εδώ και αρκετό καιρό, απασχολεί σοβαρά τη διεθνή κοινωνία, με στόχο την προστασία τους. Είναι η ανάγκη του ανθρώπου να διατηρήσει την πολιτιστική κληρονομιά, σε μια προσπάθεια να συντηρήσει την ταυτότητά του μέσα στο χρόνο. Βέβαια πρέπει να ομολογήσει κανείς ότι τώρα τελευταία η ταυτότητα ενός λαού δίνεται στα Διεθνή Ληξιαρχεία κατά δήλωση και κατόπιν απλής αιτήσεως του ενδιαφερομένου, χωρίς να πολυενδιαφέρει η ιστορία.

Τα Μνημεία είναι κατασκευασμένα από φυσικά δομικά υλικά και ιδίως από πετρώματα που αφθονούσαν στην κάθε περιοχή. Ιδιαίτερα τα Μνημεία της Μεσογείου είναι κατασκευασμένα κυρίως από μάρμαρο, γρανίτη, σερπεντίνη, ψαμίτη και σχιστόλιθους. Η παρουσία θαλασσιών θειούχων και χλωριούχων αλάτων, σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες ιδανικές συνθήκες υγρού και θερμού κλίματος, επιταχύνουν τις διαδικασίες αποσάθρωσης των φυσικών δομικών λίθων στην περιοχή. Ήδη ο Ρωμαίος ποιητής Οράτιος (65-8 π.Χ.) αναφέρεται στη μαύρη κρούστα που κάλυπτε τα μάρμαρα των ναών της Ρώμης. Επίσης η περιοχή της Μεσογείου είναι από τις ασταθέστερες γεωλογικά περιοχές, τόσο από τεκτονική όσο και από σεισμική άποψη. Τοπικά γεωτεχνικά φαινόμενα επιδεινώνουν τις συνθήκες ευστάθειας και διατήρησης ενός Μνημείου στο χρόνο. Ο Πύργος της Πίζας, στη Βόρεια Ιταλία, είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα γεωτεχνικού προβλήματος.

¹Επίκουρος Καθηγητής του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Τομέα Γεωλογίας & Φυσικής Γεωγραφίας, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Από καθαρά τεχνική άποψη, το πρόβλημα της προστασίας των Μνημείων θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως ένα ακόμη περιβαλλοντολογικό πρόβλημα. Με μια πρόσθετη ιδιαιτερότητα: Τα Μνημεία είναι μοναδικά. Δεν αναπαράγονται.

Η γεωλογική προσέγγιση του προβλήματος γίνεται σε τρεις τομείς: α) μελέτη της αποσάθρωσης των φυσικών δομικών λίθων σε συνδυασμό με τη μεταβολή των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους, β) μελέτη ευστάθειας και της μηχανικής αντοχής των γεωλογικών σχηματισμών στη θέση θεμελίωσης του Μνημείου σε συνδυασμό με τη μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών τους μέσα στο χρόνο και γ) μελέτη νεοτεκτονικών φαινομένων και σεισμικών συμβάντων.

Η εμπλοκή των γεωλόγων επιστημόνων στο θέμα αυτό εκφράστηκε και με τη δημιουργία διεθνών επιστημονικών ενώσεων και τη διοργάνωση διεθνών συνεδρίων και σεμιναρίων, με στόχο την ανταλλαγή απόψεων και την εξεύρεση λύσεων στα προβλήματα της προστασίας των Μνημείων. Ως παράδειγμα αναφέρω το διεθνές συνέδριο της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG) στην Αθήνα (1988), του διεθνούς συνεδρίου του Πολυτεχνείου της La Rochelle (1991), τα ετήσια συνέδρια STREMA, και τα διεθνή συνέδρια του IGCM στο Bari (1989) και στη Geneve (1991). Επίσης σημαντική έκφραση αυτής της επιστημονικής ανησυχίας ήταν η δημιουργία της «Επιτροπής για την Προστασία των Μνημείων της Μεσογείου - IGCM», στο Bari το 1989. Επίσης στα πλαίσια της Κοινότητας Μεσογειακών Πανεπιστημίων (CUM), ιδρύθηκε Μεταπτυχιακό Τμήμα Προστασίας Μνημείων, το οποίο συνεργάζεται με την προηγούμενη επιτροπή. Το Τμήμα

αυτό έχει έδρα το Πολυτεχνείο του Bari και λειτουργεί με Συντονιστική Επιστημονική Επιτροπή από το Πολυτεχνείο του Bari (F. Zezza), το Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (B. Χρηστάρας), το ΕΜΠ (Θ. Σκουλικίδης / Α. Μοροπούλου) και από το Εθνικό Μουσείο της Μάλτας (J. Cassar).

Αποσάθρωση των φυσικών λίθων

Τα διάφορα πετρώματα, ανάλογα με την αφθονία τους στον εκάστοτε γεωγραφικό χώρο, απετέλεσαν τη μοναδική σχεδόν πρώτη ύλη, είτε για την κατασκευή έργων υποδομής και διαβίωσης είτε για τη διακοσμητική και την τέχνη. Σημαντικά κτίρια (ναοί κυρίως) και έργα τέχνης του παρελθόντος μαρτυρούν αδιάψευστα την πολιτιστική μας κληρονομιά. Ο Παρθενώνας στην Ακρόπολη των Αθηνών, κατασκευασμένος από το φημισμένο Πεντελικό μάρμαρο και η Αφροδίτη της Μήλου, του γνωστού γλύπτη Φιδία, είναι δύο από τα σημαντικότερα μνημεία της Μεσογείου. Αντίθετα, εντυπωσιακά έργα τέχνης, στην Κνωσό και στη Φαιστό, είναι κατασκευασμένα από βιογενή ασβεστόλιθο του Νεογενούς, που αφθονεί στην περιοχή (Moraiti & Christaras, 1991).

Ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους φθοράς των μνημείων, κυρίως της Μεσογείου, είναι η αποσάθρωσή τους λόγω κλιματικών μεταβολών και ατμοσφαιρικής μόλυνσης. Οι φυσικοί δομικοί λίθοι είναι επιδεκτικοί στη φθορά που παρουσιάζουν οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες που προκαλούν την καταστροφή τους. Η παρουσία επιβλαβών αλάτων (π.χ. θεικών και χλωριούχων) των Ca, Mg, Na, στο νερό των πόρων, ως αποτέλεσμα αντίδρασης του νερού της βροχής ή της υγρασίας με τα ορυκτά των πετρωμάτων, είναι ένας από τους σπουδαιότερους παράγοντες της αποσύνθεσης των φυσικών δομικών λίθων.

Τα άλατα στην ατμόσφαιρα, από την εξάτμιση των θαλασσών, είναι επίσης μια μόνιμη αιτία αποσάθρωσης των πετρωμάτων, όχι μόνο στις παραθαλάσσιες περιοχές αλλά και στη γειτονική ενδοχώρα. Τα καυσαέρια και η ρύπανση της ατμόσφαιρας των μεγάλων πόλεων και των βιομηχανικά ανεπτυγμένων περιοχών, είναι ακόμη ένας λόγος που επιταχύνει την αποσάθρωση των Μνημείων. Ήδη από το 1306 μ.Χ. στην Αγγλία ψηφίστηκε νόμος που υποχρέωνε τον περιορισμό χρήσης άνθρακος, για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Λονδίνο. Η παρουσία ανιόντων στην ατμόσφαιρα, μειώνει το pH, προκαλώντας χημική αλοιώση των ορυκτών των πετρωμάτων. Ειδικότερα, η παρουσία οξειδίων του θείου στην ατμόσφαιρα, με το σχηματισμό θεικού οξέος γίνεται αιτία δημιουργίας γύψου στην επιφάνεια των ασβεστολίθων, μαρμάρων και ψαμμιτών, που τόσο άφθονα χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά.

