

ISSN 2654-2366

Archive

Archive Offprint



Open Access Scientific Journal

ISSN 2654-2366

Volume 17 – 2021 Offprint

Volume No: Archive Volume 17, 2021

Editor: K. Kalogeropoulos

Date: March 6, 2021

Licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License. Writers are the copyright holders of their work and have right to publish it elsewhere with any free or non-free license they wish.

Παραπομπή ως: Καλογερόπουλος, Κ. 2021. “Μέθοδοι χρονολόγησης στην Αρχαιολογία”.
Archive 17 (6 Μαρτ.): 39-50 DOI: 10.5281/zenodo.4587318

Μέθοδοι χρονολόγησης στην Αρχαιολογία

Λέξεις-κλειδιά: Απόλυτη χρονολόγηση, Δενδροχρονολόγηση, Θερμοφωταύγεια, Μέθοδος καλίου/αργού, Παλαιοκλιματολογία, Ραδιομετρική μέθοδος ουρανίου/θορίου, ραδιοχρονολόγηση, Στρωματογραφία, Σχετική χρονολόγηση, Τυπολογία

Κ. Καλογερόπουλος, Δρ. Πανεπιστημίου Αιγαίου

Abstract

Archaeological science, also known as Archaeometry, is related to the application of scientific techniques, physical and chemical, for the analysis of archaeological materials, with the main goal of dating them. Dating methods used not only for archeology, are two, relative and absolute dating. Relative dating is the science of determining the relative order of past events. Before the discovery of radiometric dating in the early 20th century has been used in geology, to correlate rock or superficial deposits, fossils and lithologies and determine the sequential order in which a series of events occurred. Absolute dating, on the other hand, is usually based on the physical, chemical, and life properties of the materials of artifacts, buildings, or other items that have been modified by humans and by historical associations with materials with known dates i.e. coins and written history. Techniques include tree rings in timbers, radiocarbon dating of wood or bones, and trapped-charge dating methods such as thermoluminescence dating of glazed ceramics.

Η αρχαιολογική επιστήμη, γνωστή και ως Αρχαιομετρία, σχετίζεται με την εφαρμογή επιστημονικών τεχνικών, φυσικών και χημικών, για την ανάλυση αρχαιολογικών υλικών, με κύριο στόχο τη χρονολόγησή τους. Οι μέθοδοι χρονολόγησης, όχι μόνο για την αρχαιολογία, είναι δύο, η σχετική και η απόλυτη χρονολόγηση.

Σχετική χρονολόγηση

Πριν από την ανακάλυψη της ραδιομετρικής χρονολόγησης στις αρχές του 20ού αιώνα, η οποία παρείχε ένα μέσο απόλυτης χρονολόγησης, οι αρχαιολόγοι και οι γεωλόγοι χρησιμοποίησαν τη σχετική χρονολόγηση για τον προσδιορισμό της ηλικίας των αρχαιολογικών ή γεωλογικών υλικών. Αν και η σχετική χρονολόγηση μπορεί να καθορίσει μόνο τη διαδοχή με την οποία συνέβη μια σειρά γεγονότων και όχι το πότε συνέβη, παραμένει χρήσιμη ως τεχνική. Η σχετική χρονολόγηση από βιοστρωματογραφικά δεδομένα είναι η προτιμώμενη μέθοδος στην παλαιοντολογία και είναι, από ορισμένες απόψεις, ακριβέστερη¹.

Στη σύγχρονη αρχαιολογική πρακτική η σχετική χρονολόγηση (χρονοσειρά, υπέρθεση και στρωματογραφία) είναι η ραχοκοκαλιά της αρχαιολογικής έρευνας². Βασίζεται στην αρχή της επαλληλίας και συνίσταται στη δημιουργία μιας χρονοσειράς μεταξύ των διαφόρων αρχαιολογικών δεδομένων, με την ταξινόμησή τους σε μια χρονολογική ακολουθία. Αυτή η χρονολογική ακολουθία αποτελεί το βασικό πλαίσιο, για τον προσδιορισμό της σχετικής ηλικίας νεότερων δεδομένων στη διαδικασία ανασύνθεσης μιας ακολουθίας φάσεων και γεγονότων σε μια αρχαιολογική θέση³.

¹ Stanley 1999, 167-169.

² O'Brien and Lyman 1999, 6.

³ Κουκουζέλη κ.ά. 2003, 167.

Στις αρχαιολογικές μεθόδους σχετικής χρονολόγησης περιλαμβάνεται η στρωματογραφία και η τυπολογία, μέσω των οποίων παράγονται αντίστοιχες ακολουθίες. Η στρωματογραφία παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής σχετικών χρονοσειρών των στρωμάτων και των περιεχομένων τους σε μια αρχαιολογική θέση⁴.

Οι αρχαιολόγοι χειρίζονται τη μεταβλητότητα των τεχνέργων μέσω της τυπολογίας, της ταξινόμησης δηλαδή των τεχνέργων σε τύπους⁵. Το ερώτημα τι είναι η τυπολογία σχετίζεται άμεσα με το ερώτημα τι είναι τύπος. Ορισμένοι θεωρούν ότι είναι ομάδα παρόμοιων πραγμάτων, άλλοι ότι είναι ιδέα ή ομάδα ιδεών περί της ομοιότητας των πραγμάτων. Άλλοι θεωρούν ότι είναι λέξεις που περιγράφουν τα πράγματα και την ομοιότητά τους⁶. Και οι τρεις ορισμοί είναι αποδεκτοί στην επιστημονική συζήτηση για την τυπολογία. Ο τύπος με την πληρέστερη έννοιά του αποτελείται από πράγματα, μαζί με τις ιδέες μας για τα πράγματα, όπως επίσης και από τις λέξεις ή τις εικόνες με τις οποίες εκφράζουμε αυτές τις ιδέες⁷.

Με την ανάπτυξη των στατιστικών εργαλείων και της αριθμητικής ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν μαθηματικές μέθοδοι για την κατασκευή τυπολογιών. Αυτές οι τεχνικές παρέχουν τη δυνατότητα σύγκρισης των βαθμών συνέπειας μεταξύ των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των τεχνέργων. Οι συντελεστές συσχέτισης που δημιουργούνται από αυτές τις μεθόδους βοηθούν τους αρχαιολόγους να διακρίνουν μεταξύ σημαντικών και ασήμαντων ομοιοτήτων μεταξύ των τεχνέργων⁸. Συνειδητά ή ασυνειδητά οι ονομασίες που αποδίδουν οι αρχαιολόγοι σε κάθε τύπο είναι δυνατόν να επηρεάσουν την επιλογή των οντοτήτων (π.χ. τεχνέργων) που αποδίδονται σε κάθε τύπο. Για αυτό οι ονομασίες ανόμοιων τύπων θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά⁹.

