ePublishing

Open Schools Journal for Open Science

Vol 3, No 7 (2020)

Χρονολόγηση οργανικών υλικών με τη μέθοδο του ραδιενεργού άνθρακα-14

Ηλίας Θεοδωρόπουλος, Ιωάννα Μπούρχα, Γιάννης Μανιάτης, Λαμπρινή Παπατσίμπα

doi: 10.12681/osj.24352

Copyright © 2020, Ηλίας Θεοδωρόπουλος, Ιωάννα Μπούρχα, Γιάννης Μανιάτης, Λαμπρινή Παπατσίμπα

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

To cite this article:

Θεοδωρόπουλος Η., Μπούρχα Ι., Μανιάτης Γ., & Παπατσίμπα Λ. (2020). Χρονολόγηση οργανικών υλικών με τη μέθοδο του ραδιενεργού άνθρακα-14. *Open Schools Journal for Open Science*, *3*(7). https://doi.org/10.12681/osj.24352

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 23/01/2026 08:09:50

Open Schools Journal
for Open Science

Χρονολόγηση οργανικών υλικών με τη μέθοδο του ραδιενεργού άνθρακα-14

Θεοδωρόπουλος Ηλίας[1], Μπούρχα Ιωάννα[1], Μανιάτης Γιάννης[2], Λαμπρινή Παπατσίμπα[3]

[1]Πειραματικό Σχολείο Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, Ελλάδα,

[2] Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», Αθήνα, Ελλάδα

[3] Φυσικός, Πειραματικό Σχολείο Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, Ελλάδα

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τον προσδιορισμό της ημερολογιακής ηλικίας δειγμάτων (βαθμονόμηση) από αρχαιολογικές ανασκαφές στην Ελλάδα. Το ερευνητικό ερώτημα που θέσαμε είναι: Με ποιο τρόπο θα προσδιορίσω την ημερολογιακή ηλικία δειγμάτων από αρχαιολογικές ανασκαφές στα οποία έχει μετρηθεί η περιεκτικότητα σε άνθρακα-14; Η μεθοδολογία που εφαρμόσαμε βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε έμβιος οργανισμός όσο ζει διατηρεί σταθερή την περιεκτικότητα του άνθρακα-14 στους ιστούς του. Αμέσως μετά τον θάνατο του αυτή η περιεκτικότητα μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο. Το χρονικό διάστημα (t) από την στιγμή του θανάτου του έμβιου οργανισμού προσδιορίζεται από τη σχέση: $t = 8033 \cdot \ln\frac{N}{N_0}$ (1), όπου N η περιεκτικότητα σε άνθρακα-14 του δείγματος προς χρονολόγηση και N_0 η περιεκτικότητα όταν ο οργανισμός ήταν ζωντανός. Ο χρόνος που προσδιορίζεται από τη σχέση (1) ονομάζεται ηλικία σε έτη άνθρακα-14. Στην πραγματικότητα, όμως, η N_0 μεταβάλλεται με το χρόνο, λόγω μεταβολής του μαγνητικού πεδίου της Γης και της δραστηριότητας του ήλιου. Τα παραπάνω επηρεάζουν την παραγωγή του άνθρακα-14 άρα και την απορρόφηση του από τους οργανισμούς. Επομένως, ο χρόνος που προσδιορίζεται σε έτη

άνθρακα-14 δεν αντιστοιχεί στον ημερολογιακό χρόνο. Για να μετατρέψουμε τα έτη άνθρακα-14 σε ημερολογιακά χρησιμοποιούμε τη καμπύλη βαθμονόμησης και το λογισμικό Origin.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

Αρχαιομετρία, Ραδιοχρονολόγηση, βαθμονόμηση, μαγνητικό πεδίο της γης, διάσπαση β, νόμος ραδιενεργών διασπάσεων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της αρχαιολογικής επιστήμης είναι η αναζήτηση μεθόδων που θα τους επιτρέπουν το προσδιορισμό με χρονολογική σειρά γεγονότων για περιόδους για τις οποίες ή δεν έχουν εμφανισθεί ακόμη γραπτά μνημεία ή δεν υπάρχουν, έτσι ώστε να είναι σε θέση να διατυπώσουν μια ασφαλή θεωρία για την ανάπτυξη και εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού (Aitken, 1999).