Είναι γνωστό ότι όλα τα ορυκτά δεν εμφανίζουν την ίδια αντοχή στην αποσάθρωση, αλλά η συμπεριφορά τους εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σχηματισμού των. Έτσι με φθίνουσα σειρά, ανθεκτικότερο ορυκτό είναι ο χαλαζίας και ακολουθούν οι μαρμαρυγίες, το ορθόκλαστο, τα πλαγιόκλαστα, οι αμφίβολοι, οι πυρόξενοι και τέλος ο ολιβίνης, που θεωρείται ως το ολιγότερο

ανθεκτικό ορυκτό. Έτσι, λοιπόν, χημική αποσάθρωση, διακύμανση της θερμοκρασίας, αυξημένη υγρασία και απορροφητική ικανότητα είναι μερικές από τις αιτίες που συμβάλλουν στην αποσύνθεση και το διαμελισμό των φυσικών λίθων.

Το είδος της αποσάθρωσης διαφέρει ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες (Πίνακας I). Για παράδειγμα, στις υγρές περιοχές, το αποτέλεσμα της χημικής αποσάθρωσης είναι εντονότερο των μηχανικών διεργασιών. Σε περιοχές όπως της Μεσογείου, με υγρό και θερμό κλίμα, η διαδικασία αποσάθρωσης είναι πολύ έντονη. Το νερό των πόρων, ως μέσο μεταφοράς ευδιάλυτων αλάτων, επιταχύνει την αποσάθρωση των φυσικών λίθων, στο εσωτερικό τους. Η παρουσία μικρών ή μεγάλων ρωγμών συμβάλλει και αυτή προς την ίδια κατεύθυνση. Επίσης η διακύμανση της θερμοκρασίας δημιουργεί φαινόμενα διαστολών - συστολών, που προκαλούν τη φθορά των πετρωμάτων. Σύμφωνα με τους Bell & Dearman (1988) διαστολή ενός πετρώματος κατά 1.5% προκαλεί πίεση μέχρι 52 MN/m², ανάλογα με το μέγεθος των πόρων.

Πίνακας I. Κλιματικές συνθήκες και διεργασίες αποσάθρωσης.

Table I. Climatic conditions and weathering process.

Κλίμα	Είδος αποσάθρωσης
Ψυχρό, Ξηρό Ψυχρό, Υγρό	Έντονη μηχανική αποσάθρωση Μέση χημική και μικρή μηχανική αποσάθρωση
Θερμό, Υγρό Μόνιμα υγρό Εναλλασσόμενο υγρό/ξηρό	Έντονη χημική αποσάθρωση Χημική αποσάθρωση Λατεριτική αποσάθρωση, έκπλυση
Θερμό, Ξηρό	Πολύ μικρή αποσάθρωση

Μηχανική συμπεριφορά των φυσικών λίθων

Το φαινόμενο της αποσάθρωσης επιδρά άμεσα στη μεταβολή της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Αύξηση της αποσάθρωσης συνεπάγεται αυτόματη μείωση της μηχανικής αντοχής και μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων. Η στατιστική επεξεργασία των μεγεθών αυτών θα προσδιορίσει τον κανόνα μεταβολής των ιδιοτήτων αυτών μεταξύ τους.

Οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητες εμφανίζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των πετρωμάτων. Υπάρχουν πετρώματα σκληρά ή μαλακά, πορώδη ή μη κλπ. Η ακριβής περιγραφή του πετρώματος θα βοηθήσει στην ορθή εκτίμηση της ταυτότητάς του. Στον Πίνακα II δίδονται ενδεικτικά μεγέθη βασικών φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών μερικών γνωστών πετρωμάτων.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι δεν είναι δυνατή η περιγραφή των επιπτώσεων της αποσάθρωσης ενός πετρώματος χωρίς παράλληλη μελέτη, ή και προηγούμενη γνώση, του τρόπου μεταβολής των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων.

Ο πετρογραφικός και ορυκτολογικός τύπος, ο βαθμός αποσάθρωσης, το απόλυτο και σχετικό μέγεθος των κόκκων, η μορφή και η γωνιότητα των κόκκων, το χρώμα, η σκληρότητα, η αντοχή σε θλίψη, η παραμορφωσιμότητα (μέτρο Young και συντελεστή Poisson), η ξηρή πυκνότητα, το πορώδες, η απορροφητικότητα, η ταχύτητα υπερήχων, η αποσθρωσιμότητα (αντοχή σε θειικά άλατα και μεταβολή θερμοκρασίας), η πυκνότητα, το μέγεθος και το άνοιγμα των κατατμήσεων, είναι μερικές ιδιότητες που πρέπει να προσδιοριστούν αρχικά είτε πρόκειται για γεωλογικό σχηματισμό είτε για δομικά υλικά.

Βασικός παράγοντας για την ακριβή περιγραφή της φυσικής κατάστασης ενός πετρώματος είναι η ποσοτική αποτίμηση του βαθμού αποσάθρωσης.

1) Ένας άμεσος τρόπος είναι δυνατός με τη μέθοδο του σημειομετρητή (Point Counter, Christaras et. al., 1989). Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή κυρίως στα πυρηγενή πετρώ-

ματα και βασίζεται στην εμβαδομέτρηση αποσαθρωμένων και υγείων ορυκτών.

Ο λόγος αποσαθρωμένων (και μικρορωγμών) προς τα υγιή μέρη ονομάζεται Δείκτης Αποσάθρωσης (WI).

$$\text{Δείκτης Αποσάθρ. (WI)} = \frac{\text{αποσ. ορυκτά} + \text{Μικρορωγμές}}{\text{υγιή ορυκτά}}$$

Ο δείκτης αυτός διαπιστώθηκε ότι σχετίζεται άμεσα τόσο με την ταχύτητα υπερήχων όσο και με όλες τις άλλες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων, αποδεικνύοντας ότι μικρή αύξηση του βαθμού αποσάθρωσης προκαλεί μεγάλη μείωση της μηχανικής αντοχής.

Μελέτες που έγιναν σε 60 δείγματα από 6 γρανιτικές εμφανίσεις της Μακεδονίας και της Θράκης, στη Βόρεια Ελλάδα (10 δείγματα από κάθε εμφάνιση), έδειξαν τις παρακάτω σχέσεις (Christaras, 1991a):

$$\text{α) Δείκτης αποσάθρωσης (WI) - Απορροφητικότητα (Ab)} \\ \text{Ab} = -0.19 + 3.82 \text{ WI}, \quad r = 0.90$$

Πίνακας II. Μερικά φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των γνωστότερων πετρωμάτων (NAVFAC, 1971).
Table II. Some physico-mechanical characteristics of the most common rocks (NAVFAC, 1971).