Η μέθοδος σχετικής χρονολόγησης με βάση την τυπολογία στηρίζεται στην αρχή ότι τα τέχνηρα ταξινομούνται σύμφωνα με την αντιληπτή ή μετρήσιμη ομοιότητα μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και των συγκεκριμένων αναλυτικών μονάδων, που ονομάζονται τύποι. Εδώ οι τύποι είναι συσσωρεύσεις διαγνωστικών χαρακτηριστικών που καταγράφονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο δειγματοληψίας, σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Επομένως, η ομοιότητα βασίζεται στην ποιότητα ή την ποσότητα διαγνωστικών ιδιοτήτων που μοιράζονται οι τύποι και τα δεδομένα¹⁰.

Στηρίζεται, επίσης, σε μια δεύτερη αρχή της βαθμιαίας αλλαγής των χαρακτηριστικών των τεχνέργων διαμέσου του χρόνου. Επομένως, βάσει των χαρακτηριστικών τους ταξινομούνται σε μια εξελικτική σειρά, για παράδειγμα από τον απλούστερο προς τον συνθετότερο τύπο¹¹. Προκύπτει, έτσι, μια τυπολογική ακολουθία ή χρονοσειρά, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σχετική χρονολόγηση οποιουδήποτε τεχνέργου παρουσιάζει ομοιότητες με κάποιο άλλο, που αποτελεί ήδη τμήμα της τυπολογικής ακολουθίας. Βέβαια, ο χρονολογικός προσδιορισμός της τυπολογικής ακολουθίας πρέπει να προσδιοριστεί με ανεξάρτητα μέσα, για παράδειγμα, με στρωματογραφικές παρατηρήσεις¹².

⁴ Birx 2010, 352.

⁵ Kelly and Hurst 2012, 98.

⁶ Dunnell 1988, 191-193.

⁷ Leach 1976, 17-22.

⁸ Spaulding 1953, 305-313.

⁹ Foucault 1973, 139.

¹⁰ Bortolini 2016, 652.

¹¹ Renfrew and Bahn 2001, 120

¹² Κουκουζέλη κ.ά. 2003, 167-168.

Οι σχετικά απλές μέθοδοι της κατασκευής τυπολογιών εξελίχθηκαν σε πολύπλοκες τεχνικές δημιουργίας εξελικτικών σειρών συχνότητας FST (frequency seriation techniques), οι οποίες βασίζονται στην αρχή ότι κάθε τύπος τεχνέργου φθάνει στο αποκορύφωμα της δημοτικότητάς του σε μια ορισμένη χρονική στιγμή και συνεπώς εμφανίζεται συχνότερα σε μία ομάδα (assemblage). Οι τεχνικές αυτές παριστούν γραφικώς τις συχνότητες του κάθε τύπου τεχνέργου διαμέσου του χρόνου¹³. Οι εξελικτικές σειρές συχνότητας χρησιμοποιούν σχετικές συχνότητες ή ποσοστά εμφάνισης τύπων τεχνέργων σε μια ομάδα για διαμορφώσουν μια σειρά ή αλληλουχία μεταξύ πολλών ομάδων¹⁴.

Στο βαθμό που οι αρχαιολογικές θέσεις μιας γεωγραφικής περιοχής περιέχουν τύπους τεχνέργων με ισοδύναμη συχνότητα δημοτικότητας, τότε θεωρούνται ότι έχουν περίπου την ίδια ηλικία. Οι τεχνικές δημιουργίας εξελικτικών σειρών συχνότητας είναι χρήσιμες στη διασταυρωμένη χρονολόγηση (cross dating), όταν τύποι τεχνέργων μπορούν να χρονολογηθούν βάσει αντικειμένων που χρονολογούνται ασφαλώς, όπως τα νομίσματα. Η διασταυρωμένη χρονολόγηση επιτρέπει στους αρχαιολόγους να συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τα τέχνεργα σε κάθε στρώμα για να καθορίσουν τη σχέση τους¹⁵. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιήσουν τις εξαγωγές και εισαγωγές τεχνέργων για να επεκτείνουν τις χρονολογικές συνδέσεις μέσω διασταυρωμένης χρονολόγησης με άλλες περιοχές¹⁶.

Προκειμένου να είναι ισχυρή η σειρά συχνότητας, πρέπει να πληροί τρεις προϋποθέσεις: Αρχικά όλες οι ομάδες ή οι χώροι δειγματοληψίας πρέπει να έχουν την ίδια ή συγκρίσιμη χρονική διάρκεια, έτσι ώστε η κατανομή συχνότητων να μην επηρεάζεται πέραν των αποτελεσμάτων μεγέθους δείγματος. Κατόπιν, όλες οι ομάδες σε μια σειρά πρέπει να είναι ομόλογες, με άλλα λόγια, να προέρχονται από έναν κοινό πρόγονο και να παρουσιάζουν κληρονομική συνέχεια, εκτός της ιστορικής συνέχειας¹⁷. Τέλος, η συσχέτιση πρέπει να διεξάγεται σε κατάλληλη χωρική κλίμακα, έτσι ώστε η κατανομή συχνότητας χαρακτηριστικών ή τύπων να μπορεί να θεωρηθεί χρονολογικά και όχι γεωγραφικά προσδιορισμένη¹⁸.

Η σχετική χρονολόγηση χρησιμοποιεί και μεθόδους φυσικών επιστημών, στις οποίες περιλαμβάνονται η παλαιοκλιματολογία και η ανάλυση πανίδας:

Η παλαιοκλιματολογία είναι η μελέτη των κλιματικών διακυμάνσεων, για τις οποίες δεν έχουν γίνει συστηματικές μετρήσεις¹⁹. Χρησιμοποιεί μια ποικιλία μεθόδων για την απόκτηση δεδομένων που διατηρούνται σε βράχους, ιζήματα, φύλλα πάγου, δακτυλίους δένδρων, κοράλλια, κελύφη και μικροαπολιθώματα. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί τα δεδομένα για τον προσδιορισμό της παρελθούσας κατάστασης των διαφόρων κλιματικών περιοχών της Γης και του ατμοσφαιρικού της συστήματος. Ο επιστημονικός τομέας της παλαιοκλιματολογίας έφθασε στην ωριμότητά του στον 20ό αιώνα. Οι μελέτες των παρελθουσών αλλαγών στο περιβάλλον και τη βιοποικιλότητα συχνά αντικατοπτρίζουν τις επιπτώσεις του κλίματος στις μαζικές εξαφανίσεις ειδών και τη βιοτική ανάκαμψη²⁰.

Ειδικότερα, η παλαιοκλιματική ανάλυση βασίζεται στην ανάλυση ισοτόπων οξυγόνου για τη χρονολόγηση ωκεάνιων ιζημάτων (που περιέχουν τα ασβεστούχα κελύφη των τρηματοφόρων

¹³ Renfrew and Bahn 2001, 122-123

¹⁴ Dunnell 1970, 308, επίσης Lyman et al 1997, 57 και O'Brien and Lyman 1999, 121-125.

¹⁵ Giddings 1966, 127-135.

¹⁶ Renfrew and Bahn 2012, 132.

¹⁷ Cochrane, 2009, 183-203.

¹⁸ Dunnell, 1970, 316, επίσης Lipo et al. 1997, 301-334.

¹⁹ Bradley 2015, 1-2.

²⁰ Sahney and Benton 2008, 759-765.