Η ανάπτυξη των Φυσικών Επιστημών τον προηγούμενο αιώνα έπαιξε καταλυτικό ρόλο προς αυτή την κατεύθυνση και άλλαξε δραστικά τη γνώση μας για την χρονική εξέλιξη του πολιτισμού και του περιβάλλοντος με μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της επιστημονικής έρευνας κυρίως στη Φυσική, όπως εκείνη του Ραδιοάνθρακα ή Άνθρακα-14. Η μέθοδος αυτή ανακαλύφθηκε το 1949 από τον Αμερικανό πυρηνικό χημικό W.F. Libby, ο οποίος πήρε βραβείο Nobel για την ανακάλυψη του. Η παραπάνω μέθοδος έχει βελτιωθεί τα τελευταία 60 χρόνια και πλέον εφαρμόζεται σε οργανικά υλικά (άνθρακες, ξύλα, οστά κλπ), τα οποία είναι εύκολα διαθέσιμα στις πιο πολλές αρχαιολογικές ανασκαφές. Μάλιστα, έχει όριο εφαρμογής τα 50.000 χρόνια καλύπτοντας έτσι τις πιο βασικές περιόδους στην εξέλιξη του πολιτισμού (Μανιάτης, 2012).

Στην παρούσα εργασία θα προσδιορίσουμε την ημερολογιακή ηλικία (βαθμονόμηση) δειγμάτων από Αρχαιολογικές ανασκαφές στον Ελλαδικό χώρο, η ανάλυση των οποίων έγινε στο εργαστήριο Αρχαιομετρίας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

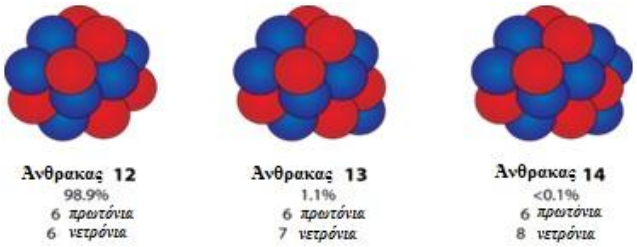
Open Schools Journal
for Open Science

Ο ραδιενεργός Άνθρακας 14

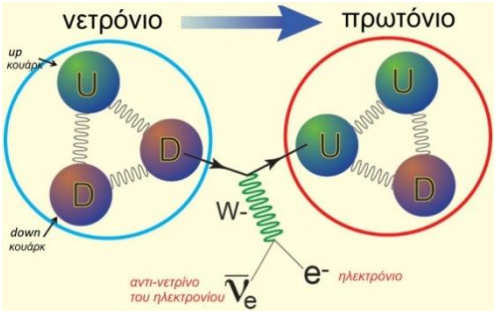
Ισότοπα χαρακτηρίζονται δυο χημικά στοιχεία που έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων στο πυρήνα τους άρα και ηλεκτρονίων κι επομένως τις ίδιες χημικές ιδιότητες, δηλαδή κατέχουν την ίδια θέση στο περιοδικό πίνακα.

Ο άνθρακας είναι το πρώτο στοιχείο της 14ης ομάδας του περιοδικού πίνακα. Έχει ατομικό αριθμό 6, ενώ ο μαζικός αριθμός του εξαρτάται από το ισότοπο που μελετάμε. Το χημικό στοιχείο άνθρακας έχει τρία ισότοπα:

- ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$, (πυρήνας αποτελείται από 6 πρωτόνια και 8 νετρόνια)
- ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, (πυρήνας αποτελείται από 6 πρωτόνια και 7 νετρόνια)
- ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, (πυρήνας αποτελείται από 6 πρωτόνια και 7 νετρόνια). Το ισότοπο αυτό βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, από αυτό δομούνται κυρίως όλοι οι έμβιοι οργανισμοί.



Από τα τρία αυτά ισότοπα μόνο το ${}^{14}\mathrm{C}$ είναι ραδιενεργό. Ένα νετρόνιο του πυρήνα του με την επίδραση ασθενούς πυρηνικής δύναμης μετατρέπεται σε πρωτόνιο, οπότε ο πυρήνας πλέον αποτελείται από 7 πρωτόνια και 7 νετρόνια, δηλαδή μετατρέπεται στο στοιχείο άζωτο N_2.