Πέτρωμα	Μέγεθος κόκκων	Δομή	dg/cm ³	σ _c Kg/cm ²	E*10 ⁴ Kg/cm ²
ΠΥΡΗΓΕΝΗ					
Γρανίτης	Αδρό-/μεσόκοκκος	Συμπαγής	2.69	100-1750	28-49
Διορίτης	Αδρό-/μεσόκοκκος	Αρκετές διακλάσεις	2.82	700-1750	35-56
Γάββρος	Αδρό-/μεσόκοκκος		2.88	1050-2100	49-84
Ρυόλιθος	Λεπτόκοκκος	Συμπαγής	2.59	700-1750	35-56
Ανδεσίτης	Λεπτόκοκκος	Αρκετές διακλάσεις	2.66	700-1750	42-63
Βασάλτης	Λεπτόκοκκος		2.85	1750-2800	49-90
Οψιδιανός	Υαλώδης	Συμπαγής	2.20	140-560	7-28
Τόφος	Αδρόκοκκος	Συγκολλημένο λεπτόκ. υλικό, μεγάλο πορώδες	1.60	14-70	1-7
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ					
Γνεύσιος	Αδρό-/μεσόκοκκος	Σχιστοφυής	2.70	700-1400	58-56
Σχιστόλιθοι	Λεπτόκοκκοι	Σχιστοποιημένοι	2.67	350-1050	14-35
Αργ. σχιστόλιθος	Λεπτόκοκκοι	Πλακώδεις	2.69	700-1400	35-56
Χαλαζίτης	Λεπτόκοκκος	Συμπαγής, μεταβλητό	2.66	1050-2450	42-56
Μάρμαρο	Μέσο-/λεπτόκοκκο	άνοιγμα διακλάσεων	2.69	840-2100	49-70
Σερπεντινίτης	Διάφορος	Συμπαγής, μικρή σκληρότητα	2.53	70-700	7-35
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ					
Κροκαλοπαγές	Ανδρόκοκκο, αποστρωγγυλεμένο	Στρώση, συγκολλημένο	2.48	350-1050	7-35
Λατυποπαγές	Αδρόκοκκο, γωνιώδες	Στρώση, συγκολλημένο	2.53	350-1050	7-35
Ψαμμίτης	Μεσόκοκκος	Στρώση, συγκολλημένο	2.35	280-840	7-21
Ιλιόλιθος	Λεπτόκοκκος	Στρώση, συγκολλημένο	1.8-2.4	7-350	3-14
Άργιλος	Πολύ λεπτόκοκκος	Φυλλώδες, συμπίεστη ανάλογα τη συμπύκνωση	1.6-2.2	7-350	3-14
Ασβεστόλιθος	Λεπτόκοκκος	Συμπαγές, ευδιάλυτο	2.64	350-1050	14-42
Δολομίτης	Λεπτόκοκκος	Συμπαγές	2.67	490-1400	28-56

β) Δείκτης αποσάθρωσης (WI) - Ξηρή πυκνότητα (d)

$$d = 2.79 - 0.30 WI, \quad r = -0.89$$

γ) Δείκτης αποσάθρωσης (WI) - Αντοχή σε θλίψη (σ_c)

$$\sigma_c = 20010e^{-2.76WI}, \quad r = -0.97$$

δ) Δείκτης αποσάθρωσης (WI) - Ταχύτητα υπερήχων (v)

$$v = 5.28 - 4.22 WI, \quad r = -0.97$$

Η επιλογή των γρανιτών, ως υλικό μελέτης, έγινε για τους παρακάτω λόγους:

α) Από τα αρχαία χρόνια ο γρανίτης θεωρείται σύμβολο αντοχής. Παρ' όλο που συχνά βρίσκεται αποσαθρωμένος μέχρι αρκετό βάθος, έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή πολλών Μνημείων, όπως ο Οβελίσκος της Κλεοπάτρας στην Πλατεία Ομονοίας των Παρισίων, οι κολώνες του κεντρικού κτιρίου του Πανεπιστημίου του Μιλάνου και του Καθηδρικού Ναού του Βαγί κλπ., αποτελεί δε σημαντικό επενδυτικό υλικό. Ως υλικό, ο γρανίτης είναι συμπαγής, με μεγάλη λειαντική ικανότητα και αντοχή στη φόρτιση.

β) Ως υλικό ανταποκρίνονταν στις απαιτήσεις της μεθόδου από της άποψη ότι η αποσάθρωση των ορυκτών εκφράζεται με την δημιουργία άλλων ορυκτολογικών τύπων, εύκολα προσδιοριζόμενων με τη βοήθεια πολωτικού μικροσκοπίου. Είναι πολύμικτο πέτρωμα και τα ορυκτά του δεν εμφανίζουν ιδιαίτερο προσανατολισμό. Αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από χαλαζία, ο οποίος παραμένει αναλωτός στην αποσάθρωση, περιέχει όμως και άλλα ορυκτά, λιγότερο ή περισσότερο αποσαθρωμένα, όπως οι άστριοι, τα πλαγιόκλαστα, οι μαρμαρογέες, οι αμφίβολοι κλπ. Έτσι το καθένα από τα ορυκτά αυτά συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά τόσο κατά την αποσάθρωση όσο και κατά τις θερμικές μεταβολές. Φαινόμενα αποσάθρωσης όπως η καολινιτίωση, η σερικιτίωση, η χλωριτίωση κλπ., είναι εύκολα προσδιορίσιμα, ως προς το αποτέλεσμα τους.

2) Άλλη μέθοδος ποσοτικής εκτίμησης της αποσάθρωσης, έμμεση όμως, είναι η ταχύτητα υπερήχων. Πρόκειται για υπολογισμό του χρόνου διέλευσης ενός υπερηχητικού σήματος μέσα από τη μάζα του πετρώματος, θεωρώντας ότι η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την φυσική κατάσταση του πετρώματος. Όπως φαίνεται και από τις προηγούμενες αλλά και τις επόμενες μαθηματικές σχέσεις, ένα συμπαγές πέτρωμα εμφανίζει μεγαλύτερη ταχύτητα υπερήχων απ' ό,τι ένα λιγότερο συμπαγές και κατ' επέκταση περισσότερο αποσαθρωμένο. Ένα συμπαγές πέτρωμα εμφανίζει ταχύτητα υπερήχων μεγαλύτερη από 5000m/s ενώ ένα πολύ αποσαθρωμένο μικρότερη από 2500m/s.

Η ταχύτητα υπερήχων στους μαργαικούς ασβεστόλιθους της Κρήτης, που αποτελούν το κύριο δομικό υλικό των ανακτόρων της Κνωσού (μαζί με τους γύψους, για τους οποίους δεν έχουμε τεχνικά δεδομένα) και της Φαιστού, συνδέεται με την αποσαθρωσιμότητα και τα άλλα φυσικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (Christaras, 1991b).

α) Ταχύτητα υπερήχων (v) - Ξηρή πυκνότητα (d)

$$d = 0.75 + 0.30 v \quad r = 0.923$$

β) Ταχύτητα υπερήχων (v) - Απορροφητικότητα (Ab)

$$Ab = 20.12 - 4.08 v \quad r = -0.853$$

γ) Ταχύτητα υπερήχων (v) - Αντοχή σε θλίψη (σ_c)

$$\sigma_c = 62.02e^{0.48v} \quad r = 0.966$$

δ) Ταχύτητα υπερήχων (v) - Αποσαθρωσιμότητα (W)

$$W = 90.64 - 16.61v \quad r = -0.882$$

Για τον υπολογισμό των παραπάνω σχέσεων χρησιμοποιήθηκαν 30 δείγματα, 10 από την Κνωσό, 10 από τη Φαιστό και 10 από τα Μάλια.

Μια λεπτομερής στρωματογραφική ταξινόμηση και χρονολόγηση των δομικών υλικών των Μινωικών Ανακτόρων Κνωσού και Φαιστού, από τους Moraiti & Christaras (1991), έδειξε ότι αυτά προέρχονται από τη γύρω περιοχή και αποτελούνται από τα παρακάτω πετρώματα: α) μαργαικοί ασβεστόλιθοι τοποθετημένοι στη Discoaster quinqueramus Zone (NN11), της Standard Zonation: Martini, 1971 (άνωτερο Μειόκαινο), β) βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι τοποθετημένοι στη Ceratolithus primus sub-Zone (NN11, άνωτερο Μειόκαινο), γ) στρωματολιθικοί ασβεστόλιθοι (με ενστρώσεις γύψων) τοποθετημένοι στην Amaurolithus tricorniculatus Zone (NN12, άνω Μεσίνοιο - Πλειόκαινο), δ) μαργαικοί ασβεστόλιθοι τοποθετημένοι στη Reticulofenestra Pseudoumbilica Zone (NN15, κατώτερο Πλειόκαινο).