μικροοργανισμών) και ιζηματογενών οριζόντων τήξης πάγου και στρωμάτων πάγου και στην ανάλυση κόκκων γύρεως ή παλυνολογία. Το μεγαλύτερο μέρος του σήματος $\delta^{18}\text{O}$ στα βενθικά τρηματοφόρα (foraminifera) σχετίζεται με αλλαγές στην ισοτοπική σύνθεση των ωκεανών υπό την επίδραση του μεταβαλλόμενου όγκου του ηπειρωτικού πάγου²¹. Το $\delta^{18}\text{O}$ είναι μέτρο της αναλογίας σταθερών ισοτόπων οξυγόνου-18 (^{18}O) και οξυγόνου-16 (^{16}O) και είναι σταθερή σύνθεση ισοτόπων²².

Στην παλαιοκλιματική έρευνα συνεισφέρει επίσης η ανάλυση μικροπανίδας απολιθωμένων εντόμων και οστρακοειδών χερσαίων εδαφών και γλυκών νερών. Το φάσμα των μη-θαλάσσιων γεωλογικών μελετών που παρέχουν πληροφορίες σχετικές με την παλαιοκλιματολογία είναι σημαντικό, καθώς όλες σχεδόν οι ηπειρωτικές ιζηματογενείς αποθέσεις μεταφέρουν σε κάποιο βαθμό παλαιοκλιματικά σήματα, καθώς οι κατακρημνιστικές, παγετώδεις, λιμναίες και ποτάμιες κοιλάδες είναι συνάρτηση του κλίματος²³.

Από παλαιοκλιματική άποψη μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες των εντόμων είναι η ικανότητά τους να καταλαμβάνουν σύντομα νέα εδάφη μετά από κλιματική βελτίωση. Παρέχουν έτσι έναν πιο ευαίσθητο δείκτη κλιματικής διακύμανσης από ό, τι τα φυτά, τα οποία έχουν πολύ πιο αργά ποσοστά μετανάστευσης. Τα κολεόπτερα, για παράδειγμα μπορούν να καταλάβουν και να εγκαταλείψουν μια νέα επικράτεια ανταποκρινόμενα σε ένα αξιοσημείωτο αλλά σύντομο θερμό διάστημα, ενώ δεν υπάρχουν αποδείξεις για τέτοια συμβάντα στα αρχαία γύρεως λόγω της υστέρησης στο χρόνο απόκρισης της βλάστησης²⁴.

Από τις διάφορες αυτές επιμέρους αναλύσεις προκύπτουν, με μορφή διαγραμμάτων, οι ανάλογες κλιματολογικές και περιβαλλοντικές χρονοσειρές, οι οποίες χρησιμοποιούνται από την αρχαιολογία για τη σχετική χρονολόγηση των αρχαίων πολιτισμών σε όλο τον πλανήτη²⁵.

Απόλυτη χρονολόγηση

είναι η διαδικασία προσδιορισμού της ηλικίας ενός αρχαιολογικού δεδομένου στην αρχαιολογία και τη γεωλογία. Ορισμένοι επιστήμονες προτιμούν τους όρους χρονομετρική ή ημερολογιακή χρονολόγηση, καθώς η χρήση της λέξης «απόλυτη» συνεπάγεται αδικαιολόγητη βεβαιότητα ακρίβειας²⁶. Η απόλυτη χρονολόγηση παρέχει την αριθμητική ηλικία ή εύρος σε αντίθεση με τη σχετική χρονολόγηση, η οποία τοποθετεί τα γεγονότα σε τάξη, χωρίς να μετρά χρονικές διαφορές μεταξύ των γεγονότων. Στην αρχαιολογία, η απόλυτη χρονολόγηση βασίζεται συνήθως στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες των τεχνέργων, των κτηρίων ή άλλων κατασκευών που έχουν τροποποιηθεί από ανθρώπους και στις ιστορικές πηγές που προσδίδουν γνωστές ημερομηνίες (νομίσματα και γραπτή ιστορία). Οι τεχνικές περιλαμβάνουν τη δενδροχρονολόγηση, τη χρονολόγηση ραδιενεργού άνθρακα σε ξύλο ή οστά και μεθόδους χρονολόγησης παγιδευμένης ενέργειας, όπως η χρονολόγηση θερμοφωταύγειας των υαλωμάτων των κεραμικών κ.ά.²⁷.

Οι ιστορικές και ημερολογιακές μέθοδοι απόλυτης χρονολόγησης βασίζονται σε χρονολογίες και ημερολόγια που καταγράφηκαν από αρχαίους λαούς. Για παράδειγμα, οι αρχαίοι Έλληνες κατέγραψαν την ιστορία τους εκκινώντας από τη χρονολογία των πρώτων Ολυμπιακών Αγώνων

²¹ Bradley 2015, 222.

²² Tian *et al.* 2018, 6712.

²³ Flint 1976, 519–528.

²⁴ Coope and Brophy 1972, 97-142, επίσης Morgan, 1973 173-212.

²⁵ Renfrew and Bahn 2001, 127.

²⁶ Toby and Webster 2001, 203, επίσης Henke 2007, 312.

²⁷ Kelly and Hurst 2012, 87.

το 776 ΠΚΕ. Άλλοι αρχαίοι λαοί, όπως οι Μεσοποτάμιοι, οι Αιγύπτιοι, οι Ρωμαίοι και οι Μάγια διατηρούσαν ημερολόγια, στα οποία κατέγραφαν διάφορα γεγονότα με βάση τις εκάστοτε δυναστείες ή τις περιόδους εξουσίας των ηγεμόνων τους²⁸. Ένα από τα πιο ακριβέστερα ημερολόγια είναι αυτό των αρχαίων Αιγυπτίων, που περιλαμβάνει 31 δυναστείες, καλύπτοντας την περίοδο 3000-332 ΠΚΕ²⁹.

Χρησιμοποιώντας τις ιστορικές και ημερολογιακές χρονολογίες -και με την προϋπόθεση ότι τα ημερολόγια μπορούν να συνδεθούν με την ιστορική χρονολογία - οι αρχαιολόγοι μπορούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια την ηλικία αντικειμένων, όπως επιγραφών ή νομισμάτων, που αποκαλύπτονται σε «κλειστά» στρώματα. Επιπλέον, οι ιστορικές και ημερολογιακές χρονολογίες είναι χρήσιμες στη διασταυρωμένη χρονολόγηση. Έτσι, εάν, για παράδειγμα, η τυπολογική ακολουθία μιας αρχαιολογικής θέσης ή περιοχής μπορεί να συνδεθεί με τη στρωματογραφική ακολουθία μιας άλλης, η οποία μπορεί να χρονολογηθεί με ακρίβεια με βάση έστω και μια ιστορική ή ημερολογιακή χρονολογία, τότε η τυπολογική ακολουθία της πρώτης θέσης ή περιοχής μπορεί και αυτή να αποκτήσει απόλυτες χρονολογίες εκφρασμένες σε έτη.