Εικόνα 1
Διάσπαση β^-

$$\mathrm{n} \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

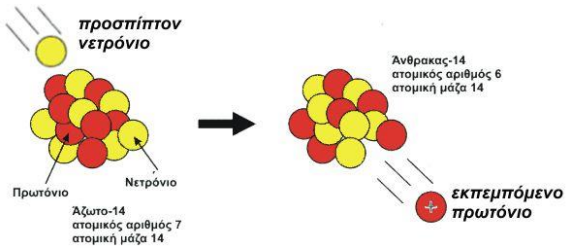
ή

$${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_e$$

Open Schools Journal
for Open Science

Σχηματισμός Ραδιενεργού Άνθρακα και η πορεία του προς τους Έμβιους οργανισμούς

Η γήινη ατμόσφαιρα βομβαρδίζεται διαρκώς από όλες τις κατευθύνσεις με σωματίδια (κοσμική ακτινοβολία). Όταν τα υψηλής ενέργειας κοσμικά σωματίδια συγκρούονται με άτομα της ανώτερης ατμόσφαιρας είναι δυνατόν να προκαλέσουν έξοδο πρωτονίων ή νετρονίων από τους πυρήνες τους. Τα νετρόνια που παράγονται από αυτές τις συγκρούσεις είναι δυνατόν να τα προσλάβουν πυρήνες ατόμων ^{14}N απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ένα πρωτόνιο (εικόνα 2).



Εικόνα 2
Σχηματισμός ^{14}C

$$^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + p^{+}$$

Συνεπώς, ο ^{14}C δημιουργείται από την κοσμική ακτινοβολία και επομένως η περιεκτικότητα του στην ανώτερη ατμόσφαιρα εξαρτάται από την ισχύ της κοσμικής ακτινοβολίας που δέχεται η Γη, και κατά συνέπεια και από όποιους παράγοντες επηρεάζουν την ισχύ της.

Η συγκέντρωση του ισοτόπου ^{14}C είναι πάρα πολύ μικρή σε σύγκριση με εκείνη του ^{12}C -σε καθένα τρισεκατομμύριο άτομο ^{12}C, περιέχεται ένα άτομο ^{14}C. Υπολογίζεται ότι στην εποχή μας παράγονται κατά μέσο όρο περίπου 7,5 Kg ^{14}C κατά έτος σε ολόκληρη τη Γη (Aitken 1990).

Ο ^{14}C που παράγεται στην ανώτερης ατμόσφαιρας αντιδρά με το οξυγόνο και σχηματίζεται διοξείδιο του άνθρακα ($^{14}CO_2$). Ένα μέρος του διοξειδίου διαλύεται στους ωκεανούς, ενώ ένα άλλο προσλαμβάνεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης και στη συνέχεια μέσω της τροφικής αλυσίδας περνάει σε όλα τα έμβια όντα και αποθηκεύεται στους ιστούς τους. Επειδή ο ^{14}C είναι ραδιενεργός, μετασχηματίζεται με διάσπαση β^- σε άζωτο (εικόνα 1), άρα καθημερινά η περιεκτικότητα του στους ιστούς μειώνεται. Ωστόσο, όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί προσλαμβάνουν καθημερινά μια σταθερή ποσότητα ^{14}C μέσω των τροφών τους. Με τον τρόπο αυτό επέρχεται μια ισορροπία και κάθε ζωντανός οργανισμός διατηρεί μια σταθερή συγκέντρωση ^{14}C (N_0).

Ραδιενεργός διάσπαση

Έστω t_0=0 s μια χρονική στιγμή κατά την οποία υπάρχουν N_0 πυρήνες ενός ραδιενεργού υλικού Α οι οποίοι μετασχηματίζονται με τυχαίο τρόπο σε πυρήνες υλικού Β. Ονομάζουμε ρυθμό διάσπασης των πυρήνων του υλικού Α στη χρονική στιγμή t το πηλίκο με αριθμητή τον αριθμό των πυρήνων του Α που διασπώνται (ΔN) και παρονομαστή το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται ο μετασχηματισμός, (Δt). Τότε ισχύει:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \cdot N \quad (1),$$

όπου N ο αριθμός των πυρήνων του Α τη χρονική στιγμή t και λ μια σταθερά που χαρακτηρίζει τους πυρήνες του Α. Η εξίσωση (1) αποτελεί τον νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων.

Αν ολοκληρώσουμε την εξίσωση (1) με όρια N_0 έως N και χρόνο από t_0=0 έως t s έχουμε:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

Από τη σχέση (2) προκύπτει ότι το λ συνδέεται με το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να διασπαστούν οι μισοί αρχικοί πυρήνες. το οποίο συμβολίζουμε ως $T_{1/2}$ και ονομάζεται χρόνος υποδιπλασιασμού: $\lambda = \frac{ln2}{T_{1/2}}$

Εκθετική μείωση μεγεθών

Στα μαθηματικά, η εκθετική μείωση περιγράφει τη διαδικασία μείωσης μιας ποσότητας στην πάροδο του χρόνου κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό, και μπορεί να εκφραστεί με τον τύπο $y=a(1-b)^t$, όπου y είναι η τελική ποσότητα, a είναι η αρχική ποσότητα, b είναι ο παράγοντας μείωσης και t ο χρόνος που έχει περάσει.

