



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΕΛΕΝΗ
ΑΕΜ 5970

Βιοορυκτολογία και Βιοορυκτά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023





ΕΛΕΝΗ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

Η Βιοορυκτολογία και τα Βιοορυκτά

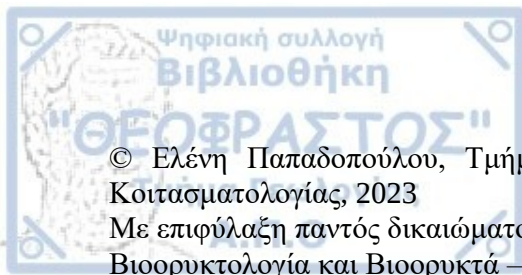
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Λαμπρινή Παπαδοπούλου, Καθηγήτρια

© Ελένη Παπαδοπούλου, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



© Ελένη Παπαδοπούλου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Βιοορυκτολογία και Βιοορυκτά – Διπλωματική Εργασία

© Eleni Papadopoulou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2023
All rights reserved.
Biomineralogy and Biominerals– *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Βιοορυκτά μαγγανίου (Todorokite, Romanechite, Birnessite), Χαλκός



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1.1 Γενικές Πληροφορίες.....	4
1.2 Δομή των Βιοορυκτών.....	7
2. ΤΑ ΒΙΟ ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ.....	8
2.1 Παραδείγματα Βιοορυκτών.....	8
2.2 Βιοορυκτοποίηση.....	13
2.3 Ιδιότητες Βιοορυκτών.....	17
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΒΙΟ ΟΡΥΚΤΩΝ.....	19
3.1 Κοινές χρήσεις των Βιοορυκτών.....	19
3.2 Χρήση Βιοορυκτών μέσα στο γεωλογικό χρόνο.....	20
3.3 Βιομιμητική.....	23
3.4 Βιοορυκτά στη βιομηχανία.....	25
3.4.1 Τσιμέντο.....	25
3.5 Οικολογία και Βιοορυκτά.....	28
3.5.1 Ωκεανός.....	28
3.5.2 Ατμόσφαιρα.....	30
3.5.3 Ανακύκλωση.....	32
4. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΒΙΟ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ.....	34
4.1 Εμπόριο των Βιοορυκτών.....	35
5. ΒΙΟΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΣ.....	37
5.2 Τα Ουσιώδη Βιοορυκτά.....	38
5.3 Τα Παθολογικά Βιοορυκτά.....	42
6. ΒΙΟΟΡΥΚΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ.....	46
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Βιοορυκτολογία και τα Βιοορυκτά

Ελένη Παπαδοπούλου

Η βιοορυκτολογία ορίζεται ως ένας κλάδος της γεωλογίας που εξειδικεύεται στη μελέτη των βιοορυκτών και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο ορυκτά και πηγές που προσομοιάζουν με ορυκτά αλληλοεπιδρούν με τα βιολογικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ζωικών και φυτικών οργανισμών. Τα βιοορυκτά σχηματίζονται από ζωντανούς οργανισμούς ή παράγονται από τα κατάλοιπα των οργανισμών που έχουν πεθάνει και έχουν αποβληθεί στο περιβάλλον. Παίζουν σημαντικό ρόλο σε διάφορες φυσιολογικές διεργασίες. Αυτά τα ορυκτά είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη, την εξέλιξη και τη συντήρηση των ζωντανών οργανισμών. Μερικά παραδείγματα βιοορυκτών περιλαμβάνουν το ανθρακικό ασβέστιο και τον υδροξυαπατίτη. Άλλα βιοορυκτά, όπως τα οξείδια του σιδήρου και του μαγγανίου, συμβάλλουν στον σχηματισμό του εδάφους και στον κύκλο των θρεπτικών ουσιών στα οικοσυστήματα. Επιπλέον, τα βιοορυκτά είναι ζωτικής σημασίας για την ανθρώπινη υγεία. Τα βιοορυκτά έχουν πολλές εφαρμογές στην ιατρική, τη βιομηχανία και την επιστήμη των υλικών. Τα βιοορυκτά είναι κρίσιμα για τη λειτουργία των ζωντανών οργανισμών και έχουν σημαντικές εφαρμογές σε τομείς όπως η περιβαλλοντική αποκατάσταση και οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η κατανόηση του σχηματισμού, των ιδιοτήτων και της λειτουργίας των βιοορυκτών μπορεί να δημιουργήσει νέες ιδέες και καινοτομίες σε αυτούς τους τομείς.



ABSTRACT

Biomineralogy and Biominerals

Eleni Papadopoulou

Biomineralogy is defined as a branch of geology that specializes in the study of biominerals and examines how minerals and mineral-like resources interact with biological systems, including animal and plant organisms. Biominerals are formed by living organisms or produced from the remains of organisms that have died and been released into the environment. They play a significant role in various physiological processes. These minerals are essential for the growth, development and maintenance of living organisms. Some examples of bio minerals include calcium carbonate and hydroxyapatite. Other biominerals, such as iron and manganese oxides, contribute to soil formation and nutrient cycling in ecosystems. In addition, biominerals are vital to human health. Biominerals have many applications in medicine, industry and materials science. Biominerals are critical to the functioning of living organisms and have important applications in fields such as environmental remediation, and renewable energy technologies. Understanding the formation, properties and function of biominerals can generate new insights and innovations in these fields.



Η συγκεκριμένη βιβλιογραφική μελέτη πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος της Διπλωματικής Εργασίας του Η' Εξαμήνου στη Γεωλογική Σχολή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Επικεντρώνεται στην ευρύτερη μελέτη των βιοορυκτών-βιοορυκτολογίας, με απώτερο σκοπό την ανακάλυψη καινοτόμων χρήσεων αυτών των βιοορυκτών προς όφελος όλου του πλανήτη.

Αρχικά νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπων καθηγήτρια μου, Παπαδοπούλου Λαμπρινή, για την συνολική συμβολή της τόσο στην επιλογή του θέματος της εργασίας, όσο και στην συνεχή παροχή συμβουλών, γνώσεων και χρόνου που μου προσέφερε. Ακόμη, θέλω να εκφράσω μεγάλη ευγνωμοσύνη στον επόπτη και προϊστάμενο της πρακτικής μου άσκησης, Βασίλη Στρουγγάρη, καθώς η εκπόνηση της εργασίας έγινε παράλληλα με την πρακτική στην Α.Ε Τσιμέντων TITAN. Οι πολύτιμες συμβουλές, η αμέριστη βοήθεια του και η έμπνευση που μου παρείχε λειτούργησαν παραγωγικά για την πορεία της εργασίας μου και ευεργετικά για την δική μου προσωπική εξέλιξη. Ευχαριστώ ειλικρινά την οικογένεια και φίλους μου για την υπομονή και την υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα στην εταιρία TITAN, τους επιστήμονες στο χημείο, τους ανθρώπους της παραγωγής, τους μηχανικούς και γενικά όλη την εταιρεία και το προσωπικό της, καθώς όλοι συνέβαλαν με εξοπλισμό, εφόδια και διάθεση ώστε να έρθει αυτή η εργασία εις πέρας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικές Πληροφορίες

Τα βιοορυκτά είναι ορυκτά τα οποία παράγονται με βιολογικές διεργασίες και παίζουν σημαντικό ρόλο σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της γεωλογίας, της οικολογίας, της ιατρικής και της επιστήμης των υλικών. Αυτά τα ορυκτά βρίσκονται σε ποικίλα περιβάλλοντα και σχηματίζονται από ζώντες οργανισμούς μέσω πολύπλοκης βιοορυκτοποίησης που μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες.

1. Τα βιοορυκτά έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά , όπως υψηλή αντοχή και σκληρότητα, καθιστώντας τα ,ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές επιστήμης υλικών. Η πρόοδος στην έρευνα για τα βιοορυκτά έχει οδηγήσει σε ανακαλύψεις και καινοτομίες σε πεδία όπως τα βιοϋλικά, η βιοϊατρική μηχανική και η περιβαλλοντική αποκατάσταση.(Williams, 1987 Στεργίου, Γ. Ν. (2012). Σύνθεση κόνεως υδροξυαπατίτη παρουσία του βιοπολυμερούς χιτοζάνη και αμινοξέων (Bachelor's thesis). Ως εκ τούτου, η μελέτη των βιοορυκτών είναι απαραίτητη για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ζωντανών οργανισμών και του περιβάλλοντος τους, καθώς και για την ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών με πιθανές εφαρμογές σε πολλαπλούς τομείς.

Συναντώνται σε ένα φάσμα βιολογικών συστημάτων. Μπορούν να βρεθούν σε διάφορα φυσικά περιβάλλοντα, όπως σε εδάφη, πετρώματα, ιζήματα και υδάτινα σώματα. Από τους σκελετούς των θηλαστικών έως τα κελύφη των θαλάσσιων ασπόνδυλων. Η αλληλεπίδραση οργανικών και ανόργανων συστατικών τους προσφέρει μια αξιοσημείωτη γκάμα ιδιοτήτων που τα καθιστούν χρήσιμα για μια ποικιλία εφαρμογών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις, η συλλογή βιοορυκτών μπορεί να είναι περιορισμένη ή να απαιτεί άδειες από τις τοπικές αρχές.

Βιοορυκτολογία είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο οι ζωντανοί οργανισμοί χρησιμοποιούν αυτά τα συστατικά. Είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που συνδυάζει πτυχές της βιολογίας, της χημείας, της γεωλογίας και της επιστήμης των υλικών.

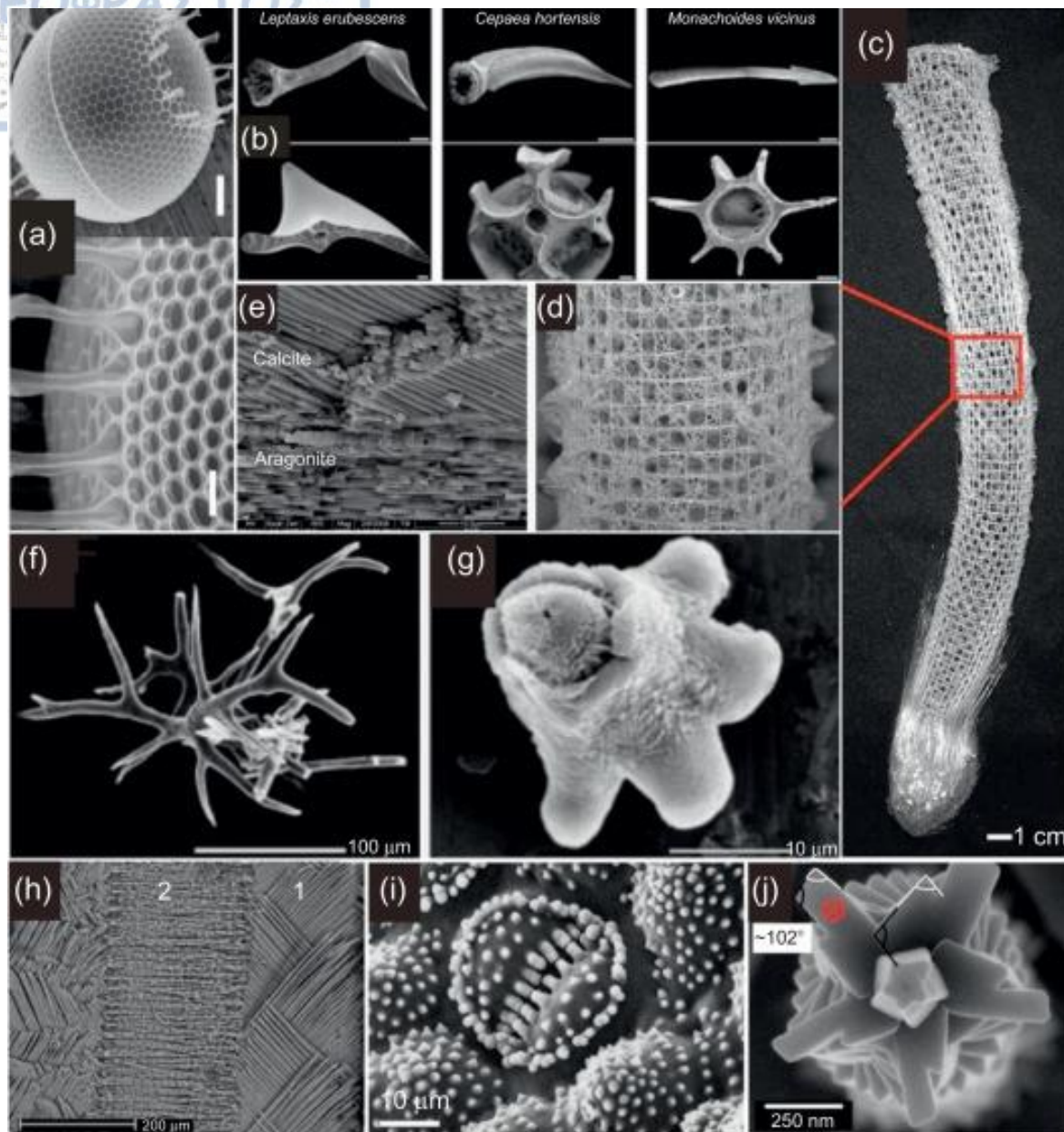


Παρέχει στους οργανισμούς σκελετούς και κοχύλια όσο είναι ζωντανά, και όταν πεθάνουν εναποτίθενται ως ίζημα μέσα σε περιβάλλοντα όπως τις πεδιάδες των ποταμών έως τον βυθό του ωκεανού.

Είναι επίσης αυτά τα σκληρά, ανθεκτικά προϊόντα της ζωής που ευθύνονται κυρίως για τα απολιθώματα της Γης.

Η μελέτη της βιοορυκτολογίας περιλαμβάνει τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι οργανισμοί παράγουν βιοορυκτά, ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τις ιδιότητες των βιοορυκτών και πώς τα βιοορυκτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές.

Η βιοορυκτολογία έχει σημαντικές επιπτώσεις για την κατανόηση της εξέλιξης της ζωής στη Γη, καθώς και για την ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών εμπνευσμένων από βιολογικά συστήματα.