Μέθοδοι απόλυτης χρονολόγησης

Οι φυσικές επιστήμες παρέχουν στην αρχαιολογία μια σειρά από μεθόδους απόλυτης χρονολόγησης:

α) Η χρονολόγηση με ραδιοάνθρακα (¹⁴C) ανακαλύφθηκε το 1949 από τον Libby, επιτρέποντας τη χρονολόγηση αρχαιολογικών δεδομένων που έως τότε δεν υπήρχε τρόπος να χρονολογηθούν. Στη φύση, ο άνθρακας υπάρχει ως δύο σταθερά, μη ραδιενεργά ισότοπα, δηλαδή άνθρακας-12 (¹²C) και άνθρακας-13 (¹³C). Το ραδιενεργό ισότοπο είναι ο άνθρακας-14 (¹⁴C). Ο χρόνος ημιζωής του ¹⁴C είναι 5.730 ± 40 χρόνια, οπότε η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα θα αναμενόταν να μειωθεί σε μερικές χιλιάδες χρόνια. Ωστόσο, ¹⁴C παράγεται συνεχώς στη χαμηλότερη στρατόσφαιρα και την άνω τροπόσφαιρα, κυρίως από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες και σε μικρότερο βαθμό από τις ηλιακές κοσμικές ακτίνες³⁰. Έτσι, παράγονται νετρόνια, που με τη σειρά τους δημιουργούν ¹⁴C όταν συγκρούονται με ισότοπα αζώτου-14 (¹⁴N). Μέσω πυρηνικής αντίδρασης δημιουργείται το ¹⁴C³¹. Μόλις παραχθεί, το ¹⁴C συνδυάζεται γρήγορα με το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα, για να σχηματίσει αρχικά μονοξείδιο (CO)³² και τελικά διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)³³. Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται με αυτόν τον τρόπο διαχέεται στην ατμόσφαιρα, διαλύεται στον ωκεανό και απορροφάται από φυτά μέσω φωτοσύνθεσης. Τα ζώα τρέφονται με φυτά και τελικά ο ραδιοάνθρακας κατανέμεται σε όλη τη βιόσφαιρα. Η αναλογία ¹⁴C / ¹²C είναι περίπου 1,25 μέρη ¹⁴C με 1012 μέρη ¹²C³⁴. Επιπλέον, περίπου το 1% των ατόμων άνθρακα ανήκει στο σταθερό ισότοπο ¹³C³⁵. Εκπέμποντας ένα βήτα σωματίδιο και ένα αντινεutrino ηλεκτρονίου, ένα από τα νετρόνια στον ¹⁴C πυρήνα αλλάζει σε πρωτόνιο και ο πυρήνας ¹⁴C επανέρχεται στο σταθερό (μη ραδιενεργό) ισότοπο ¹⁴N³⁶.

²⁸ Renfrew and Bahn 2001, 130-131.

²⁹ Renfrew and Bahn 2001, 13.

³⁰ Bowman 1995, 9-15, επίσης Russell 2011, 16.

³¹ Bianchi and Canuel 2011, 35.

³² Lal and Jull 2001, 731-742.

³³ Queiroz-Alves *et al.* 2018, 278-305.

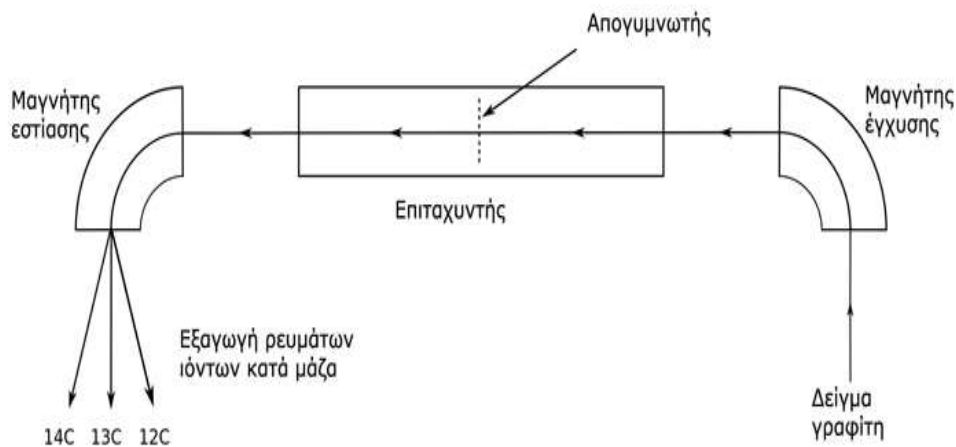
³⁴ Tsipenyuk 1997, 343.

³⁵ Bowman 1995, 9-15.

³⁶ Taylor and Bar-Yosef 2014, 33.

Κατά τη διάρκεια της ζωής του, ένα φυτό ή ζώο βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του, ανταλλάσσοντας άνθρακα είτε με την ατμόσφαιρα είτε με τη διατροφή του. Συνεπώς, θα έχει την ίδια αναλογία ^{14}C με την ατμόσφαιρα, ή στην περίπτωση των θαλάσσιων ζώων ή φυτών, με τον ωκεανό. Μόλις πεθάνει, παύει να αποκτά ^{14}C , αλλά το ^{14}C στο βιολογικό του υλικό κατά τη στιγμή του θανάτου θα συνεχίσει να αποσυντίθεται και έτσι ο λόγος των $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ στα κατάλοιπα του μειώνεται σταδιακά. Επειδή το ^{14}C διασπάται με γνωστό ρυθμό, η αναλογία ραδιοάνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί ο χρόνος διακοπής ανταλλαγής σε ένα δεδομένο δείγμα. Όσο μεγαλύτερο είναι το δείγμα ηλικιακά, τόσο λιγότερα ισότοπα ^{14}C θα μείνουν³⁷.

Οι ημερομηνίες που προκύπτουν από ραδιοχρονολόγηση παρουσιάζουν γενικά ένα εύρος τυπικής απόκλισης, αλλά μπορούν, να διορθωθούν με βάση τις χρονολογίες που παρέχει η δενδροχρονολόγηση³⁸. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ραδιοχρονολόγησης βελτιώνεται με την επιμήκυνση του χρόνου δοκιμής. Για παράδειγμα, εάν η καταμέτρηση της διάσπασης επί 250 λεπτά είναι αρκετή για να δώσει σφάλμα ± 80 χρόνια, με διάστημα εμπιστοσύνης 68%, τότε ο διπλασιασμός του χρόνου μέτρησης στα 500 λεπτά θα επιτρέψει να μετρηθεί δείγμα με μισό ^{14}C με το ίδιο σφάλμα 80 ετών³⁹. Η χρονολόγηση ραδιοάνθρακα γενικά περιορίζεται σε δείγματα που χρονολογούνται όχι περισσότερο από 50.000 έτη. Παλαιότερα δείγματα δεν έχουν επαρκές ραδιοϊσότοπο ^{14}C για να είναι μετρήσιμα. Παλαιότερες ημερομηνίες έχουν ληφθεί με τη χρήση ειδικών τεχνικών προετοιμασίας δειγμάτων, μεγάλα δείγματα και πολύ μεγάλους χρόνους μέτρησης. Οι συγκεκριμένες τεχνικές μπορούν να επιτρέψουν τη μέτρηση ημερομηνιών μέχρι 60.000 π.π. και σε μερικές περιπτώσεις έως 75.000 χρόνια πριν από το παρόν⁴⁰.