Ραδιοχρονολόγηση

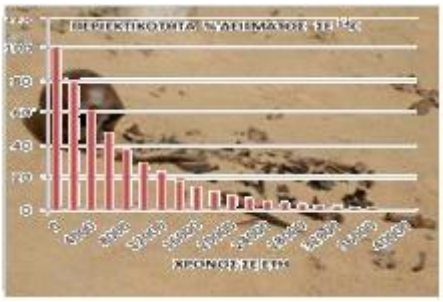
Από τη σχέση (2) προκύπτει: $t = \frac{T_{1/2}}{ln2} \cdot ln\frac{N_0}{N}$ (3), δηλαδή μπορούμε να υπολογίσουμε το χρονικό διάστημα που πέρασε από τη στιγμή που αρχικά είχαμε N_0 πυρήνες μέχρι τη στιγμή που οι πυρήνες γίνονται N αρκεί να γνωρίζουμε το χρόνο υποδιπλασιασμού των πυρήνων. Η χρήση της

περιεκτικότητας ενός ραδιενεργού στοιχείου για την μέτρηση χρονικών διαστημάτων ονομάζεται ραδιοχρονολόγηση.

ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΡΑΔΙΟΑΝΘΡΑΚΑ

Αρχή της μεθόδου

Το 1940 μια ερευνητική ομάδα στο Πανεπιστήμιο του Σικάγου με επικεφαλής τον W. E. Libby ,η οποία μελετούσε την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας στην γηίνη ατμόσφαιρα, είχε την ιδέα να προσδιορίσει την ηλικία υλικών βιολογικής προέλευσης (ξύλο, άνθρακας, σπόροι, καρποί, οστά, ελεφαντοστούν, κέρατα, ύφασμα, χαρτί, πάπυρος, τύρφη, οργανικά ιζήματα κ.α) με χρήση του ^{14}C. Η ιδέα βασίζεται στην παρατήρηση ότι, όταν ένας έμβιος οργανισμός πεθάνει, η περιεκτικότητα σε ^{14}C μειώνεται, διότι παύει να προσλαμβάνει τροφή, η οποία την διατηρούσε σταθερή στους ιστούς. Ο ρυθμός μείωσης της περιεκτικότητας ακολουθεί το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων.



Εικόνα 4
Η περιεκτικότητα σε ^{14}C σε έναν έμβιο οργανισμό μειώνεται εκθετικά με το χρόνο από τη στιγμή του θανάτου του

Επομένως, με χρήση της εξίσωσης (3) θα μπορούσε κάποιος να προσδιορίσει το χρονικό διάστημα που πέρασε από τη στιγμή που απεβίωσε ο οργανισμός, αρκεί να μπορεί να προσδιορίσει την περιεκτικότητα σε ^{14}C τη στιγμή του θανάτου του (N_0) και την περιεκτικότητα σήμερα (N). Ο Libby προσδιόρισε πειραματικά το χρόνο υποδιπλασιασμού του ^{14}C σε 5568 έτη και την περιεκτικότητα N από την μέτρηση της ακτινοβολίας β που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση. Επίσης για τον προσδιορισμό του N_0, ύστερααπό διεθνή συμφωνία, λαμβάνεται ίσος με το 95% της περιεκτικότητας οξαλικού οξέως του έτους 1950 που θεωρείται ως το έτος 0

(παρόν) για την μέθοδο του ^{14}C. Για τη μέτρηση του N_0 χρησιμοποιείται ως πρότυπο δείγμα από οξαλικό οξύ σε κρυσταλική μορφή το οποίο παρασκευάστηκε από εκχύλισμα φυτών και φυλάσσεται στο National Institute of Standards and Technology (NIST) στην Αμερική.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα από τη σχέση (3) προκύπτει για την ηλικία ενός δείγματος ότι:

$$\text{Ηλικία δείγματος} = 8033 \cdot \ln\frac{N}{N_0} \quad (4)$$

Αρχικά, η μέθοδος θεωρήθηκε πολύ ακριβής στη χρονολόγηση αγνώστου ηλικίας οργανικής ύλης, ωστόσο μεταγενέστερη έρευνα κατέδειξε ότι η μέθοδος είχε πάρα πολλά προβλήματα και περιορισμούς. Σήμερα, η μέθοδος έχει βελτιωθεί σημαντικά και πλέον υπάρχουν πολλά εργαστήρια παγκοσμίως τα οποία ασχολούνται με τη ραδιοχρονολόγηση και την έρευνα στη βελτίωση της μεθόδου αυτής.