Εικ.1 Συνθετική και δομική ποικιλομορφία σε διαφορετικές κλίμακες μήκους που απεικονίζονται από: (α) το σχηματοποιημένο πυριτικό κυτταρικό τοίχωμα ενός διατόμου *Stephanopyxis turris*, (β) ασβεστολιθικά βελάκια αγάπης σε ορισμένα είδη χερσαίων σαλιγκαριών, (γ και δ) πυριτικό κυλινδρικό σκελετικό πλέγμα *Euplectella aspergillum* με σειρές κατακόρυφων, οριζόντιων και διαγώνιων δοκών, (ε) οπίσθια διάσπαρτη εικόνα ηλεκτρονίων του σπασμένου κελύφους των δίθυρων πρισμάτων ασβεστίτη *Mytilus edulis* και αραγωνίτη (Copyright 2008 American Chemical Society), (f και g) άμορφα στοιχεία από την *Pyura pachydermatina*, (η) διασταυρούμενες στοιβάδες στο κέλυφος του γαστερόποδου *Strombus decorus persicus*, (i) στομάχια της κυτταρικής επιφάνειας διακοσμημένα με δομές οξειδίου του πυριτίου στην κοινή αλογοουρά (*Equisetum arvensis*) και (ι) άκρη της σπονδυλικής στήλης από το coccolith *Rhabdosphaera clavigera* (Copyright 2014 American Chemical Society).

1.2 Δομή των Βιοορυκτών

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των βιοορυκτών είναι η δομή τους. Τα βιοορυκτά αποτελούνται από μια ποικιλία ορυκτών φάσεων, συμπεριλαμβανομένου του ανθρακικού ασβεστίου, του φωσφορικού ασβεστίου και του πυριτίου. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό των βιοορυκτών είναι ότι πολλά είναι στην πραγματικότητα συνθέσεις ή συσσωματώσεις κρυστάλλων που χωρίζονται από οργανικό υλικό. (Παλαιολόγου, 2017)

Σε πολλούς οργανισμούς υπάρχουν ως μικρά σώματα κατανεμημένα μέσα σε ένα πολύπλοκο πλαίσιο μακρομοριακών, όπως το κολλαγόνο. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο είναι διατεταγμένα αυτά τα ορυκτά είναι συχνά πολύ διαφορετικός από τον τρόπο με τον οποίο βρίσκονται σε μη βιολογικά συστήματα. Για παράδειγμα, τα κελύφη των μαλακίων αποτελούνται από στρώματα κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου που είναι διατεταγμένα με πολύ συγκεκριμένο τρόπο, δημιουργώντας μια δομή που είναι ταυτόχρονα δυνατή και ελαφριά. (Ροκίδη, 2011).

Η μοναδική δομή των βιοορυκτών είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ οργανικών και ανόργανων συστατικών. (Skinner, 2005). Οι ζωντανοί οργανισμοί παράγουν πρωτεΐνες και άλλα οργανικά μόρια που ελέγχουν το σχηματισμό και την ανάπτυξη της ορυκτής φάσης. Αυτά τα οργανικά μόρια λειτουργούν ως πρότυπα, κατευθύνοντας τον σχηματισμό των ορυκτών κρυστάλλων και ελέγχοντας τον προσανατολισμό και το μέγεθός τους. Το αποτέλεσμα είναι μια εξαιρετικά οργανωμένη δομή που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του οργανισμού. (Χήνης, 2020)

2. ΤΑ ΒΙΟΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

2.1 Παραδείγματα Βιοορυκτών

Μερικά από τα πιο κοινά και σημαντικά **βιοορυκτά** περιλαμβάνουν:

1. **Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3):** Αυτό είναι το πιο άφθονο βιοορυκτό και παράγεται από διάφορους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των κοραλλιών, των μαλακίων (όπως τα μύδια και τα σαλιγκάρια) και μερικά φύκια. Το ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να σχηματίσει ποικίλες κρυσταλλικές δομές, συμπεριλαμβανομένου του ασβεστίτη, του αραγωνίτη και του βατερίτη, ανάλογα με τον οργανισμό που το παράγει. (Γκέκα-Σερπετσιδάκη, 2016). Τα μεταλλικά στοιχεία που περιέχουν ασβέστιο αποτελούν περίπου το 50% των γνωστών βιοορυκτών. Εύλογο γεγονός καθώς το ασβέστιο πληροί πολλές θεμελιώδεις λειτουργίες του κυτταρικού μεταβολισμού. Αυτή η κυριαρχία των ορυκτών που περιέχουν ασβέστιο είναι που οδήγησε στην ευρεία χρήση του όρου ασβεστοποίηση. Από τα οκτώ γνωστά πολύμορφα του ασβεστίου ανθρακικό, τα επτά είναι κρυσταλλικά και το ένα είναι άμορφο. (Wang, 2012).
2. **Πυρίτιο (SiO_2):** Το πυρίτιο παράγεται από πολλούς οργανισμούς, ιδιαίτερα από διάτομα (ένας τύπος φυκών), σφουγγάρια και από έναν τύπο ζωοπλαγκτόν. Το πυρίτιο μπορεί να σχηματίσει διαφορετικές δομές, όπως άμορφο πυρίτιο, οπάλιο και χαλαζία, ανάλογα με τον οργανισμό που το παράγει.
3. **Υδροξυαπατίτης [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$]:** Αυτό είναι ένα βιοορυκτό που αποτελείται από ασβέστιο, φώσφορο και οξυγόνο που βρίσκεται στα οστά, στα δόντια και σε ορισμένα κελύφη. Είναι ο κύριος παράγοντας σκλήρυνσης αυτών των βιολογικών ιστών και λόγω της διακριτικής του κρυσταλλικής δομής, δρα σαν αποθήκη πολλών φυσικά εμφανιζόμενων στοιχείων. Παράγεται από σπονδυλωτά και ορισμένα ασπόνδυλα, όπως τα σπονδυλόζωα (Στεργίου, 2012).
4. **Μαγνητίτης (Fe_3O_4):** Ο μαγνητίτης είναι ένα βιοορυκτό που παράγεται από μαγνητοτακτικά βακτήρια, τα οποία τον χρησιμοποιούν για την πλοήγηση κατά μήκος

των γραμμών του μαγνητικού πεδίου (λόγω των μαγνητικών κρυστάλλων που διαθέτουν, των μαγνητοσωμάτων).(Αγιώτης, 2016).

5. **Σουλφίδια (π.χ. πυρίτης):** Πρόκειται για μέταλλα που παράγονται από βακτήρια που μειώνουν τα θειικά σε αναερόβια περιβάλλοντα. Είναι σημαντικά για την ανακύκλωση του θείου στα οικοσυστήματα και μπορούν επίσης να παίζουν ρόλο στο σχηματισμό κοιτασμάτων μεταλλεύματος.(Alden, 2019).
6. **Αραγωνίτης:** βρίσκεται σε μερικά κελύφη μαλακίων.
7. **Φωσφορικό ασβέστιο :**βρίσκεται στους εξωσκελετούς ορισμένων αρθροπόδων. Τα περισσότερα φωσφορικά ορυκτά παράγονται με ελεγχόμενη ανοργανοποίηση.
8. **Στρουβίτης :**βρίσκεται στα δόντια ορισμένων ψαριών. Στο πλαίσιο της ανθρώπινης υγείας, ο στρουβίτης μπορεί να σχηματίσει πέτρες στα νεφρά, οι οποίες μπορεί να είναι αρκετά επώδυνες και μπορεί να απαιτούν ιατρική παρέμβαση για θεραπεία.(Κοφινά,2006).

Αυτά είναι μόνο μερικά παραδείγματα των πολλών τύπων βιοορυκτών που παράγονται από ζωντανούς οργανισμούς. Η σύνθεση και η δομή των βιοορυκτών μπορεί να ποικίλλει, καθώς εξαρτάται από τον οργανισμό που τα παράγει και τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες σχηματίζονται.



1. Ανθρακικό ασβέστιο



2. Πυρίτιο



3. Υδροξυαπατίτης



4. Μαγνητίτης



5. Σουλφίδιο



6. Αραγωνίτης



7. Φωσφορικό Ασβέστιο



8. Στρουβίτης



Εικ. 1.1.1 (κοράλλια)



Εικ. 1.1.2 Μορφές ανθρακικού ασβεστίου σε θαλάσσιους οργανισμούς
(σφουγγάρι)

Ο σχηματισμός βιοορυκτών, τα οποία είναι ορυκτές δομές που παράγονται από ζωντανούς οργανισμούς, μπορεί να αναχθεί στην εμφάνιση της ζωής στη Γη. Οι πρώτες ενδείξεις βιοορυκτοποίησης προέρχονται από απολιθώματα μικροβιακών κοινοτήτων που χρονολογούνται πριν από τουλάχιστον 3,5 δισεκατομμύρια χρόνια.

Με την πάροδο του χρόνου, η βιοορυκτοποίηση έγινε πιο περίπλοκη, με τους οργανισμούς να εξελίσσουν την ικανότητα να παράγουν μια μεγάλη ποικιλία ορυκτών δομών για διάφορους σκοπούς.

Η βιοορυκτοποίηση έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ζωής. Η ικανότητα δημιουργίας σκληρών ορυκτών δομών επέτρεψε στους οργανισμούς να προστατεύονται από τα αρπακτικά και τις περιβαλλοντικές απειλές και επίσης συνέβαλε στην ανάπτυξη πιο περίπλοκων σχεδίων σώματος. Τα βιοορυκτά είχαν επίσης σημαντικές επιπτώσεις στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα, με το σχηματισμό κελυφών και σκελετών από ανθρακικό ασβέστιο που **βοηθούν στην απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα** από την ατμόσφαιρα και στην αποθήκευση του στον ωκεανό.(Maradshi, 2015).

Οι φάσεις της βιοορυκτοποίησης περιλαμβάνουν:

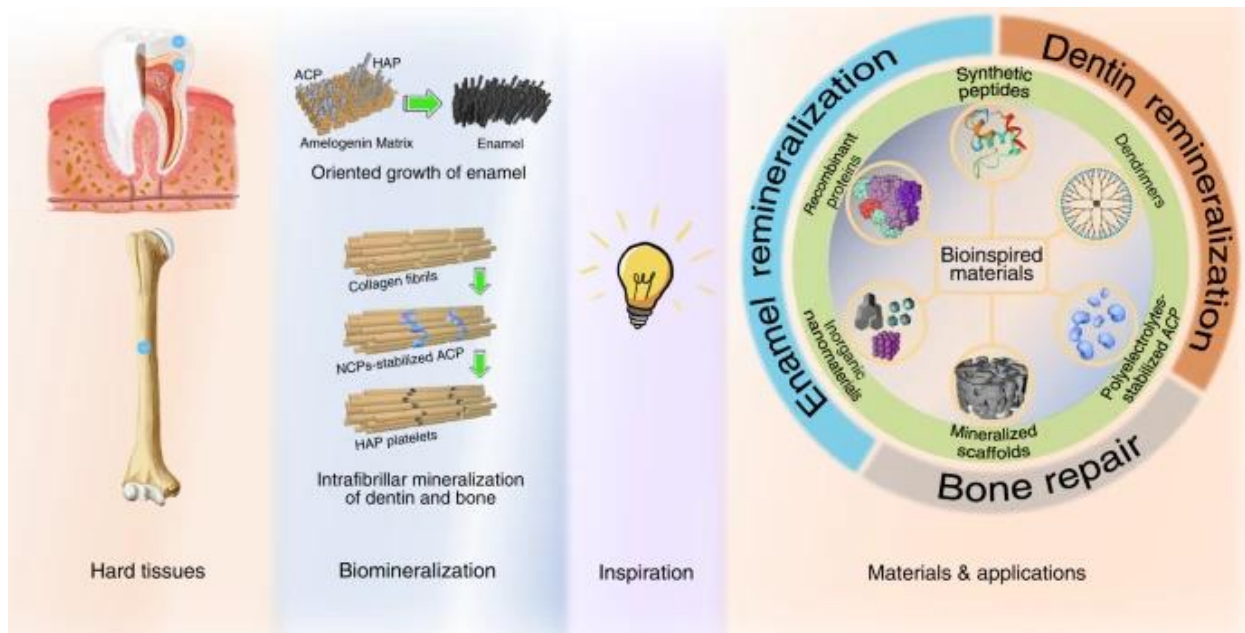
- ✓ Πυρήνωση: Αυτή είναι η αρχική φάση της βιοορυκτοποίησης, όπου μικρές ομάδες ατόμων ενώνονται για να σχηματίσουν έναν πυρήνα. Ο σχηματισμός του πυρήνα συνήθως διευκολύνεται από οργανικά μόρια που παράγονται από τον οργανισμό.(Robbins & Konhauser, 2021).
- ✓ Ανάπτυξη: Αφού σχηματιστεί ο πυρήνας, το ορυκτό μεγαλώνει προσθέτοντας περισσότερα άτομα ή ιόντα στην επιφάνεια του πυρήνα. Ο ρυθμός ανάπτυξης του

ορυκτού καθορίζεται από τη συγκέντρωση ιόντων στο περιβάλλον υγρό, το pH του διαλύματος και τα οργανικά μόρια που παράγονται από τον οργανισμό.