Εικ. 1. Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας επιταχυντή φασματομετρίας μάζας⁴¹.

Η χρονική κλίμακα είναι δυνατόν να επεκταθεί στα 80-100.000 χρόνια πριν, χάρη στη φασματομετρία μάζας με επιταχυντή (accelerator mass spectrometry-AMS), για να μετρά απευθείας, τα άτομα ραδιοάνθρακα, αντί να υπολογίζει τις διασπάσεις του⁴². Η AMS μετρά τα

³⁷ Tsipenyuk 1997, 344.

³⁸ Renfrew and Bahn 2001, 143.

³⁹ Bowman 1995, 38–39.

⁴⁰ Walker *et al.* 2005, 23.

⁴¹ Aitken 1990, 83.

⁴² Harris 1987, 23-43.

ισότοπα ^{14}C και ^{12}C σε ένα δεδομένο δείγμα, προσδιορίζοντας άμεσα την αναλογία $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Το δείγμα, συχνά με τη μορφή γραφίτη, φτιάχνεται για να εκπέμπει C-ιόντα (άτομα άνθρακα με ένα μόνο αρνητικό φορτίο), τα οποία εγχέονται σε ένα επιταχυντή. Τα ιόντα επιταχύνονται και διέρχονται μέσω λεπτού φύλλου άνθρακα, το οποίο λειτουργεί ως απογυμνωτής ηλεκτρονίων, έτσι ώστε τα ιόντα να εμφανίζονται με θετικό φορτίο. Τα ιόντα, τα οποία μπορεί να έχουν από 1 έως 4 θετικά φορτία (C+ έως C4+), ανάλογα με το σχέδιο του επιταχυντή, στη συνέχεια περνούν μέσω ενός μαγνήτη που καμπυλώνει την πορεία τους. Τα βαρύτερα ιόντα καμπυλώνουν λιγότερο από τα ελαφρύτερα, έτσι ώστε τα διαφορετικά ισότοπα να εμφανίζονται ως ξεχωριστά ρεύματα ιόντων. Ο ανιχνευτής σωματιδίων καταγράφει τότε τον αριθμό των ιόντων που ανιχνεύονται στο ρεύμα ^{14}C , αλλά επειδή ο όγκος των ^{12}C (και ^{13}C , που απαιτούνται για τη βαθμονόμηση) είναι υπερβολικά μεγάλος για την ανίχνευση μεμονωμένων ιόντων, οι μετρήσεις προσδιορίζονται μετρώντας το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται σε ένα κλωβό Φάραντεϊ⁴³. Το μεγάλο θετικό φορτίο που προκαλείται από τα μόρια των δυνάμεων του απογυμνωτή όπως το ^{13}CH , το οποίο έχει βάρος αρκετά κοντά στο ^{14}C για να παρεμβαίνει στις μετρήσεις, αποσυνδέεται, επομένως δεν ανιχνεύεται⁴⁴. Οι περισσότεροι επιταχυντές AMS μετρούν επίσης το $\delta^{13}\text{C}$ του δείγματος, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ηλικίας των ραδιοανθράκων του δείγματος⁴⁵.

Οι ερευνητές έχουν μελετήσει άλλα ραδιενεργά ισότοπα που δημιουργούνται από τις κοσμικές ακτίνες, για να διαπιστωθεί εάν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη χρονολόγηση αντικειμένων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Σε αυτά τα ισότοπα περιλαμβάνονται τα ^3He , ^{10}Be , ^{21}Ne , ^{26}Al και ^{36}Cl . Με την ανάπτυξη της AMS στη δεκαετία του '80 έγινε δυνατή η ακριβής μέτρηση των ισοτόπων, ώστε να αποτελέσουν τη βάση χρήσιμων τεχνικών, οι οποίες εφαρμόστηκαν κυρίως για τη χρονολόγηση πετρωμάτων⁴⁶. Τα φυσικώς απαντώμενα ραδιενεργά ισότοπα μπορούν, επίσης, να αποτελέσουν τη βάση άλλων μεθόδων, όπως η χρονολόγηση καλίου-αργού, η χρονολόγηση αργού-αργού και η χρονολόγηση ουρανίου⁴⁷. Άλλες τεχνικές χρονολόγησης που ενδιαφέρουν τους αρχαιολόγους περιλαμβάνουν τη θερμοφωταύγεια, οπτικά διεγερόμενη φωταύγεια (optically stimulated luminescence), τον συντονισμό στροφορμής ηλεκτρονίου (electron spin resonance dating-ESR) και χρονολόγηση με τροχιές σχάσης (fission track dating), καθώς και τεχνικές που εξαρτώνται από ετήσιες ζώνες ή στρώματα, όπως η δενδροχρονολόγηση, η τεφροχρονολόγηση και η χρονολόγηση με ιζηματογενή στρώματα ταινιωτών αργίλων (varves)⁴⁸.

Η δενδροχρονολόγηση χρησιμοποιεί τους δακτυλίους ετήσιας ανάπτυξης των δένδρων και ειδικότερα το εύρος των δενδροδακτυλίων, το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τις ετήσιες κλιματολογικές διακυμάνσεις. Στην αρχαιολογία η δενδροχρονολόγηση χρησιμοποιείται για τη χρονολόγηση θέσεων, κατασκευών, τεχνέργων, πολιτισμικών φάσεων και περιόδων⁴⁹. Η ανάπτυξη στα δέντρα εμφανίζεται σε ένα στρώμα κυττάρων κοντά στον φλοιό. Ο ρυθμός ανάπτυξης ενός δέντρου αλλάζει σε ένα προβλέψιμο πρότυπο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ανταποκρινόμενος στις εποχιακές κλιματικές αλλαγές, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ορατών δακτυλίων ανάπτυξης. Η διατομή των δασικών δένδρων υποδεικνύει μια εναλλαγή ανοικτόχρωμων και σκουρόχρωμων ζωνών, κάθε μία από τις οποίες είναι συνήθως συνεχής

⁴³ Aitken 1990, 82–85.

⁴⁴ Wiebert 1995, 16.

⁴⁵ Tuniz *et al.* 2004, 395.

⁴⁶ Walker 2005, 77–79.

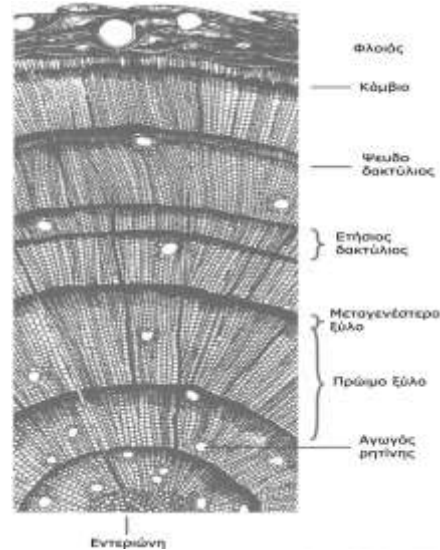
⁴⁷ Walker 2005, 57–77.