3) Η σκληρότητα, εκφρασμένη ως λειαντική ικανότητα και απώλεια βάρους κατά τη λείανση (AR), μπορεί επίσης να χαρακτηρίσει με σαφήνεια τη φυσική κατάσταση ενός πετρώματος. Για την εργαστηριακή επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συσκευή παρασκευής λεπτών τομών. Από τη μελέτη που έγινε, σε οφειολίθους της Μακεδονίας προέκυψε ότι για σχετικά υγιή πετρώματα η απώλεια βάρους κατά τη λείανση σχετίζεται γραμμικά με την ξηρή πυκνότητα (d) και την πυκνότητα υπερήχων (v). Όταν όμως το εύρος αποσάθρωσης είναι μεγάλο, οι παραπάνω σχέσεις γίνονται εκθετικές. Οι σχέσεις αυτές, και για τις δύο περιπτώσεις, δίνονται παρακάτω (Christaras, 1992).

α) Σχετικά υγιή δείγματα.

$$i) AR = 10.21 - 3.17d, \quad r = -0.826,$$

$$ii) AR = 6.34 - 0.86v, \quad r = -0.806$$

β) Μεγάλο εύρος αποσάθρωσης δειγμάτων.

$$i) AR = 6760.89e^{-3.05d}, \quad r = -0.870,$$

$$ii) AR = 175.38e^{-0.84v}, \quad r = -0.806$$

Συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων απώλειας βάρους σε λείανση (AR) με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση ενός κλασικού σκληρομέτρου Shore (H), που έγινε σε δείγματα βασάλτη που συλλέξαμε από τον ωκεάνειο φλοιό του Ειρηνικού Ωκεανού έδειξε τις παρακάτω σχέσεις (Christaras, 1993).

$$AR = -0.06H + 5.10, \quad r = -0.825$$

4) Ένας τελευταίος τρόπος χαρτογράφησης του βαθμού αποσάθρωσης είναι η εκτίμηση της σκληρότητας και αντοχής σε θλίψη, με τη βοήθεια του σφυριού Schmidt. Πρόκειται για μέθοδο περιορισμένης ακριβείας, που όμως δεν καταστρέφει το πέτρωμα, δίνει τιμές με επί τόπου δοκιμή και μπορεί να σαρώσει μεγάλη έκταση του πετρώματος, σε μικρό σχετικά χρόνο.



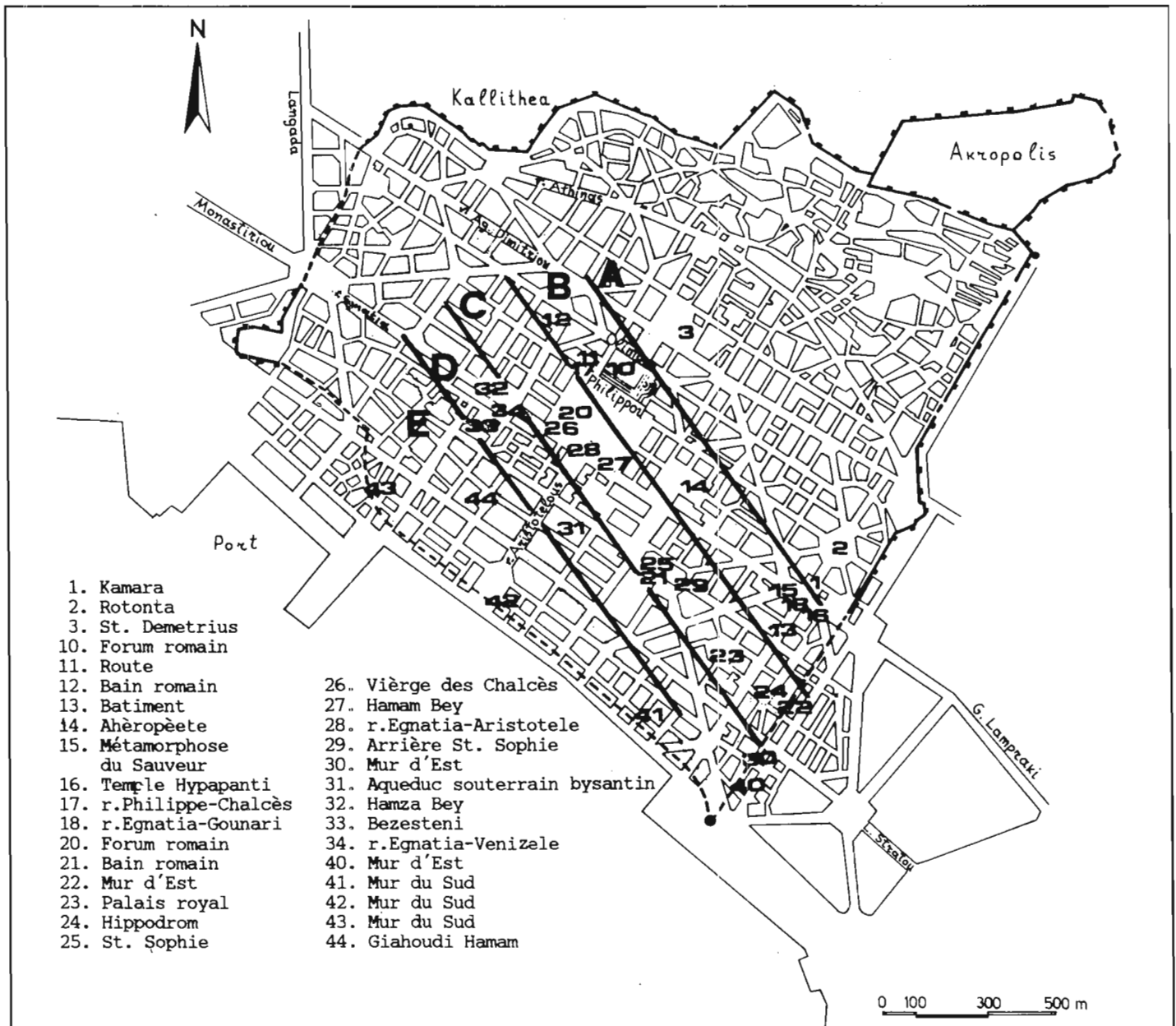
Εικόνα 1. Μνημεία της Θεσσαλονίκης (βλέπε Εικόνα 2).
Figure 1. Monuments of Thessaloniki (see Figure 2).

Γεωλογικό Περιβάλλον και Μνημεία

Ένα σημαντικό κεφάλαιο στη μελέτη προστασίας ενός Μνημείου είναι ο καθορισμός του γεωτεχνικού πλαισίου θεμελίωσης. Οι τεκτονικές, σεισμολογικές, υδρογεωλογικές κλπ. συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή καθορίζουν τη σημερινή ευστάθεια του Μνημείου. Ιδιαί-

τερα στο χώρο της Μεσογείου, το έντονο γεωτεκτονικό πλαίσιο με το μεγάλο αριθμό ρηγμάτων δημιουργεί ασταθείς συνθήκες διατήρησης των κατασκευών στο χρόνο.

Η Πομπηία είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα ηφαιστειακής δράσης του Βεζούβιου, μετά από ισχυρό σεισμό, τον 1ο αι. μ.Χ. Η πόλη θάφτηκε κάτω από λάβα και τέφρα



Εικόνα 2. Ζώνες συσχέτισης ηλικίας - υψομέτρου.

Figure 2. Correlation zones between age-altitude.

πάχους 4.5-7.6 m. Η καταστροφή των αρχαίων Μινωικών Ανακτόρων της Κρήτης συνδέεται και αυτή με σεισμική δραστηριότητα του 1570 π.Χ. (Galanopoulos, 1955), με σύγχρονη ηφαιστειακή δράση του ηφαιστείου της Σαντορίνης (Coates, 1985).