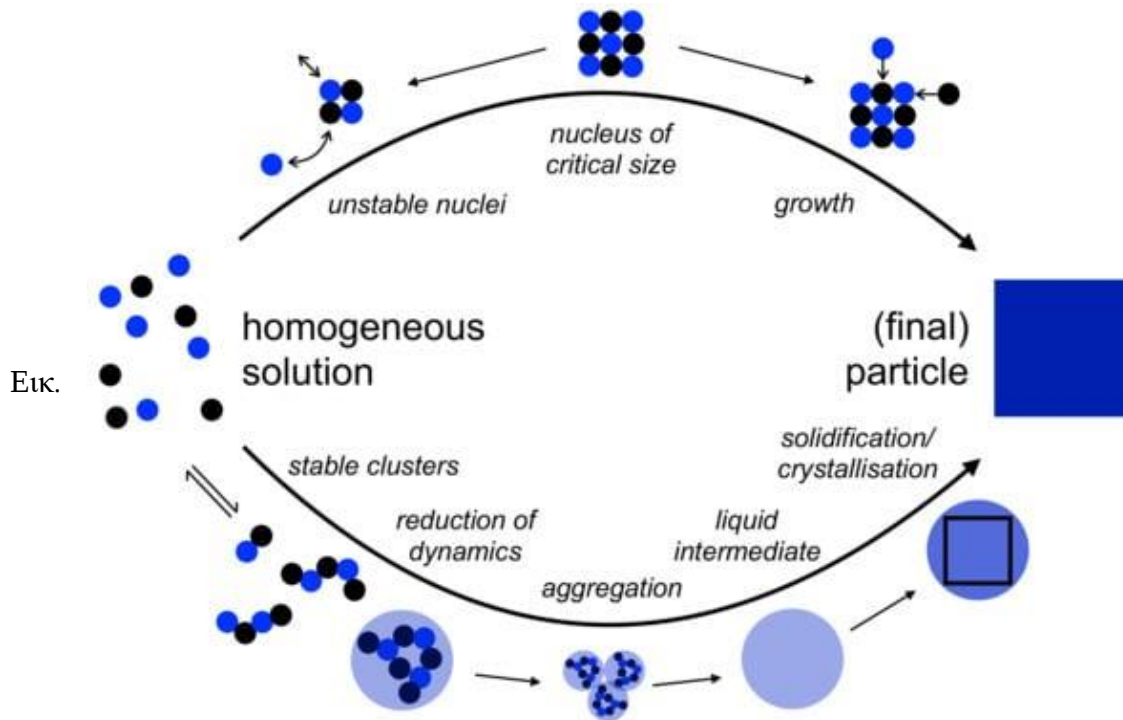
- ✓ Αναδιαμόρφωση: Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι βιοορυκτοποιημένες δομές ενδέχεται να υποστούν αναδιαμόρφωση, κατά την οποία διασπώνται και ανακατασκευάζονται. Αυτό μπορεί να συμβεί κατά την ανάπτυξη ή ως απόκριση σε αλλαγές στο περιβάλλον.
- ✓ Κρυσταλλικός προσανατολισμός: Ο προσανατολισμός του κρυσταλλικού πλέγματος μπορεί να επηρεαστεί από τα οργανικά μόρια, τα οποία παράγονται από τον ίδιο τον οργανισμό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές κρυσταλλικές δομές ή σχήματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς από τον οργανισμό.
- ✓ Βιοοργανική δομή: Η τελική δομή του βιοορυκτού καθορίζεται από τον συνδυασμό του προσανατολισμού των κρυστάλλων, του σχήματος των κρυστάλλων και των οργανικών μορίων. Η δομή βιοορυκτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ποικιλία λειτουργιών, όπως δομική υποστήριξη, προστασία ή ως εργαλείο τροφοδοσίας ή κίνησης.
- ✓ Έλεγχος βιοορυκτοποίησης: Ο έλεγχος της βιοορυκτοποίησης προσδιορίζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των γενετικών, του περιβάλλοντος και της συμπεριφοράς του οργανισμού. Ορισμένοι οργανισμοί μπορούν να ελέγξουν τον σχηματισμό βιοορυκτών με αξιοσημείωτη ακρίβεια, επιτρέποντάς τους να δημιουργήσουν πολύπλοκες δομές με μοναδικές ιδιότητες, όπως η διευκόλυνση της κίνησης, η προστασία από τα θηράματα και η βοήθεια στην πέψη. (V Sharma, A Srinivasan, F Nikolajeff, S Kumar, 2021)

Οι ερευνητές ενδιαφέρονται να κατανοήσουν τους μηχανισμούς πίσω από τη βιοορυκτοποίηση προκειμένου να αναπτύξουν νέα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες και να

αναπτύξουν νέες ιατρικές θεραπείες για καταστάσεις όπως η οστεοπόρωση και η οδοντική τερηδόνα.



Εικ. 1.2 Σχηματική απεικόνιση υλικών εμπνευσμένων από βιοορυκτοποίηση για επισκευή σκληρού ιστού. Οι διαδικασίες και οι μηχανισμοί σχηματισμού των ανθρώπινων σκληρών ιστών, συμπεριλαμβανομένων των οστών και των δοντιών, έχουν εμπνεύσει τον σχεδιασμό και την κατασκευή διαφόρων υλικών για την επιδιόρθωση σκληρών ιστών. Tang, S., Dong, Z., Ke, X. *et al.*



Εικ.1.3 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού πυρήνωσης σύμφωνα με την κλασική θεωρία πυρήνων (CNT, επάνω) και την οδό προπυρηνοποίησης συστάδας (PNC) (κάτω). Για διαφορετικά πολύμορφα ή μορφές, η προσβασιμότητα εξαρτάται από το επίπεδο υπερκορεσμού. Τα μεγέθη των διαφόρων ειδών είναι ειδικά για το σύστημα και δεν μπορούν να γενικευθούν πλήρως. το κρίσιμο μέγεθος (πάνω, μεσαίο) για ρεαλιστικά επίπεδα υπερκορεσμού είναι συνήθως μέσα σε δεκάδες ιόντα, δηλαδή μικρότερο από περίπου 3-4 nm σε διάμετρο [17]. Τα PNC είναι παρόμοια σε μέγεθος, αλλά θερμοδυναμικά σταθερά, και επομένως σημαντικά πιο άφθονα από τους κλασικούς (προ-) κρίσιμους πυρήνες. Τα μικρότερα μεγέθη νανο-σταγονιδίων διαχωρισμένων φάσεων, τα οποία αναδύονται απευθείας από τους πρόδρομους PNC, βρίσκονται επομένως επίσης στο καθεστώς κατώτερου νανομέτρου. Κατά τη συσσώρευση και τη συνένωση, μπορούν να σχηματιστούν πυκνά σταγονίδια υγρού με μεγέθη έως και αρκετές εκατοντάδες νανόμετρα [18]. Κατά συνέπεια, ανάλογα με την κινητική της συσσωμάτωσης και της αφυδάτωσης, η οποία μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την παρουσία πρόσθετων (βλ. παρακάτω), το μέγεθος των στερεών άμορφων ενδιάμεσων μπορεί να κυμαίνεται από περίπου. Μέγεθος 20 nm έως εκατοντάδες μικρόμετρα [19]. Department of Chemistry, Physical Chemistry, University of Konstanz, 784

2.3 Ιδιότητες Βιοορυκτών

Οι ιδιότητες των βιοορυκτών ποικίλλουν σημαντικά. Για παράδειγμα, τα δόντια των θηλαστικών αποτελούνται από υδροξυαπατίτη, ένα ορυκτό που είναι και σκληρό και ανθεκτικό στη φθορά. Αντίθετα, τα κελύφη ορισμένων μαλακίων αποτελούνται από αραγωνίτη, μια μορφή ανθρακικού ασβεστίου που είναι πιο διαλυτή από άλλες μορφές του ορυκτού. Αυτό επιτρέπει στον οργανισμό να ρυθμίζει την ανάπτυξη και τη διάλυση του κελύφους του ως αντίδραση στις αλλαγές του περιβάλλοντός του.

Η γεωχημεία των βιοορυκτών αναφέρεται στη μελέτη της χημικής σύστασης και δομής αυτών των ορυκτών και πώς επηρεάζονται από τις βιολογικές διεργασίες που τα δημιουργούν.

Η γεωχημεία των βιοορυκτών μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη βιολογία και την οικολογία των οργανισμών που τα παράγουν, καθώς και πληροφορίες για το περιβάλλον στο οποίο ζούσαν. Για παράδειγμα, η ισοτοπική σύνθεση ουσιών όπως τα δόντια ή τα οστά μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη διατροφή και το περιβάλλον του οργανισμού, καθώς και τη θερμοκρασία και τη χημεία του νερού του περιβάλλοντος. (White, 2020).

Η μελέτη της γεωχημείας τους είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που συνδυάζει τεχνικές από τις προαναφερόμενες επιστήμες :γεωλογία, τη βιολογία, τη χημεία και την επιστήμη των υλικών. Μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη βιοορυκτών περιλαμβάνουν ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, περίθλαση ακτίνων Χ και ισοτοπική ανάλυση. Μελετώντας τις χημικές και φυσικές ιδιότητες των βιοορυκτών, οι ερευνητές μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τις διαδικασίες που τα δημιουργούν, καθώς και το οικολογικό και εξελικτικό πλαίσιο στο οποίο εξελίχθηκαν. (Skinner ,2003).

Αυτό το εξελικτικό πλαίσιο σχετίζεται άμεσα και έμμεσα με την εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη.

Η εξέλιξη των βιοορυκτών οφείλεται επίσης στις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στη χημεία των ωκεανών με την πάροδο του χρόνου οδήγησαν στην εξέλιξη διαφορετικών τύπων βιοορυκτών σε θαλάσσιους οργανισμούς, καθώς προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες όπως οι διακυμάνσεις του pH ή της θερμοκρασίας. Ομοίως, η εξέλιξη των βιοορυκτών δομών σε επίγειους οργανισμούς έχει επηρεαστεί από παράγοντες όπως η ανάγκη προστασίας από τα αρπακτικά ή η ανάγκη προσαρμογής σε νέους τρόπους κίνησης.

Συνολικά, ο ρόλος των βιοορυκτών στη δομική εξέλιξη οφείλεται στην αλληλεπίδραση βιολογικών διεργασιών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Η ικανότητα των ζωντανών οργανισμών να δημιουργούν και να ελέγχουν πολύπλοκες ορυκτές δομές τους, τους επέτρεψε να προσαρμοστούν σε πολυάριθμες οικολογικές θέσεις και να εκτελούν μια ποικιλία λειτουργιών αναγκαίων για την επιβίωσή τους. Έτσι, η μελέτη των βιοορυκτών παρέχει σημαντικές γνώσεις σχετικά με τους μηχανισμούς της δομικής εξέλιξης και την εξέλιξη της ζωής στη Γη.

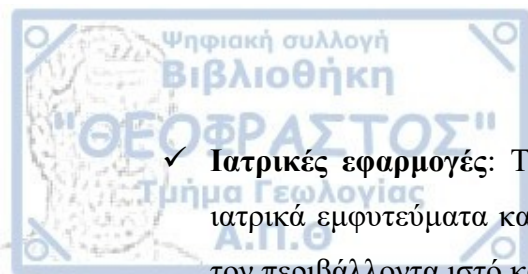


Download from
Dreamstime.com
This watermark-free sample image is for previewing purposes only.

23547318
Ken Backer | Dreamstime.com

Εικ.1.3 Brontotherium στενά χορτοφάγων ιστορικά απομονωμένα σχετικά δόντια θηλαστικών γνάθων μεγάλα προ επάνω σε άσπρο.

([boniface](#))



- ✓ **Ιατρικές εφαρμογές:** Τα βιοορυκτά όπως ο υδροξυαπατίτης χρησιμοποιούνται σε ιατρικά εμφυτεύματα και οστικά μοσχεύματα επειδή μπορούν να ενσωματωθούν με τον περιβάλλοντα ιστό και να προάγουν την ανάπτυξη των οστών. (Λαγοπάτη, 2018).

- ✓ **Παραγωγή Ενέργειας:** Τα βιοορυκτά, όπως ο μαγνητίτης, χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. (Τσαούση, 2010).

Δηλαδή, τα βιοορυκτά χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερους τομείς. Η εκμετάλλευση των βιοορυκτών δύναται να φέρει επανάσταση σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών και να συμβάλει στην ανάπτυξη νέων και καινοτόμων τεχνολογιών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι αυτά τα ορυκτά εξορύσσονται και χρησιμοποιούνται με βιώσιμο και υπεύθυνο τρόπο.

3.2 Χρήση Βιοορυκτών μέσα στο γεωλογικό χρόνο

Έχει σημειωθεί από επιστήμονες της γης τα τελευταία 50 χρόνια ότι τα βιολογικά παραγόμενα ορυκτά περιέχουν συχνά ενσωματωμένα μέσα τους συνθέσεις, ‘υπογραφές’ που αντικατοπτρίζουν το εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο ζούσε το ζώο. Οι στρωματόλιθοι είναι ένα παράδειγμα του πώς τα βιοορυκτά μπορούν να αποκαλύψουν το παρελθόν της Γης. (Eisenstadt, 2021).

Επιπρόσθετα, η μελέτη των βιοορυκτών μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές συνθήκες του παρελθόντος και του παρόντος, καθώς η σύνθεση και η δομή των βιοορυκτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες παραγόντων όπως η θερμοκρασία, το pH και η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών. (Eisenstadt, 2021).

Η ισοτοπική σύνθεση των βιοορυκτών μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τις προηγούμενες θερμοκρασίες και τη χημεία των ωκεανών. Μια άλλη σημαντική ζωτική επίδραση της βιοορυκτοποίησης είναι η ικανότητα των οργανισμών να παράγουν ορυκτά με συγκεκριμένες

χημικές και ισοτοπικές υπογραφές, που μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τις βιολογικές, περιβαλλοντικές και γεωλογικές συνθήκες σχηματισμού τους.

Για παράδειγμα, η ισοτοπική σύνθεση του βιογενούς ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή των προηγούμενων θερμοκρασιών των ωκεανών και της δυναμικής του κύκλου άνθρακα, ενώ η σύνθεση ιχνοστοιχείων του βιογενούς πυριτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό του κύκλου θρεπτικών ουσιών σε υδάτινα οικοσυστήματα. (Knoll, 2003).

Τελικά, τα ζωτικά αποτελέσματα της βιοορυκτοποίησης είναι απαραίτητα για την επιβίωση και την επιτυχία πολλών οργανισμών, και η μελέτη αυτών των διεργασιών μπορεί να προσφέρει πολύτιμες γνώσεις για τις σχέσεις μεταξύ βιολογικών και γεωλογικών διεργασιών, καθώς και για την εξέλιξη της ζωής στη Γη μέσα στον γεωλογικό χρόνο.

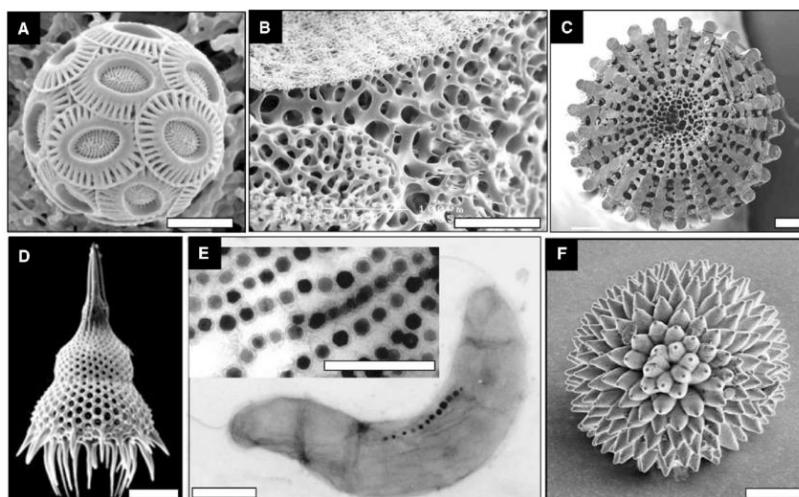
Τα βιοορυκτά που διατηρούνται στο αρχείο απολιθωμάτων μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα περιβάλλοντα του παρελθόντος και την εξέλιξη της ζωής στη Γη. Μελετώντας τη γεωχημεία των βιοορυκτών στα απολιθώματα, οι ερευνητές μπορούν να αποκτήσουν γνώσεις για τη βιολογία και την οικολογία των εξαφανισμένων οργανισμών, καθώς και τις γεωλογικές διεργασίες που οδήγησαν στη διατήρησή τους. (Stanley, 2008).