⁴⁸ Walker 2005, 93–162.

⁴⁹ Towner 2002, 68–84.

γύρω από την περιφέρεια του δέντρου. Αυτές οι ζώνες αντιπροσωπεύουν αυξήσεις εποχικής ανάπτυξης που παράγονται από μεριστρωματικούς ιστούς στο κάμβιο του δέντρου⁵⁰. Η μεγαλύτερη χρονοσειρά βαθμονόμησης με δακτυλίους είναι η χρονοσειρά της γερμανικής βελανιδιάς και πεύκου ~12.400 χρόνια, αποτελούμενη από >5.000 διαφορετικές αλληλεπικαλυπτόμενες χρονοσειρές από ζωντανά δέντρα, μεσαιωνική ξυλεία στέγης και ξύλο από ποτάμια περιβάλλοντα⁵¹. Από το 2013, οι παλαιότερες μετρήσεις δακτυλίων δέντρων στο βόρειο ημισφαίριο διαμόρφωσαν μια αλληλεπικαλυπτόμενη αλληλουχία που εκτείνεται στο παρελθόν από 12.580 έως 13.900 περίπου χρόνια⁵².

Δένδρα του ίδιου είδους που αναπτύσσονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή ή στο ίδιο φυσικό περιβάλλον παρουσιάζουν γενικά τις ίδιες διακυμάνσεις στη σειρά του εύρους των δενδροδακτυλίων τους, που μπορούν να μετρηθούν και να αποτυπωθούν σε ένα διάγραμμα («καμπύλη αναφοράς») ώστε να αποτελέσουν μια χρονολογημένη δακτυλιοσειρά ή μια χρονοσειρά δακτυλίων⁵³. Συνήθως, τα τμήματα αρχαίου ξύλου περιέχουν μόνον ένα τμήμα δακτυλίων και σπάνια τον εξωτερικό δακτύλιο ή φλοιό απ' όπου αρχίζει η μέτρηση για τον υπολογισμό της ηλικίας του δένδρου, γι' αυτό τα τμήματα αυτά δεν είναι δυνατόν να χρονολογηθούν αφεαυτού. Οι δακτυλιοσειρές τους συγκρίνονται με μια ήδη γνωστή χρονοσειρά δακτυλίων δένδρων του ίδιου είδους, από την ίδια γεωγραφική περιοχή. Συνταιριάζοντας διαδοχικά δακτυλιοσειρές από ζώντα δένδρα και από παλαιότερα δένδρα ή τμήματα ξύλου του ίδιου είδους, οι αρχαιολόγοι μπορούν να κατασκευάσουν μεγάλες και συνεχείς χρονοσειρές δενδροδακτυλίων για μια ολόκληρη γεωγραφική περιοχή, οι οποίες να εκτείνονται στο χρόνο μέχρι 10.000 χρόνια π.π.⁵⁴.



Εικ. 2. Σχεδιάγραμμα της κυτταρικής δομής νεαρού στελέχους κωνοφόρου. Διαφοροποιήσεις στο πάχος των τραχειδίων είναι δυνατόν να παράγουν ψευδοδακτυλίους, είτε στο πρώιμο είτε στο μεταγενέστερο ξύλο⁵⁵.

⁵⁰ Vaganov *et al.* 2006, 368.

⁵¹ Becker 1993, επίσης Friedrich *et al.* 2004

⁵² Reimer *et al.* 2013, 1869–1887.

⁵³ Fletcher *et al.* 1974, 31-40.

⁵⁴ Renfrew and Bahn 2001, 136

⁵⁵ Προσαρμογή από Fritts 1976, 59, εικ. 2.3.

Η δένδροχρονολόγηση παρέχει ακριβείς χρονολογίες και είναι χρήσιμη στην επαλήθευση και διόρθωση των χρονολογιών που προκύπτουν από τη χρονολόγηση με C-14. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί δείγματα ξύλου με τουλάχιστον 100 δακτυλίους για ορισμένα είδη⁵⁶ και ότι περιορίζεται σε σχετικά πρόσφατες αρχαιολογικές θέσεις (όχι παλαιότερες των 10.000 ετών) και σε γεωγραφικές περιοχές με αισθητές καιρικές μεταβολές⁵⁷.

Η μέθοδος Καλίου/Αργού (K-Ar) εφαρμόζεται στα ηφαιστειογενή πετρώματα και βασίζεται στο γεγονός ότι το κάλιο, που περιέχεται σε πετρώματα τέτοιου είδους με τη μορφή ραδιενεργών ατόμων (K-40), διασπάται σε ένα αέριο, το αργό (Ar-40), και φθείρεται με το πέρασμα του χρόνου. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τη χρονολόγηση ρωών λάβας και ηφαιστειακής τέφρας, η οποία σε ορισμένες περιοχές του κόσμου μπορεί να συγκριθεί με τις παγετώδεις αποθέσεις ή να συσχετισθεί με τα πρώιμα απολιθώματα ανθρωποειδών⁵⁸. Το αργόν είναι αέριο που μπορεί να εξαχθεί από ένα δείγμα με θέρμανση. Έτσι, η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη χρονολόγηση ηφαιστειακών πετρωμάτων που δεν περιέχουν αργό μετά την ψύξη της λάβας, ρυθμίζοντας έτσι το ισοτοπικό «ρολόι» στο μηδέν. Με την πάροδο του χρόνου, παράγεται και διατηρείται το ⁴⁰Ar μέσα στους μεταλλικούς κρυστάλλους, μέχρι να εξαχθεί με θέρμανση στο εργαστήριο κατά τη διαδικασία της χρονολόγησης⁵⁹. Η μέθοδος αυτή έχει μεγάλο χρονικό εύρος εφαρμογής από 100.000 μέχρι 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια και είναι χρήσιμη για τη χρονολόγηση πρώιμων αρχαιολογικών θέσεων.

Οι θεμελιώδεις παραδοχές στη χρονολόγηση καλίου/αργού είναι ότι (α) δεν έχει μείνει αργό στο ηφαιστειακό υλικό μετά τον σχηματισμό του και (β) το σύστημα παρέμεινε κλειστό από τότε άρχισε η παραγωγή του αργού. Η πρώτη παραδοχή μπορεί να είναι άκυρη στην περίπτωση ορισμένων ωκεάνιων βασαλτικών υλικών που διατηρούν το προηγουμένως σχηματισμένο αργό υπό υψηλή υδροστατική πίεση. Ομοίως, ορισμένα πετρώματα είναι πιθανό να έχουν ενσωματώσει παλαιότερο, πλούσιο σε αργό, υλικό κατά τη διάρκεια του σχηματισμού τους. Τέτοιοι παράγοντες οδηγούν στην υπερεκτίμηση της ηλικίας του δείγματος⁶⁰.