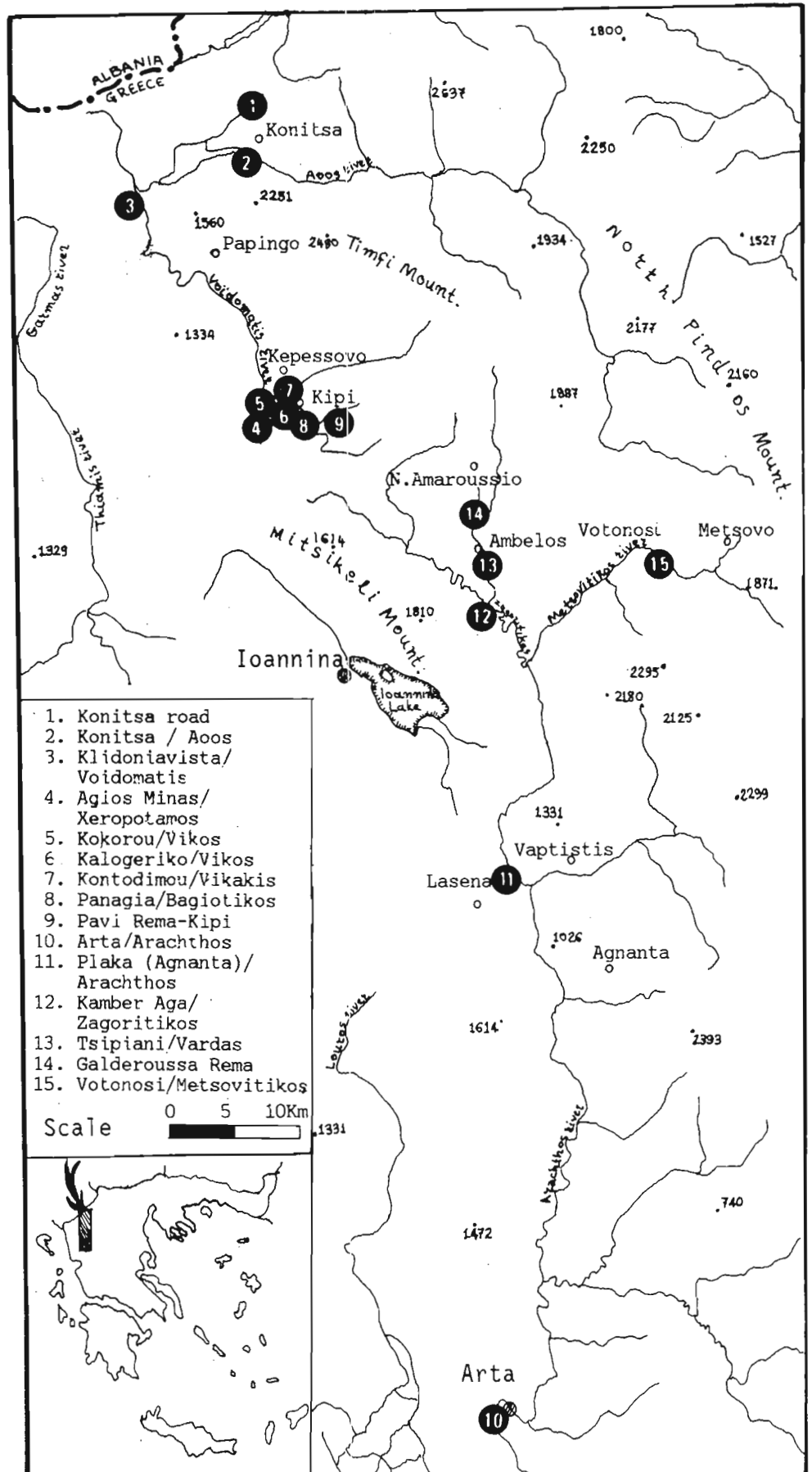
α) Ο κεκλιμένος Πύργος της Πίζας.

Ο κεκλιμένος Πύργος της Πίζας, στη Βόρεια Ιταλία είναι ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα γεωτεχνικής αστοχίας που επηρέασε τόσο την πορεία κατασκευής του έργου όσο και τη διατήρησή του στο χρόνο (Bolt et al., 1977).

Η κατασκευή άρχισε το 1173 μ.Χ. και ολοκληρώθηκε το 1350 μ.Χ. Πρόκειται για το καμπαναριό του παρακεί-

μενου καθεδρικού ναού, ο οποίος είχε κτιστεί 100 χρόνια νωρίτερα και εμφάνιζε ήδη προβλήματα διαφορικής καθίζησης. Η μεγάλη απόσταση των 50 m από το ναό, που τοποθετήθηκε ο πύργος, ίσως να σχετίζεται με διαπίστωση εδαφοτεχνικών προβλημάτων στην περιοχή.

Ο πύργος εδράζεται σε κυκλικό άκαμπτο θεμέλιο, διαμέτρου 19.2 m. Το έδαφος θεμελίωσης, αποτελείται από 3.1 m επιφανειακής αργιλλώδους άμμου, τοποθετημένης πάνω σε στρώμα καθαρής άμμου, με συνολικό πάχος 6.4 m. Κάτω από την άμμο, 0.5 m κάτω από το θεμέλιο του πύργου, ένα στρώμα συμπίεστης αργίλλου, πάχους 2 m είναι μάλλον υπεύθυνο για το φαινόμενο διαφορικής καθίζησης που προκλήθηκε. Η πίεση των 860 KN/m² που ασκεί η

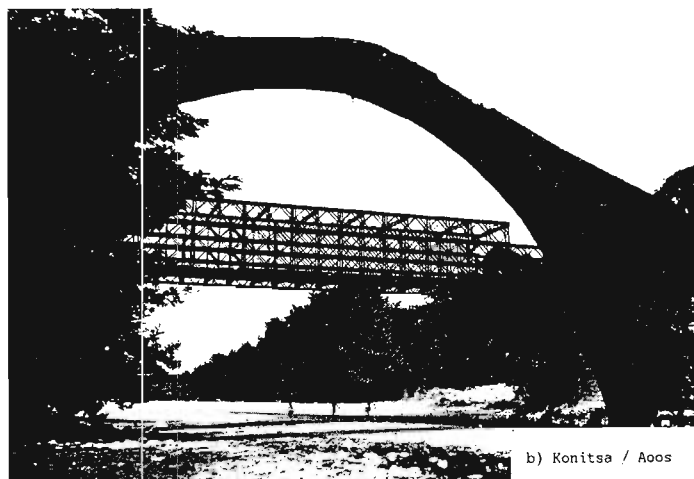


Εικόνα 3. Γεωγραφική τοποθέτηση των πέτρινων γεφυριών.

Figure 3. Location of the stone bridges.



a) Konitsa road



b) Konitsa / Aaos



c) Klidonivista / Voidomatis



d) Agios Minas / Keropotanos

Εικόνα 4. Γεφύρια στη περιοχή της Κόνιτσας.
Figure 4. Bridges in Konitsa area.

κατασκευή επί του εδάφους θεμελίωσης εκτιμάται ότι υπερέρβη τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους, προκαλώντας τη θραύση του (Legget, 1973).

Τα προβλήματα καθίζησης εμφανίστηκαν από τα πρώτα στάδια κατασκευής του πύργου, αναγκάζοντας το 1185 μ.Χ. τους κατασκευαστές να διακόψουν την ανέγερση στο τρίτο πάτωμα. Η κατασκευή του πύργου ξανάρχισε 100 χρόνια αργότερα, το 1274 μ.Χ. Οι εργασίες συνεχίστηκαν επί δεκαετία, οπότε σταμάτησαν εκ νέου, στο έβδομο πάτωμα, γιατί το φαινόμενο της καθίζησης ήταν εντονώτατο. Η κατασκευή του τελευταίου 1.5 m, που προοριζόνταν για καμπαναριό, διήρκεσε μια ολόκληρη πενταετία.