Σήμερα, τα βιοορυκτά συνεχίζουν να αποτελούν σημαντικό τομέα έρευνας, με επιστήμονες να μελετούν τις διεργασίες και τους μηχανισμούς πίσω από το σχηματισμό τους προκειμένου να αποκτήσουν γνώσεις για βιολογικές και περιβαλλοντικές διεργασίες και να αναπτύξουν νέα υλικά για ποικίλες εφαρμογές.

Τα βιοορυκτά είναι πιθανό να συνεχίσουν να αποτελούν σημαντικό τομέα έρευνας στο μέλλον, με πιθανές εφαρμογές σε μια σειρά πεδίων. Η μελέτη βιοορυκτών μπορεί να βοηθήσει τους γεωλόγους να ανακαλύψουν περισσότερα για το πώς η Γη μπορεί να μεταμορφωθεί από την κλιματική αλλαγή μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Ορισμένοι πιθανοί τομείς όπου τα βιοορυκτά μπορεί να διαδραματίσουν ρόλο στο μέλλον περιλαμβάνουν:

Βιοϋλικά: Τα βιοορυκτά έχουν μοναδικές ιδιότητες που τα καθιστούν ελκυστικά ως πιθανά βιοϋλικά για χρήση σε ιατρικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η υψηλή αντοχή και η βιοσυμβατότητα ορισμένων βιοορυκτών, όπως ο υδροξυαπατίτης (οστό), το καθιστούν δυνητικά λειτουργικό σε εμφυτεύματα ή μηχανική ιστών.

1. Περιβαλλοντική παρακολούθηση: Η ισοτοπική σύνθεση των βιοορυκτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των αλλαγών στο περιβάλλον με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, η ανάλυση των ισοτόπων άνθρακα και οξυγόνου σε κοραλλιογενείς σκελετούς μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές στη θερμοκρασία και την οξύτητα των ωκεανών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. (Zhang, Y., Hu, X., Wang, Y., & Jiang, N., 2023).



Εικ.2.1 ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (A-D, F) και μετάδοσης (E) βιοορυκτών με βάση το CaCO_3 (A-C), με βάση το SiO_2 (D, F) και το Fe_3O_4 (E). Ένα κυτταρικό τοίχωμα ενός μεμονωμένου κυττάρου της *Emiliania huxleyi*, ενός είδους κοκκολιτοφόρου (με την ευγενική παραχώρηση του J. Young, UCL, UK). B Τυπική στερεοσωματική δομή σκελετού εχινόδερμου (αχινός) (ευγενική προσφορά του J. Aizenberg, Πανεπιστήμιο Χάρβαρντ, ΗΠΑ). C Εγκάρσια τομή της κύριας σπονδυλικής στήλης ενός αχινού (με την ευγενική παραχώρηση του P. Dubois, Université Libre de Bruxelles, Βέλγιο). D Ενδοσκελετός ενός μεμονωμένου κυττάρου της ραδιολάριας *Lamprocyclus maritimus* (με την ευγενική παραχώρηση του J. Dolven, www.radio-laria.org).

E Μεμονωμένο κύτταρο *Magnetospirillum gryphiswaldense* που περιέχει μία μόνο αλυσίδα νανοκρυστάλλων βιομαγνητίτη. ένθετο: απομονωμένοι νανοκρυστάλλοι βιομαγνητίτη (με την ευγενική παραχώρηση του D. Schüler, Universität Bayreuth, Γερμανία). F Ένα μικροσκήρο από τον δολοφόνο *Geodia cydonium* (ευγενική προσφορά του I. Zlotnikov, Technische Universität Dresden, Γερμανία). Ράβδοι κλίμακας: 2 μm (A), 100 μm (B, C), 50 μm (D), 500 nm (E), 10 μm (F)

Η ανάλυση και μελέτη των ιδιοτήτων των βιοορυκτών έχει οδηγήσει στην ανακάλυψη νέων υλικών με προηγμένες λειτουργίες. Οι ερευνητές μιμούμενοι τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται από τους ζωντανούς οργανισμούς για την παραγωγή βιοορυκτών, κατάφεραν να δημιουργήσουν υλικά με βελτιωμένη αντοχή, ανθεκτικότητα και πολλές εξελικτικές ιδιότητες. Αυτός ο κλάδος έρευνας ορίζεται ως βιομιμητική.(Χήνης, 2020).

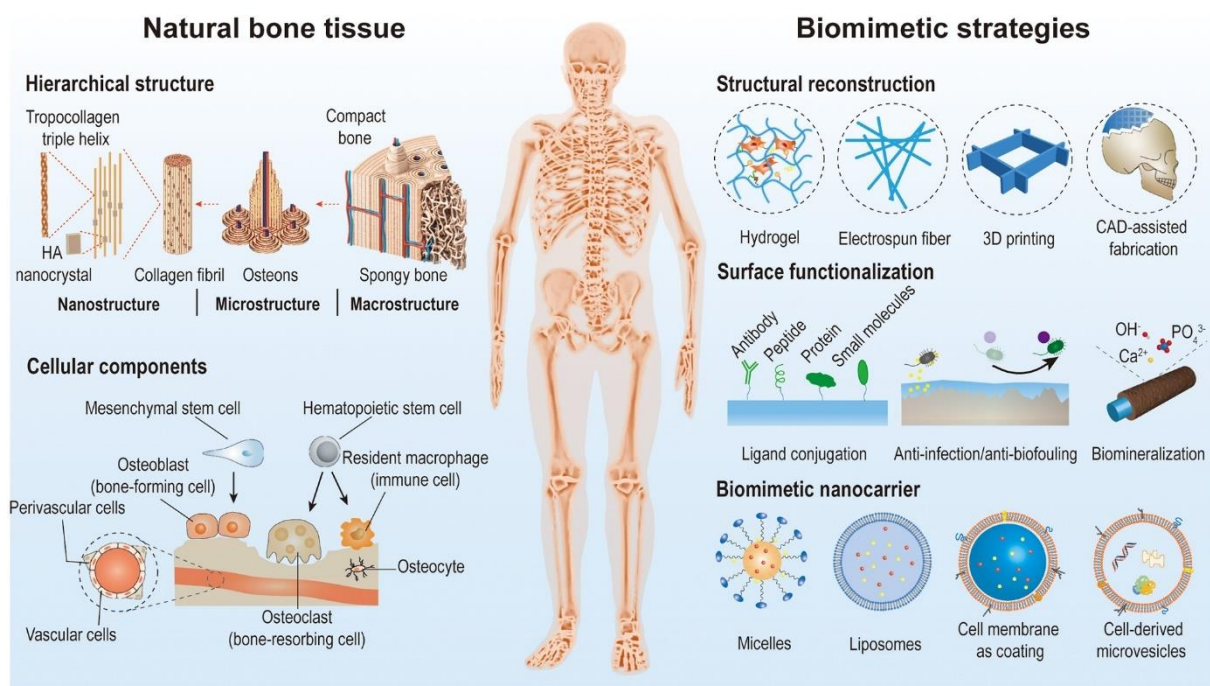
Βασικό πρότυπο βιομιμητικών υλικών εμπνευσμένων από βιοορυκτά αποτελούν τα υποκατάστατα οστικών μοσχευμάτων. Οι ερευνητές εμπνέονται από τα εντοπισμένα φαινόμενα και μηχανισμοί βιοορυκτοποίησης, όπως οι ρυθμιστικές επιδράσεις των βιομακρομορίων στην πυρήνωση των ορυκτών και την ανάπτυξη. Ευτυχώς, υφίσταται μια πληθώρα βιοεμπνευσμένων υλικών τεχνητά κατασκευασμένα ώστε να προσομοιώνουν διαδικασίες βιοορυκτοποίησης για επισκευή σκληρού ιστού. Έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο στοχεύοντας στη μίμηση της δομής και της σύνθεσης του φυσικού οστού, το οποίο απαρτίζεται από ίνες κολλαγόνου και κρυστάλλους υδροξυαπατίτη. (Tang, S., Dong, Z., Ke, X., Luo, J., & Li, J. ,2021). Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται στην ορθοπεδική χειρουργική ώστε να βοηθήσουν στην επισκευή και στην αναγέννηση του κατεστραμμένου οστικού ιστού.

Ένας άλλος τομέας όπου χρησιμοποιούνται βιοορυκτά είναι η ανάπτυξη νέων τύπων ηλεκτρονικών συσκευών. Οι ερευνητές ανακάλυψαν ότι ορισμένα βιοορυκτά, όπως ο ασβεστίτης και ο μαγνητίτης, παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες που μπορούν να προσεγγίσουν τα προαπαιτούμενα χαρακτηριστικά για τη δημιουργία νέων τύπων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και αισθητήρων.

Τα βιοορυκτά θα μπορούσαν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν και ως αποθήκες ενέργειας, μιμούμενα άλλα υλικά τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον. Για παράδειγμα, βιομιμητική προσέγγιση με άλγη και κυανοβακτήρια. (Ramanan, R., Kim, B. H., Cho, D. H., Oh, H. M., & Kim, H. S. ,2016).

Το βιοϋλικό επιδράει σημαντικά σε πολυάριθμες στρατηγικές μηχανικής ιστών. Για παράδειγμα, τα βιοορυκτά μπορούν να λειτουργήσουν ως υπόστρωμα στο οποίο οι κυτταρικοί πληθυσμοί μπορούν να προσκολληθούν και να μεταναστεύσουν, να εμφυτευθούν με έναν συνδυασμό συγκεκριμένων τύπων κυττάρων ως όχημα παροχής κυττάρων και να χρησιμοποιηθούν ως φορέας φαρμάκου για την ενεργοποίηση συγκεκριμένης κυτταρικής λειτουργίας στην εντοπισμένη περιοχή. Η ανάπτυξη βιοϋλικών για εφαρμογές μηχανικής ιστών εστιάστηκε προσφάτως στο σχεδιασμό βιομιμητικών υλικών που έχουν την ικανότητα να αλληλοεπιδρούν με τους περιβάλλοντες ιστούς μέσω βιομοριακής αναγνώρισης. Ο σχεδιασμός των βιομιμητικών υλικών αναγνωρίζεται ως μια προσπάθεια να υπάρξουν τα υλικά, τα οποία θα είναι ικανά να προκαλούν συγκεκριμένες κυτταρικές αποκρίσεις καθώς και να κατευθύνουν το σχηματισμό νέου ιστού με τη μεσολάβηση ειδικών αλληλεπιδράσεων. (Ζαφείρης, 2019).

Με λίγα λόγια, η μελέτη των βιοορυκτών είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας έρευνας που δύναται να οδηγήσει σε νέες ανακαλύψεις. Προϋπόθεση είναι η εκτενής επίγνωση και μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων αρχικά των οργανισμών, έπειτα των βιοορυκτών και τέλος των υλικών που θέλουμε να μιμηθούμε.



Trends in Chemistry

Εικ. 2.2 Πώς η βιομιμητική νανοτεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματικότερη θεραπεία διαφόρων ορθοπεδικών ασθενειών.

3.4 Βιοορυκτά στη βιομηχανία

Στη **βιομηχανία**, τα βιοορυκτά χρησιμοποιούνται ως κίνητρο για την ανάπτυξη νέων υλικών με μοναδικές ιδιότητες όπως κατάλυση, αισθητήρες και επιστρώσεις, λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους και της ικανότητάς τους να παράγονται με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο. Πηγή έμπνευσης στο πεδίο της Βιομημητικής αποτελεί η ίδια η φύση.

1. Για παράδειγμα, τα σκληρά και ανθεκτικά κελύφη των μαλακίων έχουν εμπνεύσει την ανάπτυξη νέων κεραμικών και σύνθετων υλικών για χρήση σε εφαρμογές μηχανικής. Όπως, και η μελέτη της δομής του μαρμάρου για τη γένεση νέου τύπου κεραμικών υψηλής αντοχής. Η αντοχή και η ευελιξία του μεταξιού αράχνης, το οποίο περιέχει βιοορυκτά όπως το ανθρακικό ασβέστιο και το πυρίτιο, είναι ιδιότητες που αξιοποιούνται για υφάσματα και βιοϊατρικά εμφυτεύματα.(Poudyal, L., & Adhikari, K., 2021).

3.4.1 Τσιμέντο

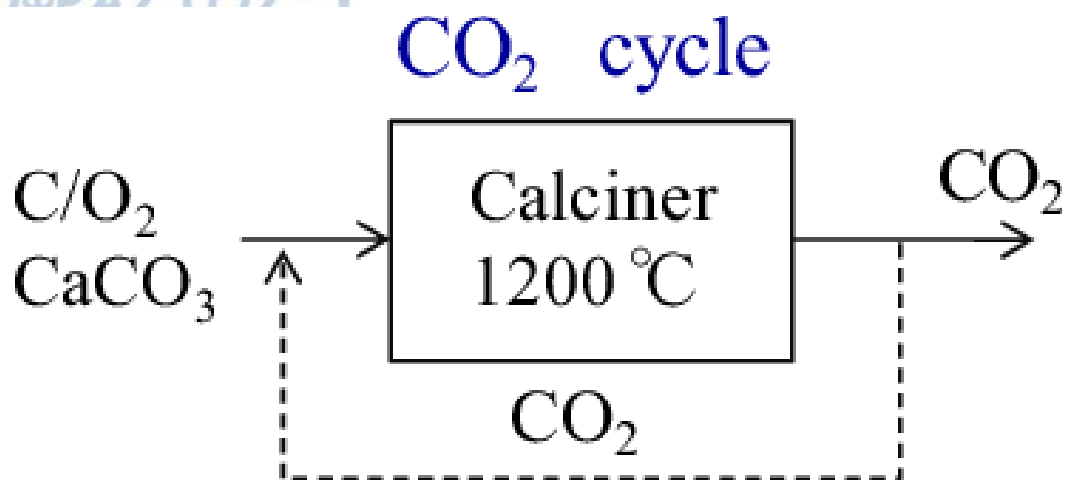
Τα βιοορυκτά έχουν πιθανές εφαρμογές μέχρι και στη βιομηχανία τσιμέντου. Το τσιμέντο είναι ένα σημαντικό δομικό υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή κτιρίων, γεφυρών και άλλων υποδομών. Ωστόσο, η παραγωγή τσιμέντου ευθύνεται σημαντικά για τις εκπομπές ρυπογόνων αερίων του θερμοκηπίου, καθώς απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες (καύσεις) και απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά τις χημικές αντιδράσεις στην παραγωγική διαδικασία. Στο παγκόσμιο περιβάλλον, η αναδόμηση και η συντήρηση κτιρίων αποφέρει το 50% των εκπομπών CO_2 σε παγκόσμια κλίμακα.