Μέτρηση της συγκέντρωσης σε ^{14}C στο δείγμα

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης του ^{14}C σε ένα δείγμα, όπως:

1. Μέτρηση της ακτινοβολίας β (ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια) που εκπέμπει ο ^{14}C κατά τη διάσπαση του (Ραδιομετρική Μέθοδος – Radiometric Dating).
2. Μέτρηση των ίδιων των ατόμων του ^{14}C με επιτάχυνση και διαχωρισμό τους από τα άλλα ισότοπα του άνθρακα σε επιταχυντή ιόντων (Μέθοδος Επιταχυντή – AMS Dating).

Η μονάδα ^{14}C του Εργαστηρίου Αρχαιομετρίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» χρησιμοποιεί την Ραδιομετρική τεχνική του αερίου δείγματος (Gas Proportionalc Counting (GPC) technique). Η τεχνική αυτή έχει μεγάλη ακρίβεια, αξιοπιστία και απόδοση. Το Εργαστήριο Αρχαιομετρίας έχει τη δυνατότητα μέτρησης σχετικά μικρών δειγμάτων (με περιεκτικότητα περίπου 0,5 g άνθρακα). Ωστόσο, για τος μετρήσεις αυτές κρίνεται αναγκαία η χρήση επιταχυντή. Για το σκοπό αυτό το Εργαστήριο συνεργάζεται με αξιόπιστα εργαστήρια επιταχυντή του εξωτερικού, όπου τα πολύ μικρά δείγματα στέλνονται για μέτρηση, μετά από μια πρώτη επεξεργασία.

Για να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων, είναι σημαντικό τα δείγματα να έχουν μεγάλη

καθαρότητα. Για τον λόγο αυτόν, πριν μετρηθεί η περιεκτικότητα των δειγμάτων, αυτά υφίστανται σειρά από πολύπλοκες διαδικασίες καθαρισμού από προσμίξεις.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΙΚΙΩΝ ΤΟΥ ^{14}C

Η βασική υπόθεση πάνω στην οποία στηρίχθηκε η ραδιοχρονολόγηση με ^{14}C, δεν ευσταθεί. Η συγκέντρωση σε ^{14}C μεταβάλλεται με τον χρόνο από διάφορες αιτίες με κυριότερες:

a) τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας¸ η οποία επηρεάζεται από την ηλιακή δραστηριότητα και τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της Γης
b) από ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε νεότερες περιόδους, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα κ.α.

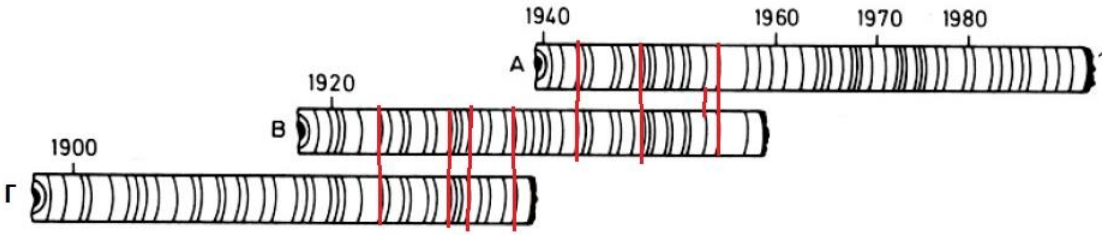
Όμως, η ηλικία που προσδιορίζεται με βάση το πρότυπο του οξαλικού οξέως είναι μία επιστημονικά ορθή προσέγγιση ώστε όλες οι χρονολογήσεις που προσδιορίζονται από διαφορετικά εργαστήρια στον κόσμο να είναι απολύτως συγκρίσιμες.