Παρόμοια σφάλματα προκύπτουν από το γεγονός ότι το σύγχρονο αργόν απορροφάται στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του δείγματος, με αποτέλεσμα να ακυρώνεται η δεύτερη υπόθεση. Ωστόσο, η ατμοσφαιρική ρύπανση με αργόν μπορεί να μετρηθεί με τη διερεύνηση των διαφόρων ισοτόπων του παρόντος αργού. Το ατμοσφαιρικό αργόν εμφανίζεται ως τρία ισότοπα, ³⁶Ar, ³⁸Ar και ⁴⁰Ar. Δεδομένου ότι ο λόγος ⁴⁰Ar/³⁶Ar στην ατμόσφαιρα είναι γνωστός, οι συγκεκριμένες συγκεντρώσεις των ³⁶Ar και ⁴⁰Ar σε ένα δείγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο του βαθμού ατμοσφαιρικής μόλυνσης και να προσαρμοσθεί κατάλληλα η φαινόμενη ηλικία του δείγματος.

Άλλη μέθοδος αρχαιολογικού ενδιαφέροντος είναι η θερμοφωταύγεια. Η φωταύγεια είναι το φως που εκπέμπεται από ένα ορυκτό κρύσταλλο (κυρίως χαλαζία και άστριο) όταν υποβάλλεται σε θέρμανση ή όταν εκτίθεται στο φως. Η μέθοδος της θερμοφωταύγειας εφαρμόζεται σε ανόργανα υλικά κατάλοιπα που είναι προϊόντα θέρμανσης, όπως κεραμικά αντικείμενα, καμένα υλικά από κλιβάνους ή εστίες, μεταλλουργικές σκωρίες, καμένα πυριτολιθικά εργαλεία, λάβα κ.λπ. Βασίζεται στην αρχή ότι όλα αυτά τα κρυσταλλικά υλικά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν την ενέργεια της φυσικής ακτινοβολίας που ενυπάρχει σε αυτά (από ραδιενεργές προσμείξεις και από το περιβάλλον). Η θερμοφωταύγεια ενός

⁵⁶ Baillie 1982, 33, επίσης Towner 2002, 68–84.

⁵⁷ Κουκουζέλη κ.ά. 2003, 173.

⁵⁸ Loffler 1976, 55-62.

⁵⁹ Dalrymple and Lanphere, 1969, 68.

⁶⁰ Fitch 1972, 77-91.

δείγματος συνάρτηση της ηλικίας του. Όσο παλαιότερο είναι το δείγμα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ένταση της θερμοφωταύγειας⁶¹.

Θερμαινόμενα τα δείγματα σε υψηλή θερμοκρασία, εκπέμπουν την αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας. Έτσι, είναι δυνατόν να χρονολογηθούν τα διάφορα κρυσταλλικά υλικά, προσδιορίζοντας τον χρόνο που μεσολάβησε αφότου αυτά θερμάνθηκαν για τελευταία φορά σε υψηλή θερμοκρασία. Έτσι μετράται η θερμοφωταύγειά τους, δηλαδή η αποθηκευμένη ενέργειά τους, καθώς και η επιδεκτικότητά τους να παράγουν θερμοφωταύγεια. Επειδή η θερμοφωταύγεια αυξάνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου (εκτός εάν τα υλικά αναθερμανθούν σε περιπτώσεις επανάχρησης), η μέθοδος παρέχει δυνατότητες απεριόριστης χρονολόγησης όσον αφορά στα γεωλογικά υλικά, όπως η λάβα. Όσον αφορά στα κεραμικά και τα πυριτολιθικά εργαλεία, έως τώρα υφίσταται το όριο των 10.000 και 100.000 χρόνων π.π. αντίστοιχα⁶².

Όσον αφορά στη σειρά χρονολογήσεων ουρανίου, σε ένα σύστημα που περιέχει ουράνιο και παραμένει αδιατάρακτο για μεγάλο χρονικό διάστημα (106 έτη), επικρατεί μια δυναμική ισορροπία, στην οποία κάθε θυγατρικό προϊόν θα είναι παρόν σε μια τέτοια ποσότητα, ώστε να φθείρεται με τον ίδιο ρυθμό που σχηματίζεται από το μητρικό ισότοπό του⁶³. Η αναλογία ενός ισότοπου προς κάποιο άλλο είναι ουσιαστικά σταθερή. Ωστόσο, αν το σύστημα διαταραχθεί, δε θα επικρατεί πλέον η ισορροπία παραγωγής και απώλειας και οι σχετικές αναλογίες διαφορετικών ισωτόπων θα βρίσκονται σε ανισορροπία. Μέσω της μέτρησης του βαθμού με τον οποίο επιστρέφει ένα διαταραγμένο σύστημα προϊόντων φθοράς σε μια νέα ισορροπία, μετράται και το χρονικό διάστημα της διαταραχής⁶⁴.

Πολύ περισσότερη εμπιστοσύνη μπορεί να δοθεί σε ημερομηνίες σειρών ουρανίου που λαμβάνονται σε δείγματα ανθρακικών αλάτων από σπηλαιοθέματα (σταλακτίτες και σταλαγμίτες). Τέτοιες αποθέσεις είναι πυκνές και δεν υπόκεινται σε μετααποθετική έκπλυση. Επειδή το ²³⁰Th είναι τόσο αδιάλυτο, το νερό από το οποίο κατακρημνίζεται το ανθρακικό σπηλαιοθέμα μπορεί να θεωρηθεί ουσιαστικά απαλλαγμένο από θόριο. Ως εκ τούτου, με την προϋπόθεση ότι η αρχική συγκέντρωση ουρανίου είναι επαρκής, η μέτρηση της αναλογίας ²³⁰Th/²³⁴U θα δείξει τη συσσώρευση ²³⁰Th με το πέρασμα του χρόνου⁶⁵.

Η ραδιομετρική μέθοδος ουρανίου/θωρίου, επίσης αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, βασίζεται στη ραδιενεργό διάσπαση των ισωτόπων του ουρανίου σε θυγατρικά προϊόντα, τα οποία αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, καθώς το ουράνιο διασπάται και εξασθενεί και επομένως η συσσώρευσή τους μπορεί να μετρηθεί. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη χρονολόγηση υλικών πλουσίων σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃), όπως τα σταλαγματικά υλικά σπηλαίων⁶⁶ και τα δόντια (ζώων και ανθρώπων). Το χρονικό εύρος εφαρμογής της είναι μέχρι στιγμής 50.000-500.000 χρόνια π.π.

Σύνοψη

Βάσει των παραπάνω στο παρόν δοκίμιο εκτέθηκε σύνοψη των μεθόδων απόλυτης και σχετικής χρονολόγησης, που υποδεικνύει αφενός τη σχέση της αρχαιολογίας με τις φυσικές επιστήμες, αλλά και την ανάπτυξη του ιδιαίτερου κλάδου της αρχαιομετρίας δηλαδή της

⁶¹ Bradley 2015, 1-2.

⁶² Renfrew and Bahn 2001, 149.

⁶³ Broecker and Bender 1972.

⁶⁴ Ivanovich and Harmon 1982

⁶⁵ Harmon *et al.* 1975, 21-33.

⁶⁶ Renfrew and Bahn 2001, 154-155.

αρχαιολογικής επιστήμης και την εφαρμογή επιστημονικών τεχνικών για την ανάλυση και χρονολόγηση αρχαιοϋλικών, που σχετίζονται με αρχαιολογικές μεθοδολογίες.