Τα βιοορυκτά, όπως το (βιολογικό) ανθρακικό ασβέστιο και το πυρίτιο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές ύλες για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τσιμέντου. Τα υλικά συντίθενται σε συνθήκες περιβάλλοντος (άρα απαιτούν πολύ λίγη ενέργεια) και βελτιστοποιούνται για πολλές και διαφορετικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, οι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη χρήση ανθρακικού ασβεστίου που προέρχεται από κελύφη αυγών, κοχύλια και άλλες πηγές με σκοπό την αντικατάσταση των παραδοσιακών τσιμεντοειδών υλικών. Έτσι, μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της βιομηχανίας τσιμέντου χρησιμοποιώντας υλικά που είναι άφθονα και εμφανίζονται στο φυσικό περιβάλλον. (Miller, S. A., & Myers, R. J., 2019).

Επιπλέον, ορισμένοι οργανισμοί, όπως τα βακτήρια και οι μύκητες, έχουν την ικανότητα να παράγουν βιοορυκτά που έχουν ιδιότητες οι οποίες μοιάζουν με τσιμέντο. Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά του παραδοσιακού τσιμέντου σε εφαρμογές όπως η οδοποιία, η σταθεροποίηση του εδάφους και τα οικοδομικά υλικά.

Η έρευνα συνεχίζεται για την περαιτέρω μελέτη των δυνατοτήτων των βιοορυκτών στη βιομηχανία τσιμέντου, με στόχο την ανάπτυξη πιο βιώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον δομικών υλικών.

Συμπερασματικά, τα βιοορυκτά είναι συναρπαστικά υλικά που σχηματίζονται μέσω μιας πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ οργανικών και ανόργανων συστατικών. Αναμένεται η εδραιοποίηση νέων τεχνολογιών που είναι βιολογικά εμπνευσμένες.



Σχ.1. Ο κύκλος καύσης του CaCO₃ και η παραγωγή του CO₂.
Shiying Lin, T. Kiga, Yin Wang, K. Nakayama



Εικ.2.3 Τσιμέντο- TITAN Greece

3.5 Οικολογία και Βιοορυκτά

Τα βιοορυκτά χρησιμοποιούνται τόσο στη βιομηχανία όσο και στην οικολογία.

Τα βιοορυκτά έχουν και **οικολογικές** εφαρμογές. Για παράδειγμα, ο σχηματισμός σκελετών ανθρακικού ασβεστίου από κοράλλια, μαλάκια και άλλους οργανισμούς παίζει βασικό ρόλο στο σχηματισμό κοραλλιογενών υφάλων και άλλων θαλάσσιων οικοτόπων, που είναι ζωτικοί για τη βιοποικιλότητα και παρέχουν υπηρεσίες οικοσυστήματος όπως η αλιεία και ο τουρισμός. Τα βιοορυκτά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση μολυσμένων εδαφών και νερού, καθώς ορισμένοι μικροοργανισμοί (πχ άλγη) είναι ικανοί να σχηματίσουν ορυκτά που μπορούν να παγιδεύουν (βιοανάδραση) και να ακινητοποιήσουν βαρέα μέταλλα και άλλους ρύπους.(Ταμπάκης ,2020).

3.5.1 Ωκεανός

Η μελέτη βιοορυκτών σε θαλάσσιους οργανισμούς μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τον αντίκτυπο της οξίνισης των ωκεανών σε αυτούς τους οργανισμούς και τα οικοσυστήματά τους. Οι θαλάσσιοι οργανισμοί είναι γνωστό ότι παράγουν μια μεγάλη ποικιλία βιοορυκτών. Αυτά τα βιοορυκτά εξυπηρετούν διάφορες λειτουργίες όπως προστασία, υποστήριξη, μετακίνηση, ακόμη και σίτιση.

Ένα κοινό βιοορυκτό που βρίσκεται σε θαλάσσιους οργανισμούς είναι το ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο χρησιμοποιείται για να σχηματίσει δομές όπως κοχύλια, εξωσκελετές και κοραλλιογενείς υφάλους.

Για παράδειγμα, τα μαλάκια όπως τα μύδια, τα σαλιγκάρια και τα στρείδια χρησιμοποιούν ανθρακικό ασβέστιο για να χτίσουν το κέλυφός τους, ενώ τα κοράλλια το χρησιμοποιούν για να σχηματίσουν τους σκελετούς τους. Το ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να λάβει τη μορφή δύο διαφορετικών ορυκτών: του ασβεστίτη που είναι η σταθερή μορφή, σε αντίθεση με τον αραγωνίτη που είναι μετασταθής. Με την πάροδο του χρόνου, ή όταν θερμαίνεται, μπορεί τελικά να μετατραπεί σε ασβεστίτη. Το ανθρακικό ασβέστιο κρυσταλλοποιείται συνήθως ως ασβεστίτης, αλλά εκπληκτικά, σχηματίζει αραγωνίτη στο θαλασσινό νερό.

Το αποτέλεσμα επηρεάζει πολλές διαφορετικές διαδικασίες συμπεριλαμβανομένου του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα, με την εξουδετέρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα σε ένα σταθερό ανόργανο υλικό γεγονός που περιορίζει την συσσώρευση του στον αέρα. Επίσης, επηρεάζει τον σχηματισμό των οστράκων και κοραλλιών, των οποίων τα κελύφη αραγωνίτη είναι ευάλωτα σε αύξηση της οξύτητας των ωκεανών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή.

Επιπλέον βιοορυκτό που βρίσκεται σε θαλάσσιους οργανισμούς είναι το πυρίτιο (SiO_2), το οποίο χρησιμοποιείται από τα διάτομα και άλλους μικροοργανισμούς για να σχηματίσουν τα κυτταρικά τους τοιχώματα. Αυτοί οι μικροοργανισμοί παίζουν σημαντικό ρόλο στην τροφική αλυσίδα του ωκεανού, καθώς αποτελούν κύρια πηγή τροφής για πολλά θαλάσσια ζώα.

Μερικοί θαλάσσιοι οργανισμοί παράγουν επίσης βιοορυκτά που έχουν μοναδικές ιδιότητες, όπως ο μαγνητίτης (Fe_3O_4) και ο γαιθίτης ($\text{FeO}(\text{OH})$). Αυτά τα ορυκτά χρησιμοποιούνται από ορισμένα είδη θαλάσσιων βακτηρίων για να δημιουργήσουν μαγνητικές δομές που τα βοηθούν να πλοηγηθούν και να προσανατολιστούν στη στήλη του νερού.

Συνεπώς, τα βιοορυκτά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην οικολογία των θαλάσσιων οργανισμών και ο σχηματισμός και η σύνθεσή τους μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τη βιολογία και τη φυσιολογία αυτών των οργανισμών.



Εικ. 2.4 Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι είναι κατασκευασμένοι από βιοορυκτά που διαλύονται σε νερό υψηλής οξύτητας. Αυτό έχει γίνει ανησυχητικό για τους ορυκτολόγους καθώς η οξίνιση των ωκεανών αυξάνεται λόγω της κλιματικής αλλαγής. (Kevin Lafferty, USGS, WERC, Δημόσιος Τομέας).

3.5.2 Ατμόσφαιρα

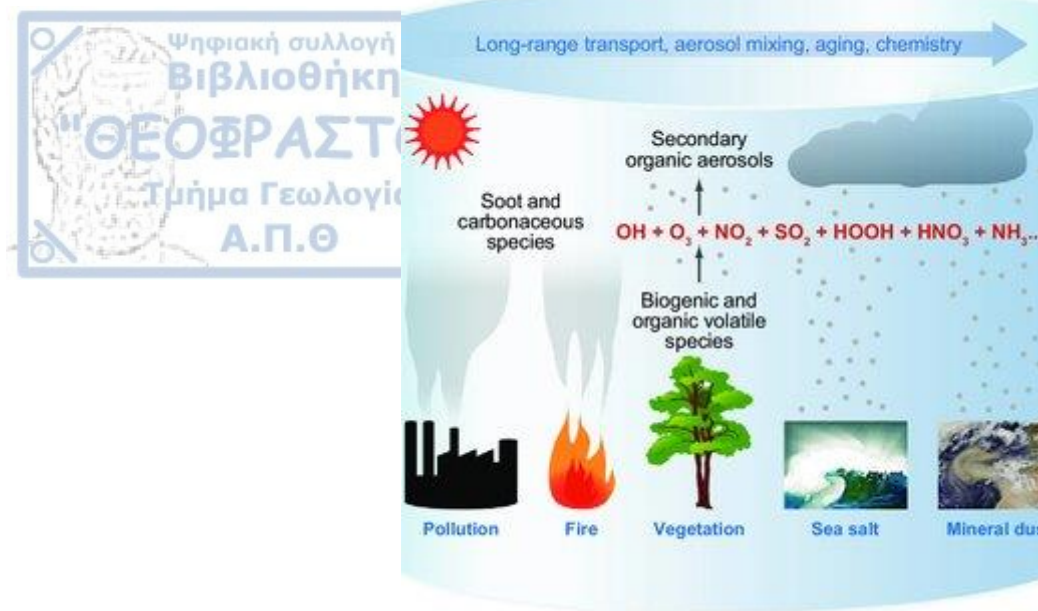
Τα βιοορυκτά μπορούν επίσης να βρεθούν στην ατμόσφαιρα, αν και είναι συνήθως μικρότερα σε μέγεθος από τα βιοορυκτά που βρίσκονται σε χερσαία περιβάλλοντα. Μερικά παραδείγματα βιοορυκτών που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα αποτελούν:

- **Ανθρακικό ασβέστιο:** Αυτό το ορυκτό μπορεί να βρεθεί στα σωματίδια της ατμοσφαιρικής σκόνης, τα οποία μπορεί να προέρχονται από πηγές όπως η σκόνη της ερήμου και η ηφαιστειακή τέφρα. Μπορούν επίσης να σχηματιστούν σωματίδια ανθρακικού ασβεστίου από την αντίδραση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα με θαλάσσιο ψεκασμό.(Σανδρής, 2011).
- **Γύψος:** Αυτό το ορυκτό μπορεί να βρεθεί ομοίως στα σωματίδια της ατμοσφαιρικής σκόνης και συχνά συνδέεται με άνυδρες και ημίξηρες περιοχές.
- **Πυρίτιο:** Παρόμοια με τα χερσαία περιβάλλοντα, το πυρίτιο μπορεί επίσης να βρεθεί στα σωματίδια της ατμοσφαιρικής σκόνης.
- **Μαγνητίτης:** Αυτό το ορυκτό παράγεται από ορισμένα βακτήρια και μπορεί να βρεθεί στα σωματίδια της ατμοσφαιρικής σκόνης. Το οξυγόνο και ο σίδηρος είναι δύο πολύ κοινά στοιχεία στον φλοιό της Γης και τα μαγνητικά ορυκτά υπάρχουν ουσιαστικά σε όλους τους τύπους πετρωμάτων, σε ποσότητες που μπορεί να είναι μικρές αλλά ανιχνεύσιμες.(Κωνσταντινίδης ,2023).

Τα βιοορυκτά στην ατμόσφαιρα μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις για το κλίμα και την ποιότητα του αέρα.

Μερικοί οργανισμοί μετατρέπουν το CO₂ σε εξωσκελετό (π.χ. μαλάκια) ή πηγές ενέργειας κατά τη διάρκεια του μεταβολισμού (π.χ. φυτά) υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ένα από τα αντιπροσωπευτικά βιοϋλικά στον ωκεανό είναι το δίθυρο κέλυφος που αποτελείται από το ανθρακικό ασβέστιο. Αυτό δεν είναι μόνο άφθονο υλικό στον κόσμο αλλά και σταθερό ορυκτό στη δέσμευση του CO₂. Έτσι, οι πληροφορίες που σχετίζονται με τη μεταφορά CO₂ σε δίθυρο κέλυφος θα μπορούσαν να διαδραματίσουν βασικό ρόλο για την εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμευσης CO₂.

Επιπροσθέτως, τα σωματίδια ατμοσφαιρικής σκόνης που περιέχουν βιοορυκτά μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών, επηρεάζοντας τις ιδιότητες των νεφών και ενδεχομένως αλλάζοντας τα πρότυπα βροχόπτωσης.(Σανδρής ,2011) Τα σωματίδια που περιέχουν βιοορυκτά μπορούν επίσης να συμβάλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία στον άνθρωπο και σε διάφορους ζώντες οργανισμούς.(Κοπανάκης, 2015).



Εικ .2.5 Απεικόνιση της ατμόσφαιρας της Γης ως χημικού αντιδραστήρα. Αυτό το σχήμα δείχνει παραδείγματα του φυσικές (και ανθρωπογενείς) διεργασίες που παράγουν αέρια και σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Οι επόμενες διεργασίες μπορούν να μεταμορφώσουν και να γεράσουν αυτά τα σωματίδια καθώς μεταφέρονται μέσω ατμόσφαιρας.

3.5.3 Ανακύκλωση

Το ανθρακικό ασβέστιο είναι ένα κοινό συστατικό βιοορυκτών και βρίσκεται σε πετρώματα όπως ο ασβεστόλιθος, το μάρμαρο. Η ανακύκλωση μπορεί να βοηθήσει στην ανάκτηση αυτών των στοιχείων από τα απόβλητα υλικά, μειώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη και παρόμοιες δραστηριότητες.