Η ηλικία αυτή εκφράζεται διεθνώς σε έτη ^{14}C ή σε έτη πριν από σήμερα (Before Present) και συμβολίζεται με BP (π.χ. ηλικία = 2000 BP). Αυτή είναι μεν διεθνώς αναγνωρίσιμη και συγκρίσιμη, αλλά δεν αντιστοιχεί στην πραγματική ημερολογιακή ηλικία του δείγματος, διότι δεν έχει ληφθεί υπόψη η μεταβολή της περιεκτικότητας του ^{14}C στην ατμόσφαιρα –μάλιστα, όσο πηγαίνουμε προς τα πίσω, φαίνεται να αυξάνεται! Με άλλα λόγια, στη πραγματικότητα ο οργανισμός πέθανε σε περισσότερα από 2000 πραγματικά έτη. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο η ηλικία που προσδιορίστηκε με βάση τη σχέση (4) και την παραπάνω υπόθεση να διορθωθεί, δηλαδή να βαθμονομηθούν οι ηλικίες BP ως προς την κύμανση της συγκέντρωσης του ^{14}C στην ατμόσφαιρα, ώστε να προκύπτει η πραγματική/ημερολογιακή ηλικία

Καμπύλη Βαθμονόμησης των ηλικιών του ^{14}C

Για να κατασκευάσουμε την καμπύλη βαθμονόμησης θα πρέπει να έχουμε μία σειρά δειγμάτων των οποίων η ημερολογιακή ηλικία είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια, ώστε να προσδιορίζουμε την ηλικία τους σε έτη ^{14}C και στη συνέχεια να κάνουμε την αντιστοιχία.

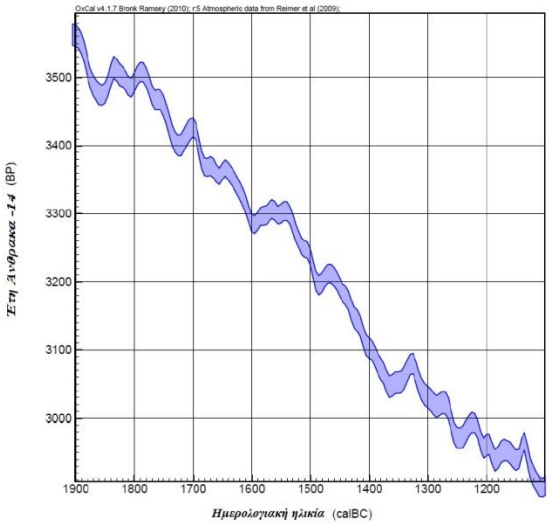
Γνωρίζουμε ότι οι κορμοί των δένδρων αποτελούνται από δακτυλίους. Κάθε ημερολογιακό έτος σχηματίζεται ένας δακτύλιος, το πάχος του οποίου εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο (βροχερό έτος αντιστοιχεί σε παχύ δακτύλιο, ενώ ξηρό έτος σε λεπτό δακτύλιο). Επομένως, θα μπορούσαμε να βρούμε την ημερολογιακή ηλικία ενός δένδρου τη στιγμή που το κόβουμε μετρώντας τους δακτυλίους που έχουν σχηματισθεί στον κορμό του. Επίσης συνδυάζοντας δακτυλίους από δένδρα που έζησαν διαφορετικές περιόδους αλλά είχαν χρονικές διάρκειες επικάλυψης μπορούμε να σχηματίσουμε μια σειρά από δακτυλίους δένδρων των οποίων γνωρίζουμε ακριβώς την ημερολογιακή ηλικία (εικόνα 4).



Εικόνα 4

Η επικάλυψη πάχους εσωτερικών δακτυλίων νεώτερων δένδρων με εξωτερικούς δακτυλίους παλαιότερων οδηγεί στην δημιουργία της απόλυτης σειράς δακτυλίων γνωστής ηλικίας

Με συνδυασμό δακτυλίων από αιωνόβια δένδρα της Καλιφόρνιας, Ιρλανδίας, Γερμανίας και Ιταλίας έχει κατασκευαστεί μια συνεχής σειρά δακτυλίων η οποία πηγαίνει πίσω 11.500 από σήμερα. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η ηλικία των αντίστοιχων δακτυλίων σε έτη ^{14}C. Με αυτή τη διαδικασία, κατασκευάζεται η παγκόσμια καμπύλη βαθμονόμησης (εικόνα 5) .