Βιβλιογραφία

- Aitken, M.J. 1990, *Science-based Dating in Archaeology*, London: Longman.
- Bianchi, T.S., Canuel, E.A. 2011, *Chemical Markers in Aquatic Ecosystems*, Princeton: Princeton University Press.
- Birx, H.J. (ed.) 2010, *21st Century Anthropology: A Reference Handbook*, Sage Publications.
- Bortolini, E. 2016, Typology and Classification, in *The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis*, edited by A. Hunt, 651-671, Oxford: Oxford University Press.
- Bowman, S. 1995, *Radiocarbon Dating*, London: British Museum Press.
- Bradley, R. 2015, *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*. Oxford: Elsevier
- Cochrane, E.E. 2009, Style, Function, and Systematic Empiricism: The Conflation of Process and Pattern, in *Style and Function: Conceptual Issues in Evolutionary Archaeology*, edited by Hurt, T.D., Rakita, G.F.M. 183-203, Westport, CT: Bergin and Garvey.
- Coope, G.R., Brophy, J.A., 1972, Late glacial environmental changes indicated by a coleopteran succession from North Wales, *Boreas*, 1, 97-142.
- Dalrymple, G.B., Lanphere, M.A. 1969, *Potassium-Argon Dating: Principles, Techniques and Applications to Geochronology*, San Francisco: W.H. Freeman.
- Dunnell, R.C. 1988, "Low-density archaeological records from plowed surfaces: Some preliminary considerations," *American Archaeology*, 7: 29-38.
- Fitch, J.R. 1972, Selection of suitable material for dating and the assessment of geological error in potassium-argon age determination, in *Calibration of Hominoid Evolution*, edited by Bishop, W.W., Miller, J.A., 77-91, Edinburgh: Scottish Academic Press.
- Fletcher, J.M., Tapper, M.C., Walker, F.S. 1974, Dendrochronology: a reference curve for slow grown oaks, A.D. 1230 to 1546, *Archaeometry*, 16: 31-40.
- Flint, R.F. 1976, Physical evidence of quaternary climatic change, *Quaternary Research* 6, 519-528.
- Foucault, M. 1973, *The Order of Things*. New York: Vintage Books.
- Fritts, H.C. 1976, *Tree Rings and Climate*, London: Academic Press.
- Giddings, J.L. 1966. "Cross-dating the archaeology of northwestern Alaska, *Science*", 153: 127-135.
- Harmon, R.S., Thompson, P., Schwarcz, H.P., Ford, D.C., 1975. "Uranium-series dating of speleothems," *National Speleological Society Bulletin*, 37: 21-33.
- Harris D.R. 1987. "The impact on archaeology of radiocarbon dating by accelerator mass spectrometry", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 323: 23-43.
- Henke, W. 2007, *Handbook of paleoanthropology*, New York: Springer.
- Kelly, R.L., Hurst, T.D. 2012. *Archaeology: down to earth*, Belmont, CA: Wadsworth, Cengage Learning.
- Κουκουζέλη, Α. κ.ά. 2003. *Αρχαιολογία στον Ελληνικό Χώρο*, Τόμ. Α', Πάτρα: ΕΑΠ.
- Lal, D., Jull, A.J.T. 2001, "In-situ cosmogenic ¹⁴C: production and examples of its unique applications in studies of terrestrial and extraterrestrial processes", *Radiocarbon*, 43(2): 731-742.
- Leach, E. 1976, *Culture and Communication*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Lipo, C.P., Madsen, M.E., Dunnell, R.C., Hunt, T. 1997. "Population Structure, Cultural Transmission, and Frequency Seriation", *Journal of Anthropological Archaeology* 16: 301-334.

- Loffler, E., 1976. "Potassium-argon dates and pre-Wurm glaciations of Mount Giluwe volcano, Papua, New Guinea", *Z Gletscherk Glazialgeol*, 12: 55-62.
- Lyman, R.L., O'Brien, M.J., and Dunnell, R.C. 1997. *The Rise and Fall of Culture History*, New York: Plenum Press.
- Morgan, A., 1973. "Late Pleistocene environmental changes indicated by fossil insect faunas of the English Midland", *Boreas*, 2: 173-212.
- O'Brien, M.J., Lyman, R.L. 1999. *Seriation, Stratigraphy, and Index Fossils: The Backbone of Archaeological Dating*. New York: Kluwer.
- Queiroz-Alves, E., Macario, K., Ascough, P., Bronk, R.C. 2018. "The worldwide marine radiocarbon reservoir effect: Definitions, mechanisms and prospects", *Reviews of Geophysics*, 56(1): 278-305.
- Renfrew, C., Bahn, B. 2001. *Αρχαιολογία: Θεωρίες, μεθοδολογία και πρακτικές εφαρμογές*, Αθήνα: Ινστιτούτο του Βιβλίου-Α. Καρδαμίτσα.
- Russell, N. 2011. *Marine radiocarbon reservoir effects (MRE) in archaeology: temporal and spatial changes through the Holocene within the UK coastal environment (PhD thesis)*, Glasgow, Scotland UK: University of Glasgow.
- Sahney, S., Benton, M.J. 2008. "Recovery from the most profound mass extinction of all time, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*", 275: 759-765.
- Spaulding, A.C. 1953. "Statistical Techniques for the Discovery of Artifact Types", *American Antiquity* 18(4): 305-313.
- Stanley, S.M. 1999, *Earth System History*, New York: W.H. Freeman and Company.
- Taylor R.E., Bar-Yosef, O. 2014. *Radiocarbon Dating: An Archaeological Perspective*, New York: Routledge.
- Tian, C., Wang, L., Kaseke, K.F., Bird, B.W. 2018. "Stable isotope compositions ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$) of rainfall and snowfall in the central United States", *Science Reports*, 8(1), 6712.
- Toby, E.S., Webster, D.L., (eds.) 2001, *Archaeology of ancient Mexico and Central America: an encyclopedia*, New York: Garland.
- Towner, R. H. 2002. "Archeological dendrochronology in the southwestern United States", *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, (11)2, 68-84.
- Tuniz, C., Zoppi, U., Barbetti, M. 2004. "Radionuclide dating in archaeology by accelerator mass spectrometry", in *Physics Methods in Archaeometry*, edited by Martini, M., Milazzo, M. Piacentini, M., 385-405. Amsterdam: IOS Press.
- Tsipenyuk, Y.M. 1997. *Nuclear Methods in Science and Technology*, Bristol, UK: Institute of Physics Publishing.
- Vaganov, E.A., Hughes, M.K., Shashkin, A.V., 2006. *Growth Dynamics of Tree-rings: An Image of Past and Future Environments*. Berlin: Springer-Verlag.
- Walker, D. A., Reynolds, M. K., Daniels, F. J. A., Einarsson, E., Elvebakk, A., Gould, W. A., and the other members of the CAVM Team 2005. "The Circumpolar Arctic vegetation map", *Journal of Vegetation Science*, 16(3): 267-282.
- Wiebert, A. 1995, *Development of the Lund AMS System and the Evaluation of a New AMS Detection Technique*, Lund: University of Lund.