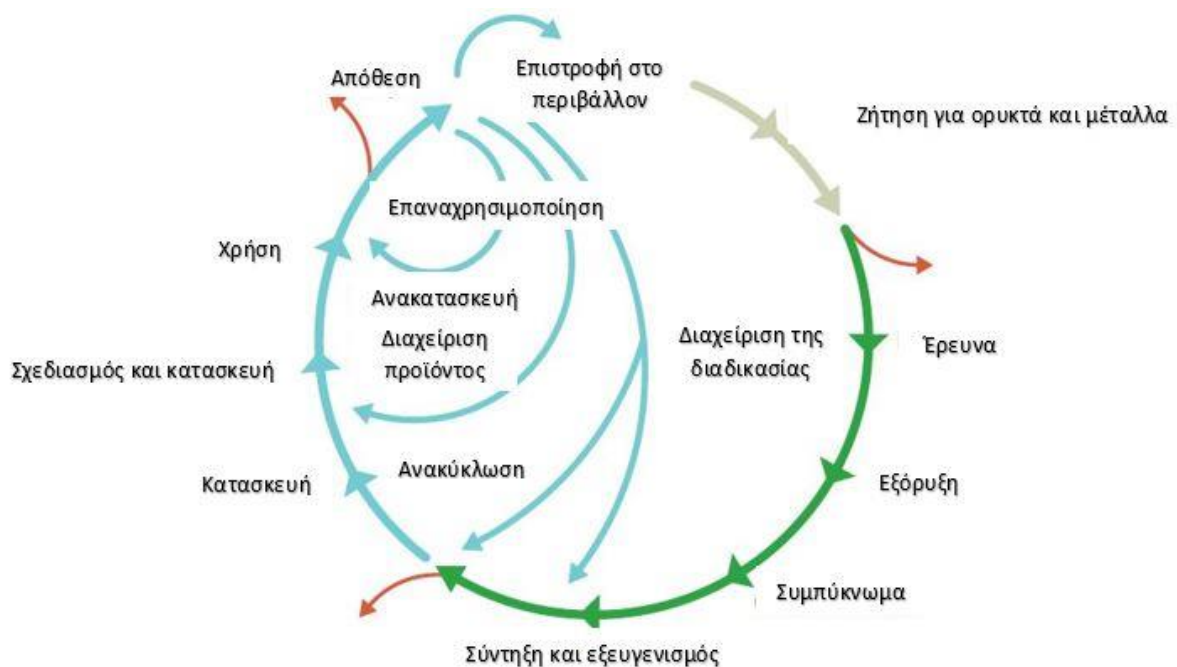
Ορισμένα βιοορυκτά είναι πολύ σκληρά και ανθεκτικά, γεγονός που μπορεί να κάνει δύσκολη τη διάσπασή τους και την ανακύκλωσή τους. Για παράδειγμα, τα οστά και τα δόντια περιέχουν στοιχεία όπως ο υδροξυαπατίτης, ο οποίος είναι ένας τύπος φωσφορικού ασβεστίου. Ωστόσο, μπορούν να ανακυκλωθούν αλέθοντάς τα και χρησιμοποιώντας τα ως πηγή ασβεστίου, το οποίο είναι απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για τα φυτά και τα ζώα.

Ενώ αυτά τα υλικά μπορούν να ανακυκλωθούν σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να απαιτούνται εξειδικευμένες διαδικασίες που δεν είναι ευρέως εύχρηστες λόγω είτε έλλειψης οικονομικής διαθεσιμότητας, είτε έλλειψης διαθέσιμου χρόνου.

Τα βιοορυκτά είναι σημαντικά συστατικά των οικολογικών συστημάτων, παρέχοντας δομική υποστήριξη, προστασία και ακόμη και ως πηγή διατροφής για άλλους οργανισμούς

Επιπλέον, ορισμένα βιοορυκτά ήδη ανακυκλώνονται σε διάφορες βιομηχανίες (κυκλική οικονομία). Για παράδειγμα, οι σκελετοί κοραλλιών χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τσιμέντου και ως πηγή ανθρακικού ασβεστίου στη βιομηχανία χαρτιού. Στο μέλλον, καθώς συνεχίζουμε να αναπτύσσουμε πιο βιώσιμες πρακτικές, είναι πιθανό να δούμε αύξηση της ανακύκλωσης βιοορυκτών ως τρόπο μείωσης των αποβλήτων και εξοικονόμησης πόρων.(Κωνσταντινίδης, 2020).

Εν τέλει, ενώ τα βιοορυκτά μπορούν να δημιουργήσουν προκλήσεις όσον αφορά την ανακύκλωση, προσφέρουν επίσης μοναδικές ευκαιρίες για βιώσιμη ανάπτυξη υλικών και διατήρηση των φυσικών πόρων.



Εικ. 2.6 "Δρόμος" Ανακύκλωσης (βίο)ορυκτών

4. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΒΙΟ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Τα βιοορυκτά έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην παγκόσμια οικονομία, κυρίως σε βιομηχανίες όπως οι κατασκευαστικές εταιρείες, η βιοτεχνολογία, και υγειονομική περίθαλψη.

Σπουδαίο παράδειγμα που προαναφέρθηκε αποτελεί η χρήση βιοορυκτών με βάση το ανθρακικό ασβέστιο στην κατασκευαστική βιομηχανία. Το ανθρακικό ασβέστιο χρησιμοποιείται ως κύριο στοιχείο στο τσιμέντο και το σκυρόδεμα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανοικοδόμηση δρόμων, γεφυρών, κτιρίων. Η παγκόσμια αγορά ανθρακικού ασβεστίου εκτιμάται ότι θα αυξηθεί με CAGR 4,2% μεταξύ 2023 και 2028, λόγω της ζήτησης από τον κατασκευαστικό κλάδο.

Τα βιοορυκτά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη μηχανική υλικών και σε τομείς για τη δημιουργία νέων υλικών με μοναδικές ιδιότητες. Ειδικότερα, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει υλικά με βάση τα βιοορυκτά που είναι βιοαποδομήσιμα και ακόμη και αγωγίμα.(Ψαρουδάκη ,2017). Μελετώντας τον τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται τα βιοορυκτά στη φύση, οι επιστήμονες μπορούν να αναπτύξουν νέους τρόπους για τη δημιουργία βιώσιμων υλικών που είναι λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον.

Στη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης, βιοορυκτά όπως το φωσφορικό ασβέστιο χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία ιατρικών εφαρμογών. Η αγορά φωσφορικού ασβεστίου καθοδηγείται από την τάση της ιατρικής εξέλιξης ως βιοσυμβατό υλικό για σκοπούς αναδιόρθωσης. Λόγου χάρη, το φωσφορικό ασβέστιο χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο μοσχεύματος στην ορθοπεδική χειρουργική και ως επικάλυψη για οδοντικά εμφυτεύματα. Η αγορά αξία προβλέπεται να αυξηθεί από 912,6 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2023 σε 1.500,8 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ έως το 2033.(Future Market Insights ,2022).

Δηλαδή, η μελέτη των βιοορυκτών έχει σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις, με πιθανές εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών.

4.1 Εμπόριο των Βιοορυκτών

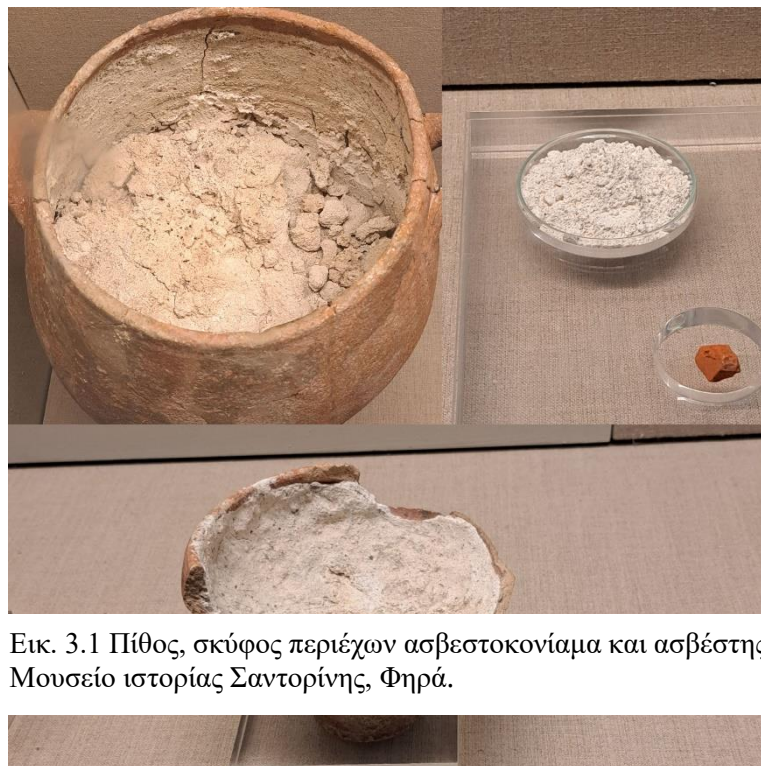
Το εμπόριο βιοορυκτών, όπως τα μαργαριτάρια, τα κοχύλια και τα κοράλλια, έχει μεγάλη ιστορία και παραμένει να θεωρείται μια εν δυνάμει βιομηχανία μέχρι και σήμερα. Τα βιοορυκτά εκτιμώνται ιδιαίτερα για τα αισθητικά και διακοσμητικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και για τη χρησιμότητά τους σε διακοσμητικά αντικείμενα, έργα τέχνης (ασβεστοκονίαμα για νωπογραφία) και κοσμήματα. Επιπροσθέτως, έχουν προαναφερθεί και τα βιομιμητικά υλικά τα οποία έχουν μεγάλη βαρύτητα στην διεθνή αγορά, καθώς δύναται να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη της παγκόσμιας υγείας. Αξίζει να επισημανθεί ότι μερικά από αυτά τα βιοεμπνευσμένα υλικά έχουν εμπορευματοποιηθεί και εγκριθεί για κλινική εφαρμογή στην αποκατάσταση σκληρού ιστού. Το εμπόριο, συνεπώς, βιοορυκτών συμβάλει σημαντικά στη διατήρηση και την προώθηση των πολιτιστικών παραδόσεων σε βάθος χρόνου. Ωστόσο, το εμπόριο βιοορυκτών μπορεί επίσης να επιφέρει αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Δυστυχώς όμως η υπερκατανάλωση δυσχεραίνει την κατάσταση. Ένα παράδειγμα των αρνητικών επιπτώσεων του εμπορίου βιοορυκτών είναι η υπέρμετρη συγκομιδή μαργαριταριών στρειδιών, η οποία έχει οδηγήσει στη μείωση των άγριων πληθυσμών και στην καταστροφή των οικοτόπων τους. Ομοίως, η συλλογή κοραλλιών για χρήση σε κοσμήματα και άλλα διακοσμητικά αντικείμενα μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες στους κοραλλιογενείς υφάλους, που είναι ζωτικής σημασίας οικοσυστήματα, εφόσον υποστηρίζουν ποικίλα θαλάσσια είδη και συγχέονται άμεσα με την κλιματική αλλαγή.

Εκτός από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το εμπόριο βιοορυκτών μπορεί επίσης να έχει κοινωνικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου τα εργασιακά πρότυπα και η προστασία των ανθρωπίνων δικαιωμάτων μπορεί να είναι πιο αδύναμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι εργαζόμενοι μπορεί να υπόκεινται σε συνθήκες εκμετάλλευσης ή καταναγκαστική εργασία.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, έχουν γίνει προσπάθειες για την προώθηση πιο βιώσιμων και υπεύθυνων εμπορικών πρακτικών για τα βιοορυκτά. Για παράδειγμα, υπάρχουν προγράμματα που πιστοποιούν ότι τα μαργαριτάρια και άλλα βιοορυκτά προέρχονται από ηθικά και βιώσιμα υλικά, όπως το πρόγραμμα πιστοποίησης του Marine Stewardship Council για βιώσιμα θαλασσινά. (Gulbrandsen, 2009)

Εν ολίγοις, το εμπόριο βιοορυκτών είναι ένα σύνθετο ζήτημα με θετικές και αρνητικές πτυχές. Ενώ αυτά τα υλικά προσδιορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις αισθητικές και διακοσμητικές τους ιδιότητες, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι η εξόρυξη-εκμετάλλευση και η εμπορία τους γίνεται με υπεύθυνο και βιώσιμο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις της βιομηχανικής κοινωνίας.



Εικ. 3.1 Πίθος, σκύφος περιέχων ασβεστοκονίαμα και ασβέστης. Μουσείο ιστορίας Σαντορίνης, Φηρά.



Εικ. 3.2 **Τα μαργαριτάρια** δημιουργούνται από μια βιολογική διαδικασία που έχουν τα στρείδια για να αμύνονται. Όταν ένας κόκκος άμμου ή ένα ξένο σώμα εισχωρήσει στο εσωτερικό τους, το στρείδι για να απαλλαγεί από την παρουσία του εισβολέα αρχίζει να παράγει μια ουσία από **ανθρακικό ασβέστιο** για να τον απομονώσει. Με αυτό το τρόπο ο εισβολέας περιορίζεται και δεν αποτελεί πλέον κίνδυνο στο στρείδι. Όσο ο εισβολέας παραμένει στο εσωτερικό του στρειδιού το στρείδι συνεχίζει να παράγει ανθρακικό ασβέστιο, με αποτέλεσμα μετά από μερικά χρόνια ο εισβολέας να έχει μεταμορφωθεί σε ένα μαργαριτάρι.



Εικ. 3.3 Διακοσμητική λάμπα από κοράλι

5. ΒΙΟΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΣ

Τα βιοορυκτά δύναται να αποτεθούν μέσα στους ζωντανούς οργανισμούς, καθώς και άμεσα στο περιβάλλον τους λόγω του μεταβολισμού τους. Είναι προϊόντα μιας διαδικασίας που ονομάζεται βιοορυκτοποίηση, υπάρχουν στο ανθρώπινο σώμα και ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τα ουσιώδη βιοορυκτά, τα οποία σχηματίζουν οστά και δόντια και τα παθολογικά βιοορυκτά που σχηματίζουν τους λεγόμενους λίθους ή πέτρες στο νεφρό, την κύστη, τη χοληδόχο κύστη και τις αρθρώσεις. Τα πρώτα συγχέονται με θετικές φυσιολογικές επιδράσεις, ενώ τα δεύτερα ενέχουν κινδύνους και διαταραχές υγείας.

5.2 Τα Ουσιώδη Βιοορυκτά

Τα ουσιώδη βιοορυκτά είναι ανόργανες ενώσεις, απαραίτητες για την ανάπτυξη και τη συντήρηση των ζωντανών οργανισμών. Αυτά τα ορυτά παίζουν κρίσιμους ρόλους σε διάφορες φυσιολογικές διεργασίες, όπως ο σχηματισμός οστών, η μυϊκή λειτουργία και ανάπλαση, η μετάδοση των νεύρων και οι αντιδράσεις των ενζύμων.