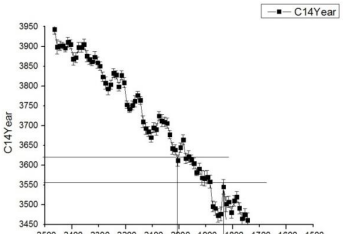


Εικόνα 5

Τμήμα της διεθνούς καμπύλης βαθμονόμησης των ηλικιών του άνθρακα-14. Στον ένα άξονα οι ηλικίες σε έτη άνθρακα-14 και στον άλλο άξονα οι ημερολογιακές ηλικίες

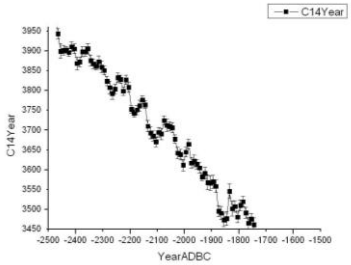
Διαδικασία Βαθμονόμησης

Στην παρούσα εργασία θα βαθμονομήσουμε τις ηλικίες ^{14}C δειγμάτων που προέρχονται από την ανασκαφή νεκροταφείου στο Ξεροπήγαδο Κοζάνης. Το νεκροταφείο εντοπίστηκε το 1987 από τον συντηρητή της Αρχαιολογικής Συλλογής της Κοζάνης, Δ. Πενογλίδη, με αφορμή τη διάνοιξη τάφρου για τον αρδευτικό αγωγό της Κοιλάδας. Ανασκάφηκαν 214 τάφοι της πρώιμης και μέσης εποχής του Χαλκού (Ζιώτα 2007, 24). Τα δείγματα χρονολογήθηκαν από το εργαστήριο Αρχαιομετρίας του ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ (Y. Maniatis, at all, 2011). Με χρήση του λογισμικού Origin μεγεθύνουμε τα αντίστοιχα σημεία της καμπύλης βαθμονόμησης (εικόνα 6) και αντιστοιχίζουμε στην ηλικία άνθρακα-14 του δείγματος την πραγματική ηλικία (εικόνα 7).



Εικόνα 6

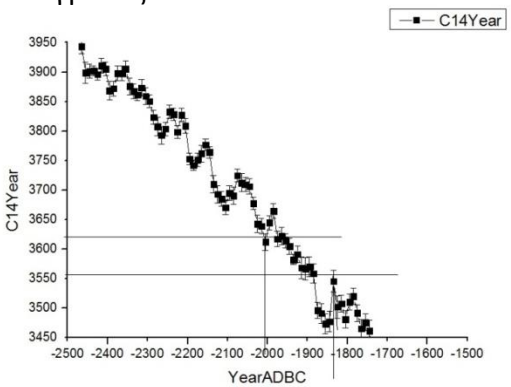
Μεγέθυνση της διεθνούς καμπύλης βαθμονόμησης.



Εικόνα 7

Εύρεση της πραγματικής ηλικίας του δείγματος με κωδικό DEM-714, που προέρχεται από τον τάφο Τ45 ενός άνδρα ηλικίας 28-32 ετών.

Παρατηρούμε ότι λόγω των σφαλμάτων στην χάραξη της καμπύλης βαθμονόμησης τα 3591 έτη ^{14}C αντιστοιχούν σε μια περιοχή ημερολογιακής ηλικίας από 2010 π.Χ. έως 1900 π.Χ. Αν λάβουμε υπόψη και τα πειραματικά σφάλματα στον προσδιορισμό της ηλικίας σε έτη ^{14}C, τότε, όπως φαίνεται και στην (εικόνα 8), διευρύνεται το εύρος στον προσδιορισμό της ημερολογιακής ηλικίας του συγκεκριμένου δείγματος.



Εικόνα 8

Εύρεση της πραγματικής ηλικίας του δείγματος με κωδικό DEM-714, που προέρχεται από τον τάφο T45 ενός άνδρα ηλικίας 28-32 ετών, λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά σφάλματα στον προσδιορισμό της ηλικίας του δείγματος σε έτη C-14.

Με αντίστοιχο τρόπο προσδιορίζουμε τις πραγματικές ηλικίες 5 δειγμάτων χωρίς τα πειραματικά σφάλματα (ΠΙΝΑΚΑΣ 1) και με τα Πειραματικά σφάλματα (ΠΙΝΑΚΑΣ 2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 (χωρίς τα πειραματικά σφάλματα του προσδιορισμού της ηλικία σε έτη ^{14}C)				
ΔΕΙΓΜΑ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΗΛΙΚΙΑ ΣΕ ΕΤΗ ^{14}C	ΗΛΙΚΙΑ ΣΕ ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΑΚΑ ΕΤΗ	ΧΡΟΝΙΚΟ ΕΥΡΟΣ
ΔΕΜ-713	Αριθμός τάφου:T45, Αριθμός	3588	2005-1915	90