Ο πύργος, έχει ύψος 59 m και παρουσιάζει κλίση 5°. Η κλίση αυτή αντιστοιχεί σε οριζόντια απόκλιση της κορυφής 5 m. Η απόκλιση αυτή συνεχίζεται με ρυθμό 0.02 mm ανά έτος. Η είσοδος εμφανίζεται σήμερα βυθισμένη κατά 2 m μέσα στο έδαφος.

β) Τα μνημεία της Θεσσαλονίκης

Η μεταφορά ιζημάτων ή προσχώσεων είναι μια διαδικασία που μεταβάλλει το γεωτεχνικό καθεστώς και θάβει τα υπάρχοντα Μνημεία μέσα στο έδαφος. Η παρουσία υπό

γειου νερού στην περιοχή δημιουργεί ενδεχόμενα ανάγκη αποστράγγισης και επομένως επιπρόσθετα προβλήματα.

Η κεντρική Θεσσαλονίκη αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταφοράς και αναδιάταξης των ιζημάτων στο χώρο. Πρόκειται για παραλιακή πόλη της Βόρειας Ελλάδας που κτίστηκε το 315 π.Χ. από τον Βασιλιά της Μακεδονίας Κάσσανδρο. Το υπέδαφος του νότιου τμήματος της πόλης, όπου βρίσκεται το εμπορικό κέντρο, αποτελείται από ιζήματα προερχόμενα από την αποσάθρωση πετρωμάτων που βρίσκονται στα βόρεια και βορειοανατολικά της πόλης.

Μετά από ιστορία 23 αιώνων, η πόλη έχει να δείξει πολλά ιστορικά Μνημεία, διαφόρων περιόδων, που βρίσκονται βυθισμένα μέσα στο έδαφος (Εικ. 1). Το βάθος έδρασης των Μνημείων αυτών, μπορεί να θεωρηθεί ότι συνδέεται με την ηλικία κατασκευής τους, ώστε τα παλαιότερα πρέπει να βρίσκονται κτισμένα σε μεγαλύτερο βάθος από τα νεότερα.

Σύμφωνα με τον Christaras (1988), η παραδοχή αυτή δεν έχει γεωγραφικά καθολική εφαρμογή, στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Έτσι στην ίδια μελέτη, προσδιορίστηκαν



a) Kokorou / Vikos



b) Kalogeriko / Vikos



c) Kontodimou / Vikakis



d) Fanagia / Egiotikos

Εικόνα 5. Γεφύρια στα Δ. Ζαγόρια.
Figure 5. Bridges in W. Zagoria.

τρεις παράλληλες ζώνες γενικής διεύθυνσης NW-SE (που συμπίπτει με τη γενική παράταξη των πετρωμάτων και εντοπισμένων τεκτονικών γραμμών), κατά μήκος των οποίων παρατηρείται γραμμική συνάρτηση, υψηλού συντελεστή συσχέτισης, μεταξύ του έτους κατασκευής και του απόλυτου υψόμετρου έδρασης των Μνημείων (Εικ. 2). Η σχέση μεταξύ της ηλικίας και του υψόμετρου έδρασης των Μνημείων δίδεται παρακάτω:

- α) Ζώνη Β: $Y = 2.14 \times 10^{-3}X + 13.34$, $r = 0.988$
 β) Ζώνη C: $Y = 3.97 \times 10^{-3}X + 5.31$, $r = 0.995$
 γ) Ζώνη D: $Y = 4.03 \times 10^{-3}X + 3.44$, $r = 0.989$

Όπου X: Ημερομηνία κατασκευής

Y: Υψόμετρο έδρασης

Οι παραπάνω σχέσεις που παρατηρήθηκαν στις συγκεκριμένες ζώνες μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες τόσο για το ρυθμό απόθεσης των ιζημάτων όσο και για τη χρονολόγηση ερειπίων, συνοδευτικά κατά την αρχαιολογική έρευνα.

γ) Τα παλιά πέτρινα γεφύρια της Ηπείρου.

Η Ήπειρος αποτελεί το πλέον ορεινό τμήμα της Ελλάδας. Η Πίνδος, η υψηλότερη και σημαντικότερη ορο-

σειρά, δημιουργεί βαθιές χαράδρες που διαρρέονται από ένα μεγάλο αριθμό ποταμών, μεγάλης παροχής, οφειλόμενης στις υψηλές τιμές βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων. Ο Αώος, ο Βοιδομάτης, ο Άραχθος και ο Αχελώος είναι μερικά από τα σπουδαιότερα ποτάμια της περιοχής.

Η ανάγκη για επικοινωνία οδήγησε στην κατασκευή των φημισμένων πέτρινων γεφυριών, σε μια εποχή όπου η εμπειρία υποκαθιστούσε την επιστημονική γνώση (Εικόνα 3, Πίνακας III).

Πρόκειται για τοξοτά γεφύρια με ένα συνήθως, αλλά και με περισσότερα ανοίγματα, όπου ήταν αναγκαίο. Τα μονότοξα, όπως της Κόνιτσας και της Πλάκας, είναι επιβλητικότερα σε σχέση με τα πολύτοξα, όπως της Άρτας, που κερδίζουν σε ομορφιά (Εικόνες 4, 5, 6, 7).

Η αρχιτεκτονική των γεφυριών παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία, οφειλόμενη κυρίως στο διαφορετικό πλήθος και μορφή των τόξων. Η μορφή των τόξων άλλοτε έχει ημικυκλική διατομή και άλλοτε ελαφρά οξυκόρυφη, θυμίζοντας γοθικά ή μουσουλμανικά πρότυπα. Στα βάθρα των γεφυριών, μικτά τοξωτά ανοίγματα βοηθούσαν τη ροή του νερού, σε περιόδους πλημμυρικών παροχών. Τα υλικά που



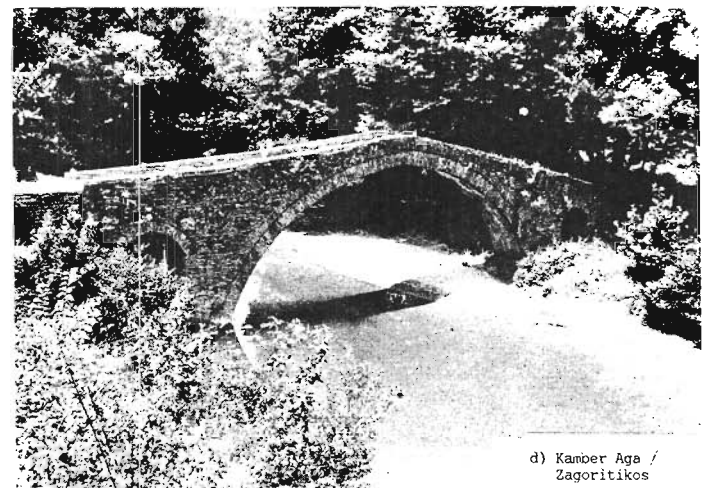
a) Pavi Rema-Kipi



b) Arta / Arachthos



c) Plaka (Agnanta) / Arachthos



d) Kamber Aga / Zagoritikos

Εικόνα 6. Γεφύρια στα Δ. Ζαγόρια και Ν. Ήπειρο.
Figure 6. Bridges in W. Zagoria and S. Epirus.

χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή προέρχονταν από τα πετρώματα της περιοχής, δηλαδή ψαμμιτικά μέρη του φλύσχου και ασβεστόλιθοι, της Ιόνιας ζώνης.