Μερικά παραδείγματα ουσιώδων βιοορυκτών περιλαμβάνουν το ασβέστιο, το φώσφορο, το μαγνήσιο, το κάλιο, το νάτριο και σίδηρο. Το ασβέστιο και ο φώσφορος είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τον σχηματισμό και τη συντήρηση των οστών, ενώ το μαγνήσιο και το κάλιο συμμετέχουν στη λειτουργία των μυών και στη μετάδοση των νεύρων. Το νάτριο και το κάλιο δρουν συνεργατικά στη ρύθμιση της ισορροπίας των υγρών στο σώμα. Ο σίδηρος είναι απαραίτητος για την παραγωγή ερυθρών αιμοσφαιρίων, τα οποία μεταφέρουν οξυγόνο στα κύτταρα του σώματος (μέσω των αγγείων) και παρέχουν διοξείδιο του άνθρακα στους πνεύμονες.

Δεδομένου ότι ο σχηματισμός ανοργανοποιημένων σκληρών ιστών σε ζωντανά συστήματα διέπεται από έναν συνδυασμό διεργασιών και θερμοδυναμικής που οδηγούνται από κύτταρα, η βιοορυκτοποίηση θα πρέπει να θεωρείται βιολογικής και χημικής φύσης διαδικασία.

Στην περίπτωση των ανθρώπων, τα φωσφορικά άλατα δεν είναι μόνο ένα βασικό δομικό στοιχείο βιολογικά προερχόμενου ορυκτού, αλλά τα ελεύθερα φωσφορικά στο βιολογικό περιβάλλον ελέγχουν επίσης τον σχηματισμό νέων ορυκτών επηρεάζοντας μια μεγάλη ποικιλία μορίων και ενζύμων σηματοδότησης.

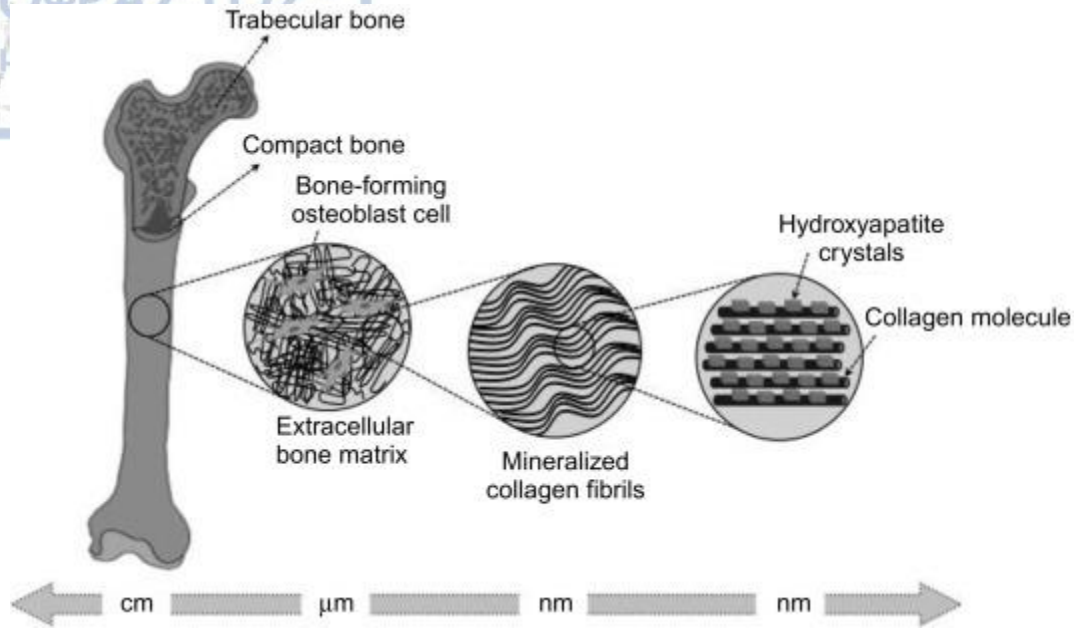
Οι τρεις πιο μεταλλοποιημένοι ιστοί (οστά, δόντια και οστάρια) θεωρούνται εξειδικευμένα όργανα, τα οποία διαφέρουν από όλους τους άλλους ιστούς του ανθρώπινου σώματος χάρη στη μοναδική τους ικανότητα να ορυκτοποιούνται ενώ ο βαθμός και η διαδικασία ανοργανοποίησης σε αυτούς τους ιστούς διαφέρουν επίσης ανάλογα με τις συγκεκριμένες λειτουργίες: κίνηση, μάσημα, και ακοή, αντίστοιχα.

Το ανόργανο φωσφορικό αποτελεί ένα ζωτικό συστατικό των κυττάρων και των κυτταρικών μεμβρανών, των σωματικών υγρών και των σκληρών ιστών. Είναι ένα κύριο ενδοκυτταρικό δισθενές ανιόν, συμμετέχει σε πολλά γενετικά και ενεργειακά μονοπάτια και είναι σημαντικό για την υγεία των οστών, όπως και απαραίτητο για πολλές βιολογικές και δομικές λειτουργίες του σώματος. Η διαθεσιμότητα επαρκούς ασβεστίου και ανόργανου φωσφορικού άλατος στις σωστές αναλογίες στη σωστή θέση είναι δεδομένη για τη σωστή απόκτηση, βιοορυκτοποίηση και διατήρηση της μάζας και της αντοχής του σκελετού. Η βιοορυκτοποίηση είναι μια δυναμική, πολύπλοκη και δια βίου διαδικασία κατά την οποία οι κατακρημνίσεις ανόργανου ασβεστίου και ανόργανων ιόντων φωσφορικών σχηματίζουν βιολογικούς σκληρούς ιστούς.

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία βιοορυκτοποίησης, τουλάχιστον σε οστό, είναι η πυρήνωση των κρυστάλλων Ca-Pi μέσα τα κυστίδια μήτρας ακολουθούμενα από σχηματισμό της άμορφης φάσης Ca-Pi (ACP) με σταδιακή μετάβαση σε πυρήνωση κρυστάλλων Ca-Pi με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κρυστάλλων υδροξυαπατίτη. Στους ανθρώπους, η βιολογική ανοργανοποίηση λαμβάνει χώρα με καθίζηση Ca και Pi σε pH 7,4 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 37 °C. (Παλαιολόγου, 2017).

Η κατανόηση της διαδικασίας βιοορυκτοποίησης είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση ή και πρόληψη ασθενειών που προκαλούνται τόσο από ελαττωματική όσο και από ανώμαλη ανοργανοποίηση.

Τα ουσιώδη βιοορυκτά συνήθως λαμβάνονται μέσω της διατροφής, καθώς το σώμα δεν μπορεί να τα παράγει από μόνο του. Λαμβάνονται ορυκτά μέσω της εισπνοής, όπως συμβαίνει με τον αμianto. Στο σώμα ακολουθούν αντιδράσεις που παράγουν λιθοποιημένους ιστούς γύρω από αυτά τα συστατικά. Τα εισπνεόμενα σωματίδια είναι ορυκτά, ενώ τα παραγόμενα ορυκτά που σχηματίζονται από την αντίδραση του οργανισμού στην παρουσία αυτών των ξένων σωμάτων στο ανθρώπινο σώμα χαρακτηρίζονται ως βιοορυκτά. Η κατανάλωση μιας ποικίλης και ισορροπημένης διατροφής που περιλαμβάνει πηγές αυτών των ορυκτών, όπως γαλακτοκομικά προϊόντα, πράσινα λαχανικά, δημητριακά ολικής αλέσεως, ξηροί καρποί και άπαχα κρέατα, μπορεί να συμβάλει στην λήψη των αναγκαίων ποσοτήτων αυτών των βιοορυκτών για τη διασφάλιση της βέλτιστης υγείας.



Εικ. 4.1 Σχεδιασμός βιοϋλικών με βάση τη βιοορυκτοποίηση για επιδιόρθωση και αναγέννηση των οστών.

5.3 Τα Παθολογικά Βιοορυκτά

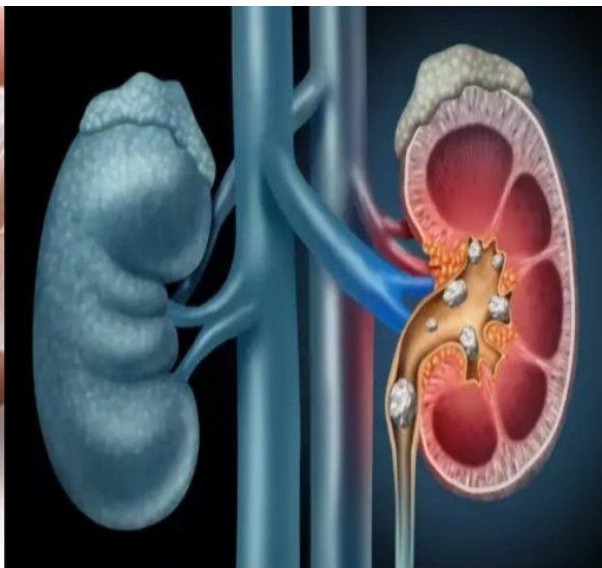
Τα παθολογικά βιοορυκτά είναι ενώσεις που συσσωρεύονται ασυνήθιστα σε ζωντανούς οργανισμούς, οδηγώντας σε βλάβη και δυσλειτουργία των ιστών. Αυτά τα ορυκτά σχηματίζονται σε διάφορους ιστούς και όργανα, όπως οστά, αρθρώσεις, νεφρά και αιμοφόρα αγγεία.

Μερικά παραδείγματα παθολογικών βιοορυκτών αποτελούν:

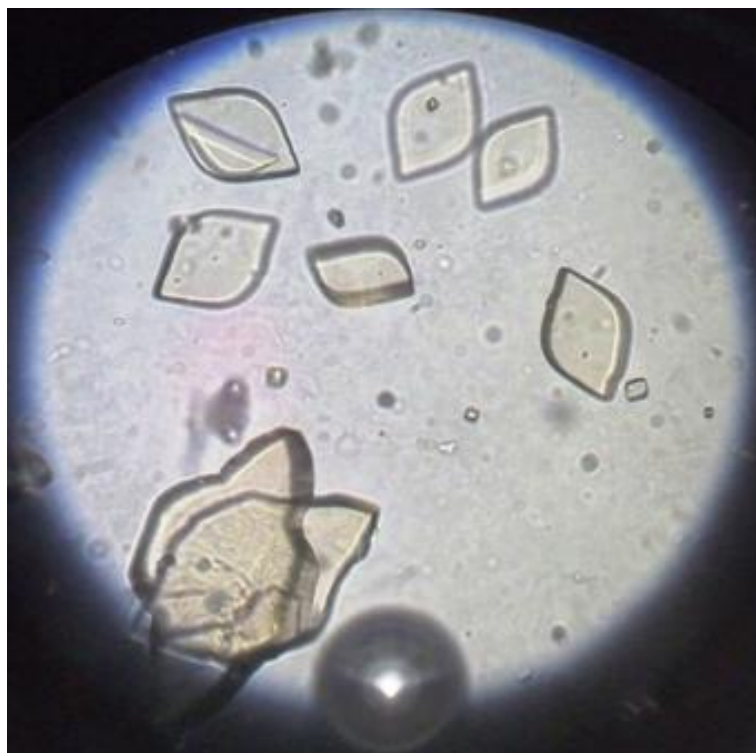
- Κρύσταλλοι φωσφορικού ασβεστίου - Αυτοί οι κρύσταλλοι μπορούν να συσσωρευτούν στα νεφρά, έχοντας ως αποτέλεσμα σχηματισμό πέτρας στα νεφρά. Μπορούν επίσης να εναποτίθενται σε μαλακούς ιστούς, όπως αιμοφόρα αγγεία και καρδιακές βαλβίδες, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη καρδιαγγειακών παθήσεων.
- Καταθέσεις αμυλοειδούς - Οι αμυλοειδείς πρωτεΐνες μπορούν να συσσωματωθούν και να σχηματίσουν αδιάλυτες εναποθέσεις σε διάφορους ιστούς και όργανα, όπως ο εγκέφαλος, η καρδιά, το έντερο, το δέρμα και το πάγκρεας. Αυτές οι εναποθέσεις μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη της νόσου του Αλτσχάιμερ, της καρδιακής ανεπάρκειας και του διαβήτη.
- Κρύσταλλοι ουρικού άλατος (λιθίαση του ουροποιητικού) - Οι κρύσταλλοι ουρικού οξέος μπορούν να συσσωρευτούν στις αρθρώσεις, οδηγώντας στην ανάπτυξη ουρικής αρθρίτιδας, μιας επώδυνης φλεγμονώδους κατάστασης. Τα ούρα περιέχουν οξαλικό ασβέστιο σε συγκέντρωση που το καθιστά αδιάλυτο. Έτσι, ο χαμηλός όγκος των ούρων, οι υψηλές τιμές ασβεστίου, φωσφορικών ή ουρικού καθώς και οι χαμηλές τιμές κιτρικών και μαγνησίου, εντείνουν τον υπερκορεσμό του οξαλικού ασβεστίου. Ο υπερκορεσμός είναι η κινητήρια δύναμη για την κρυστάλλωση σε διαλύματα όπως τα ούρα. Εφόσον, η συγκέντρωση του οξαλικού ασβεστίου υπερβεί την K_{sp} του, μπορεί να υποστεί κρυσταλλοποίηση. (Βακούλα, 2017)

- Καταθέσεις σιδήρου - Η υπερβολική ποσότητα σιδήρου μπορεί να εναποτεθεί σε διάφορα όργανα, όπως το ήπαρ και η καρδιά, οδηγώντας στην ανάπτυξη αιμοχρωμάτωσης, μιας γενετικής διαταραχής που προκαλεί υπερφόρτωση σιδήρου. Ο σίδηρος έχει την ικανότητα να δέχεται και να δίνει ηλεκτρόνια εύκολα. Η συγκέντρωση σιδήρου του σώματος ρυθμίζεται κυρίως από την απορρόφηση, δεδομένου ότι οι άνθρωποι δεν έχουν εκ φύσεως μηχανισμό με τον οποίο αποβάλλεται η περίσσεια σιδήρου. Ο σίδηρος έχει αναγνωριστεί ως συστατικό του αμιάντου και άλλες ορυκτές και συνθετικές ίνες.
- Ασβεστοποίηση - Η ασβεστοποίηση είναι μια σπάνια αλλά σοβαρή πάθηση όπου σχηματίζονται εναποθέσεις ασβεστίου σε μικρά αιμοφόρα αγγεία, οδηγώντας σε βλάβη των ιστών και εξέλκωση του δέρματος. Παρόλο που χαρακτηριζόταν ως μία παθητική διαδικασία, λόγω του αυξημένου λόγου ασβεστίου-φωσφόρου, πλέον θεωρείται μια ενεργητική κυτταρική διαδικασία, που ελέγχεται από πολύπλοκους λειτουργικούς μηχανισμούς. (Ευστρατιάδης, Γ., Κυβεντίδης, Α., & Διαμαντίδης, Μ. , 2006)