	τάφρου:Θ33/Θ34, Άνδρας/28-32 ετών			
ΔΕΜ-714	Αριθμός τάφου:Τ70, Αριθμός τάφρου:Θ38/Ι38, Άνδρας/30-40 ετών	3591	2010-1910	100
ΔΕΜ-785	Αριθμός τάφου:Τ8, Αριθμός τάφρου:130, Γυναίκα (Αβέβαιο)	3910	2460-2350	110
ΔΕΜ-786	Αριθμός τάφου:ΤΛ2, Τάφρος:ΙΔ30, Γυναίκα/24-32 ετών	3823	2290-2210	80
ΔΕΜ-810	Αριθμός τάφου:ΤΛ42, Αριθμός τάφρου:Θ33/Θ34, Άνδρας/20-30 ετών	3920	2460-2350	110

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 (με τα πειραματικά σφάλματα του προσδιορισμού της ηλικία σε έτη ^{14}C)				
ΔΕΙΓΜΑ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΗΛΙΚΙΑ ΣΕ ΕΤΗ ^{14}C	ΗΛΙΚΙΑ ΣΕ ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΑΚΑ ΕΤΗ	ΧΡΟΝΙΚΟ ΕΥΡΟΣ
ΔΕΜ-713	Αριθμός τάφου:Τ45, Αριθμός	3588 (±33)	2010-1890	120

	τάφρου:Θ33/Θ34, Άνδρας/28-32 ετών			
ΔΕΜ-714	Αριθμός τάφου:Τ70, Αριθμός τάφρου:Θ38/Ι38, Άνδρας/30-40 ετών	3591 (±33)	2010-1850	160
ΔΕΜ-785	Αριθμός τάφου:Τ8, Αριθμός τάφρου:Ι30, Γυναίκα (Αβέβαιο)	3910 (±33)	2470-2320	150
ΔΕΜ-786	Αριθμός τάφου:ΤΛ2, Τάφρος:ΙΔ30, Γυναίκα/24-32 ετών	3823 (±33)	2390-2210	180
ΔΕΜ-810	Αριθμός τάφου:ΤΛ42, Αριθμός τάφρου:Θ33/Θ34, Άνδρας/20-30 ετών	3920 (±33)	2470-2320	150

Συγκρίνοντας τις ημερολογιακές ηλικίες των δειγμάτων βλέπουμε ότι αυτοί ανήκουν στη χρονική περίοδο από 2460 π.Χ. έως 1910 π.Χ., ή αν λάβουμε υπόψη και τα σφάλματα στον προσδιορισμό της ηλικίας σε ^{14}C από 1470 π.Χ. έως 1850 π.Χ. γεγονός που δείχνει ότι το νεκροταφείο χρησιμοποιούνταν για σχετικά μεγάλη χρονική περίοδο. Επίσης συγκρίνοντας την τελευταία στήλη των πινάκων 1 και 2 παρατηρούμε ότι τα πειραματικά σφάλματα διευρύνουν

το χρονικό _____ εύρος. Για ακριβέστερη βαθμονόμηση γίνεται χρήση κατάλληλου λογισμικού (π.χ. *http://radiocarbon.pa.qub.ac.uk/calib*).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε, αρχικά, το Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» κι ειδικότερα τον Δρ. Γιάννη Μανιάτη, υπεύθυνος του εργαστηρίου χρονολόγησης Άνθρακα-14 για τις πληροφορίες και τη βοήθεια που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστούμε ιδιαίτερα την καθηγήτριά μας, Δρ. Λαμπρινή Παπατσίμπα για την βοήθεια και την στήριξη που μας προσέφερε.

Τέλος, ευχαριστούμε και τους συμμαθητές μας στον όμιλο φυσικής του ΠΣΠΑ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] M. J. Aitken, (1999), Archaeological dating using physical phenomena, Rep. Prog. Phys. 62 (1999) 1333–1376. Printed in the U.K..

[2] Μανιάτης Ιωάννης, (2012), https://proistoria.files.wordpress.com/012/08/ maniatis_c14_txt

Καρακατσάνης Π., Μεταπτυχιακή εργασία: «Επισκόπηση της μεθόδου χρονολόγησης με ^{14}C», ΑΠΘ, 2016

[3] Y. Maniatis, Ch. Ziota (2011), SYSTEMATIC 14C DATING OF A UNIQUE EARLY AND MIDDLE BRONZE AGE CEMETERY AT XEROPIGADO KOILADAS, WEST MACEDONIA, GREECE, RADIOCARBON, Vol 53, Nr 3, 2011, p 461–478

https://home.cern/about/physics/cosmic-rays-particles-outer-space

http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cosmic.html

http://www.physics4u.gr/news/2001/scnews251.html

http://www.econews.gr/2012/08/30/dentra-klimatiki-allagi/