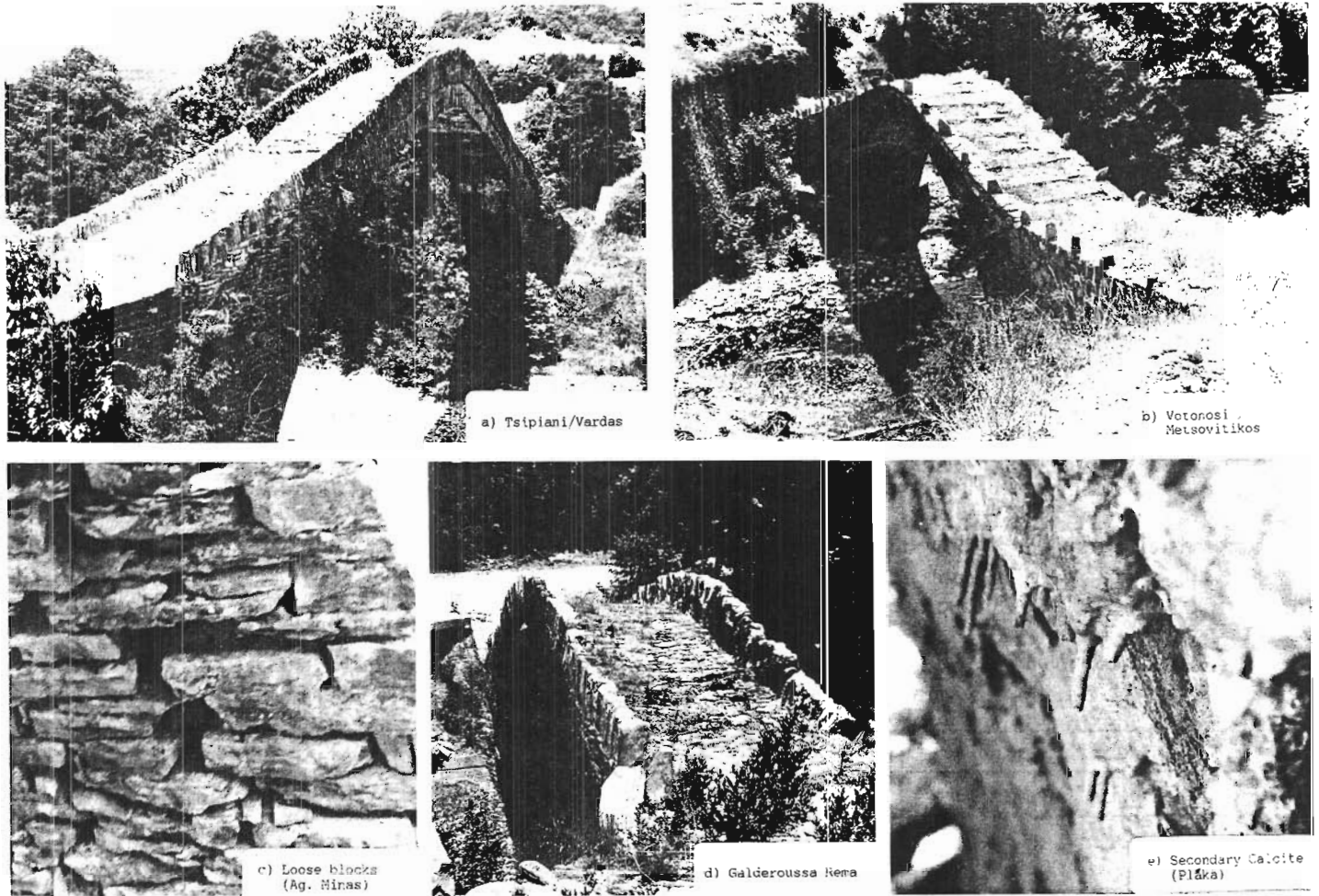
Ως προς τη θέση θεμελίωσης των γεφυριών, αυτή επιλέγονταν με προσοχή. Αποφεύγονταν θέσεις όπου το άνοιγμα του ποταμού ήταν μεγάλο, διότι η θεμελίωση έπρεπε να γίνει με πολλά τόξα, εντός της κοίτης του ποταμού, όπου το πάχος των φερτών υλικών και η δυναμική της ροής του ποταμού προκαλούσε προβλήματα ευστάθειας, όπως της γέφυρας της Άρτας. Έτσι επιλέγονταν μικρά, ανοίγματα, με βραχύδη πρηνή, όπου κατασκευάζονταν μονότοξα γεφύρια.

Η γεωτεχνική έρευνα στην περιοχή έδειξε κατ' αρχήν ότι πρόκειται για εντυπωσιακές κατασκευές, που κατάφεραν να διατηρηθούν χωρίς φθορές στο χρόνο. Όμως η περιοχή παρουσιάζει έντονη τεκτονική καταπόνηση. Ρήγματα και μεγάλες διακλάσεις διατρέχουν τα πρηνή, στις θέσεις των γεφυριών, αποδυναμώνοντας ενδεχόμενα με την πάροδο του χρόνου, την ευστάθεια των γεφυριών. Η διαφορετική κατάσταση της βραχομάζας στα δύο πρηνή, σε συνδυασμό με τις συνθήκες θεμελίωσης σε κάθε πρηνές,

προκάλεσε κατά θέσεις, έντονη χαλάρωση της λιθοδομής (Εικόνα 7c). Η διάλυση τόσο των ασβεστολίθων όσο και του ασβεστίτη των ψαμμιτών δημιουργεί κρούστα ανθρακικού ασβεστίου που καλύπτει επιφανειακά τους δομικούς λίθους (Εικόνα 7e).

Σε προηγούμενη μελέτη (Christaras, 1991c), προσδιορίστηκε, η μεταβολή των φυσικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως δομικά υλικά στα γεφύρια, ως ακολούθως.

- α) Ξηρή πυκνότητα (d) - Απορροφητικότητα (Ab)
- | | |
|-------------------------------------|--------------|
| Ψαμμίτες: $Ab = 10.41 - 3.62d$, | $r = -0.977$ |
| Ασβεστόλιθοι: $Ab = 1.81 - 0.55d$, | $r = -0.982$ |
- β) Ξηρή πυκνότητα (d) - Απώλεια βάρους λείανσης (AR)
- | | |
|--------------------------------------|--------------|
| Ψαμμίτες: $AR = 6.75d^{1.23}$, | $r = -0.988$ |
| Ασβεστόλιθοι: $AR = 195.5d^{3.99}$, | $r = -0.962$ |
- γ) Ξηρή πυκνότητα (d) - Ταχύτητα υπερήχων (v)
- | | |
|--------------------------------------|-------------|
| Ψαμμίτες: $v = -5169 + 3082d$, | $r = 0.908$ |
| Ασβεστόλιθοι: $v = -13749 + 6648d$, | $r = 0.977$ |
- δ) Απώλεια βάρους λείανσης (AR) - Ταχύτητα υπερήχων (v)
- | | |
|------------------------------------|--------------|
| Ψαμμίτες: $v = 32016AR^{-3.25}$, | $r = -0.935$ |
| Ασβεστόλιθοι: $v = 17765AR^{-1}$, | $r = -0.951$ |



Εικόνα 7. Γεφύρια στα Κεν. Ζαγόρια.
Figure 7. Bridges in Central Zagoria.

Για τον υπολογισμό των παραπάνω σχέσεων χρησιμοποιήθηκαν 20 δείγματα ασβεστολίθου και 10 δείγματα ψαμμίτη από την περιοχή.

Ανακεφαλαίωση

Από την προηγούμενη περιγραφή γίνεται αντιληπτό ότι η γεωτεχνική έρευνα των Μνημείων και του περιβάλλοντος χώρου μπορεί να δώσει πληροφορίες, απαραίτητες για την ορθή προστασία των.

Η γεωτεχνική προσέγγιση αφορά τόσο τον προσδιορισμό του βαθμού αποσάθρωσης και των φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών κατασκευής όσο και τη γεωτεχνική μελέτη του περιβάλλοντος χώρου. Βέβαια στην περίπτωση των Μνημείων, η γεωτεχνική έρευνα δεν προηγείται αλλά έπεται, μετά από πολλούς αιώνες, της κατασκευής του τεχνικού έργου, γεγονός που διαφοροποιεί τη φιλοσοφία της μελέτης έναντι ενός σύγχρονου έργου. Εντούτοις ανεξάρτητα από ενδεχόμενα αρχικά γεωτεχνικά προβλήματα (π.χ. Πύργος Πίζας), η γεωδυναμική εξέλιξη στο χρόνο, δημιουργεί νέες συνθήκες αστάθειας, είτε άμεσα του Μνημείου είτε έμμεσα του περιβάλλοντος χώρου που πρέπει να

αντιμετωπιστούν. Μνημεία κτισμένα πάνω σε μεγάλους βράχους, όπως το κάστρο του San Marino και η Μονή Σίμωνος Πέτρας του Αγίου Όρους, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αυξημένης επικινδυνότητας προερχόμενης από την ποιότητα της βραχομάζας. Στις περιπτώσεις αυτές καμιά επέμβαση συντήρησης δε θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ολοκληρωμένη αν προηγούμενα δεν προσεγγίζονταν γεωλογικά το πρόβλημα της ευστάθειας της βραχομάζας.

Contribution of Engineering Geology to the Conservation of Monuments Basiles Christaras¹

Natural stone, one of the most important materials used both in the construction and for ornamental purposes, is related to our history. Important buildings and statues, constructed of natural stones, are witness of our cultural inheritance.

¹Aristotle University, School of Geology, Lab. of Engineering Geology & Hydrogeology, 540 06 Thessaloniki, Greece

One of the greater dangers to these historical monuments is the weathering, caused by climatic changes and air pollution. Soil and rock mechanic changes contribute also to the destruction of the monuments. Throughout history there have been many foundational failures. Some failures occur during an earthquake and others are due to a variety of geological, hydrogeological and loading factors. The Leaning Tower of Pisa in Italy is perhaps the best example of a foundation failure. The building was placed on materials with low strength, causing differential settlement.

Weathering determination needs a detailed description of the stones by means of their physical and mechanical properties. No protection measures can be taken in a monument without previous definition of its existing physical condition. Weathering can be evaluated quantitatively using several methods such as ultrasonic velocity, microscopic modal analysis, abrasion loss of weight and Schmidt hammer resistance.

A comparison of test results, showed that a slight increase of weathering can cause a significant decrease of physico-mechanical resistance, a fact which prove the significance of

the mineralogical condition of the building stones, when these consist of different minerals with different physical characteristics. A geotechnical investigation in the surrounding area is also required.

Βιβλιογραφία

- BELL, F.G. & DEARMAN, W.R. (1988). — Assessment of the durability of sandstone with illustration from some buildings in the North of England. Proceed. Symp. IAEG, Eng. Geol. Anc. Works Monum. Histor. Sites, Athens, Balkema Editors, pp. 707-716.
- BOLT, B.A., HORN, W.L., MACDONALD, G.A. & SCOTT, R.F. (1977). Geological hazards. Springer - Verlag, New York.
- CHRISTARAS, B. (1988). — Relation entre l' age et l' altitude des monuments historiques de Thessalonique du Sud. Contribution a l' etude de l' evolution geomorphologique de la ville. Int. Symp. IAEG, Athens, in Balkema Publ. pp. 1181-1185.
- CHRISTARAS, B. (1991a). - Methode d' evaluation de l' alteration et changement du comportement mecanique des granites, en Grece du Nord. - Bull. IAEG, vol. 43, Paris, pp. 21-26.
- CHRISTARAS, B. (1991b). - Durability of building stones and

Πίνακας III. Δεδομένα κατασκευής 15 αντιπροσωπευτικών πέτρινων γεφυριών (Μαντάς, 1988, Christaras, 1991).
Table III. Data for the construction of 15 representative stone bridges (Mandas, 1988, Christaras, 1991).

No	Όνομα γεφυριού	Τόξα	Έτος	Υλικό	Εικ.	Ποταμός
1	Είσοδος Κόνιτσας	1	-	Ψαμμίτης	4a	-
2	Κόνιτσα	1	1870	Ψαμμίτης Ασβεστόλιθος	4b	Αώος
3	Κλιδονιαβίστα	1	1853	Ψαμμίτης Ασβεστόλιθος	4c	Βοιδομάτης
4	Άγιος Μηνάς	1	-	Ψαμμίτης	4d	Ξεροπόταμος
5	Κοκόρου	1	1750	Ψαμμίτης Ασβεστόλιθος	5a	Βίκος
6	Καλογέρικο	3	1814	Ασβεστόλιθος	5b	Βίκος
7	Κοντοδήμου	1	1753	Ψαμμίτης Ασβεστόλιθος	5c	Βικάκης
8	Παναγία	1	1830	Ψαμμίτης	5d	Μπαγιότικος
9	Παβι Ρέμα/Κήποι	1	-	Ψαμμίτης	6a	Παβι Ρέμα/ Βαβιότικος
10	Άρτα	4	3ο π.Χ./ 1606	Ασβεστόλιθος	6b	Άραχθος
11	Πλάκα/Αγνάντα	1	1866	Ψαμμίτης	6c	Άραχθος
12	Καμπέρ Αγά	1	-	Ψαμμίτης	6d	Ζαγορίτικος
13	Τσίπιανη	1	1875	Ψαμμίτης	7a	Βάρδας
14	Γκαλντερούσα	1	-	Ψαμμίτης	7d	Γκαλντερούσα Ρέμα/Βάρδας
15	Βοτονόσι	1	-	Ψαμμίτης	7b	Μετσοβίτικος

- weathering of the antiquities in Creta/Greece. *bull. IAEG*, Paris, v. 43, April/1991.
- CHRISTARAS, B. (1991c). - Old stone bridges in Epirus. Hardness test using a thin section lepping machine. 2nd Int. Symp. Conserv. Monum. Medit. Basin, Geneve, pp. 433-442.
- CHRISTARAS, B., KASSOLI-FOURNARAKI, A. & MORAITI, E. (1989). - Weathering effects on the mechanical behaviour of granites? example from the Kavala granodiorite (N. Greece). *Proceed. Int. Symp. Conserv. Monum. Medit. Basin, Bari*, pp. 297-301.
- CHRISTARAS, B. (1992). - Hardness test using a thin section lepping machine. Application on ophiolitic specimens from Chalkidiki (Greece). 6th Congr. Geol. Soc. Greece (in press).
- CHRISTARAS, B. (1993). - Mechanical behaviour of the basalts from Costa Rica Fift, in Hole 504B, Leg 137. *Proc. ODP, Sci. Results, 137/140: College Station TX (Ocean Drilling Program in press)*.
- COATES, D. (1985). - *Geology and Society*. Chapman and Hall, New York.
- GALANOPOYLOS, G.A. (1955). - *Erdbebengeographie von Griechenland (Taf XVI-XIX)*. *Ann. Pays Hell. Athens*, 6, pp. 83-121.
- LEGGET, (1973). - *Cities and geology*, McGraw-Hill, New York.
- MANDAS, S. (1988). - *The bridges of Epirus*. Laiko Polytyho, Athens, 143 p.
- MARTINI, E. (1971). - Standard Tertiary and Quaternary calcareous Nannoplankton Zonation. *Proc. 2nd Plankton Conf. Roma, 1970, 2*, pp. 739-785, 4Pl., 6 Tab., Roma.
- MORAITI, E. & CHRISTARAS, B. (1991). - Weathering of marly and biogenic limestones used in the antiquities of Crete, Greece. *Stratigraphy and mechanical consideration. 2nd Int. Symp. Conserv. Monum. Medit. Basin, Geneve*, pp. 463-472.
- NAVFAC (1971). - *Design Manual DM-7. Soil mechanics, Foundation and Earth Structures*. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Va.