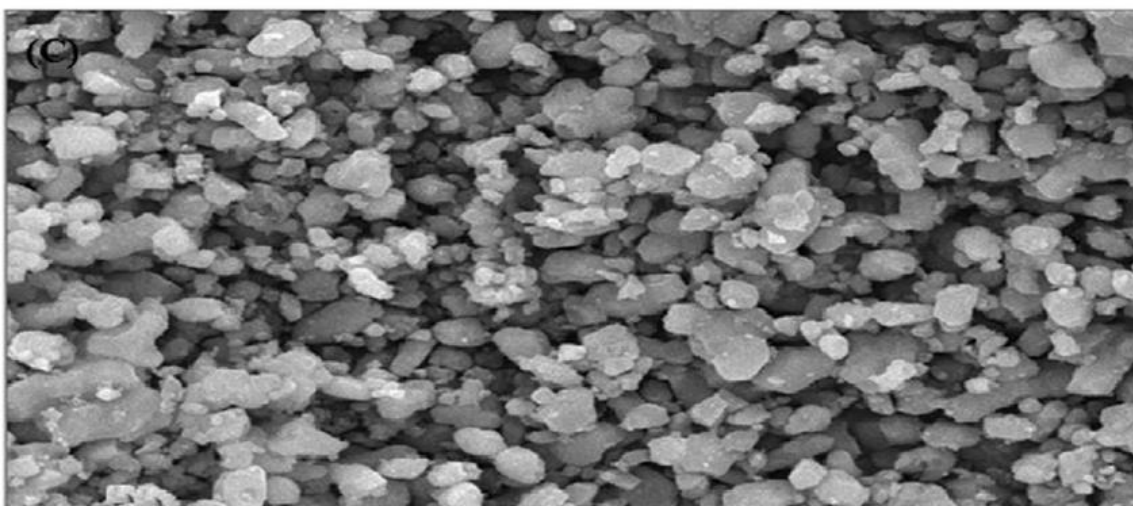
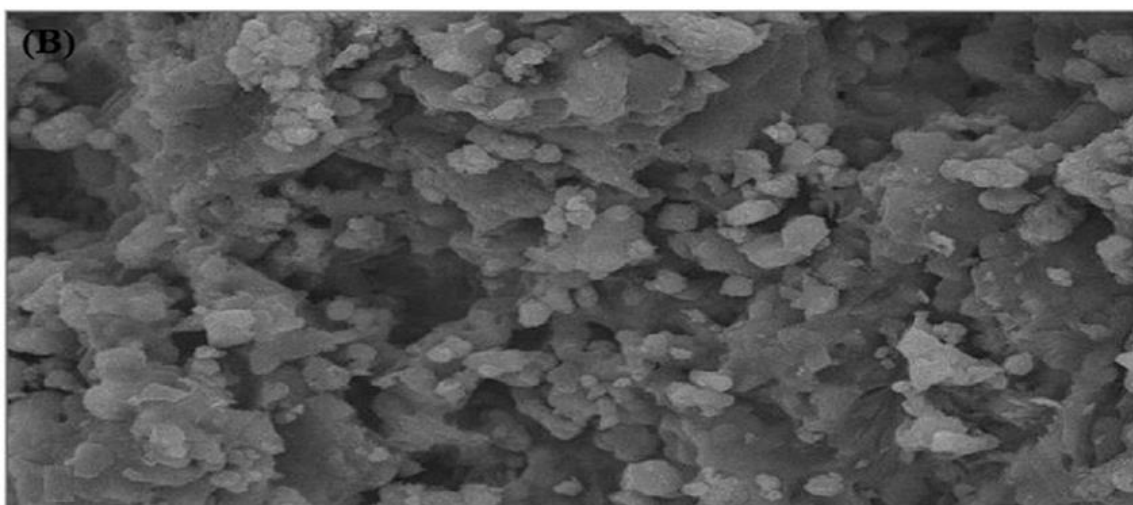
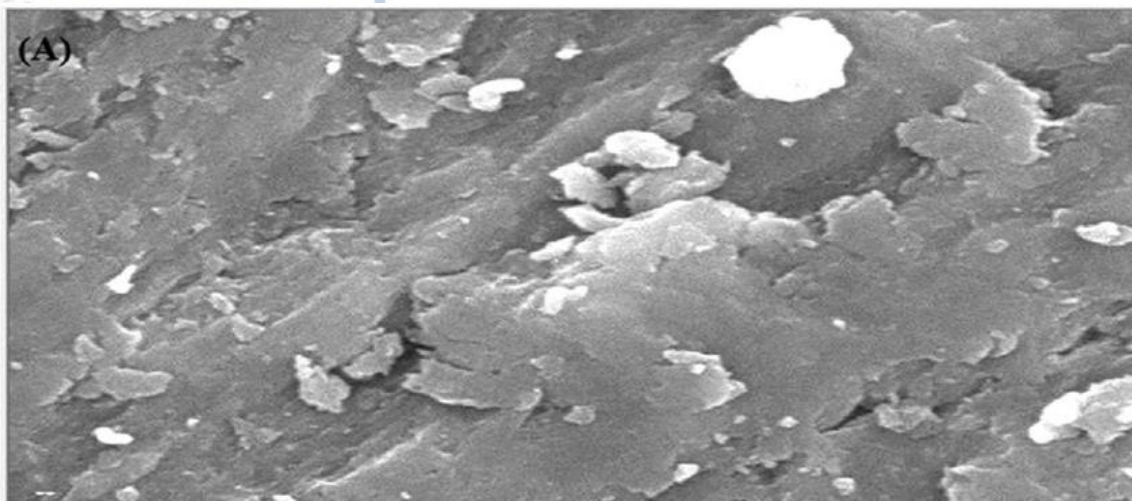
Ο σχηματισμός παθολογικών βιοορυκτών μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των γενετικών, της διατροφής και των περιβαλλοντικών παραγόντων. Η διαχείριση αυτών των παραγόντων και η θεραπεία των υποκείμενων παθήσεων μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη του σχηματισμού παθολογικών βιοορυκτών και να μετριάσει τις δυσμενείς επιπτώσεις τους στην υγεία. (Βακούλα, 2017)



Εικ. 4.2 Πέτρες στα νεφρά (www.onmed.gr)



Εικ. 4.3 Κρύσταλλοι ουρικού οξέος στα ούρα. Συνεισφορά από τον Iqbal Osman (<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>)



Εικ. 4.4 (Α) Εικόνα SEM μη ασβεστωμένων οστών ζώων (Β) Εικόνα SEM φρυγμένων οστών και (Γ) εικόνα SEM KOH/πυρρυγμένων οστών ζώων.
(https://www.researchgate.net/publication/308163673_Enhanced_biodiesel_production_from_Jatropha_oil_using_calcined_waste_animal_bones_as_catalyst)

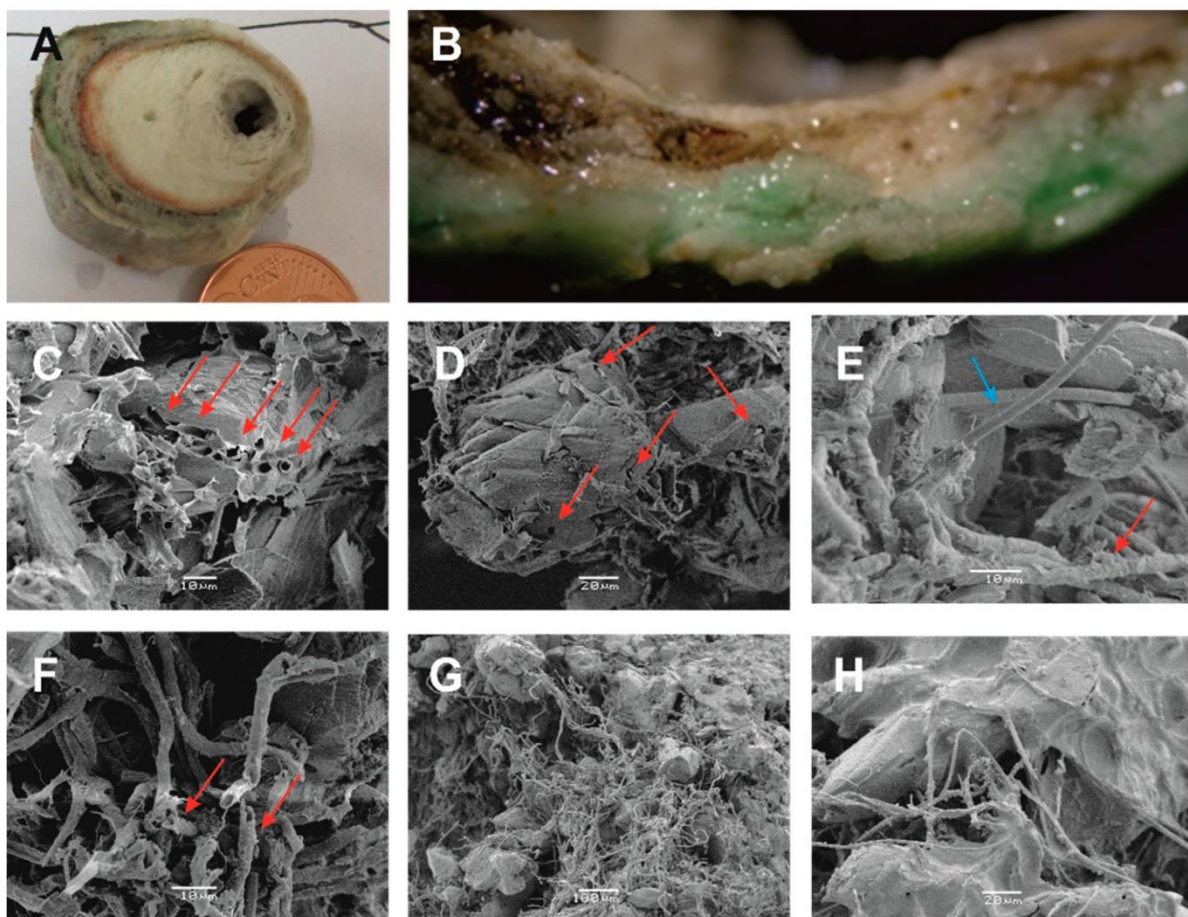
1. ΒΙΟΟΡΥΚΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Η Ελλάδα έχει πλούσια γεωλογική ιστορία και ποικίλους ορυκτούς πόρους, γεγονός που οδήγησε στον σχηματισμό ενός ευρέος φάσματος βιοορυκτών στη χώρα.

Ειδικότερη αναφορά θα γίνει για το περιβάλλον των θερμών πηγών στην Αιδηψό Εύβοιας. Οι θερμές πηγές αποτελούν φυσικά σώματα νερού που θερμαίνονται γεωθερμικά από την εσωτερική θερμότητα της Γης. Αυτές οι πηγές εμφανίζονται καθώς τα υπόγεια νερά θερμαίνονται από πετρώματα ή μάγμα κάτω από την επιφάνεια της Γης και ανεβαίνουν στην επιφάνεια. Παρόλο που κυριαρχούν ακραίες φυσικοχημικές συνθήκες, μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών βρήκαν τρόπους για να επιβιώσουν. Στις θερμές πηγές της Αιδηψού αποτίθεται θερμογόνο τραβερτίνης. Επιπλέον, παρουσιάζουν μακρο- και μικρο-φάση ,με διεργασίες βιοορυκτοποίησης που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υβριδικών τραβερτινών δηλαδή βιοτικές και αβιοτικές συνεισφορές. Ο ασβεστίτης είναι η πιο χαρακτηριστική κύρια ορυκτή φάση στις θερμογενείς τραβερτίνες. Οι θερμογενείς τραβερτίνες της Βορειοδυτικής Εύβοιας σχηματίζονται κυρίως in-situ, στο οποίο η απελευθέρωση CO₂ δημιουργεί ένα υπερκορεσμένο διάλυμα σε σχέση με το ανθρακικό ασβέστιο. Τα κοιτάσματα τραβερτίνης θερμής πηγής της Αιδηψού έχουν ως κύριες ορυκτές φάσεις είτε ασβεστίτη, ασβεστίτη και αραγωνίτη είτε μόνο αραγωνίτη. (Kanellopoulos, C., Lamprinou, V., Politi, A., Voudouris, P., & Economou-Amilli, A. ,2022).

Η βιοορυκτοποίηση κυανοβακτηρίων αναφέρεται στη διαδικασία με την οποία τα κυανοβακτήρια, μια ομάδα φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών, διευκολύνουν το σχηματισμό κοιτασμάτων ορυκτών. Τα κυανοβακτήρια είναι γνωστά για την ικανότητά τους να επηρεάζουν την καθίζηση και τη συσσώρευση διαφόρων μετάλλων μέσω των μεταβολικών τους δραστηριοτήτων. Είναι ικανά να προκαλούν την καθίζηση ορυκτών ανθρακικού ασβεστίου, ιδιαίτερα ασβεστίτη (CaCO₃) και αραγωνίτη. Αυτό το επιτυγχάνουν μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται εξωκυτταρική ασβεστοποίηση. Τα κυανοβακτηριακά κύτταρα εκκρίνουν μια κολλώδη μήτρα πολυσακχαριτών, πρωτεϊνών και άλλων οργανικών μορίων που χρησιμεύουν ως θέσεις πυρήνων για τον σχηματισμό ανθρακικών ορυκτών. Οι διεργασίες βιοορυκτοποίησης κυανοβακτηρίων ταυτοποιήθηκαν στο εξωτερικό στρώμα των δειγμάτων (Εύβοιας). Η παρουσία ενδολιθικών κυανοβακτηρίων είναι επιζήμια για τους κρυστάλλους ασβεστίτη, δηλαδή, ανοίγουν τρύπες και σκάβουν κανάλια στους κρυστάλλους.

Συνοψίζοντας, ο τεράστιος πληθυσμός των κυανοβακτηρίων που βρίσκεται στις θερμές πηγές της Βορειοδυτικής Εύβοιας και η συμμετοχή αρκετών ταξινομικών τάξεων κυανοβακτηρίων, σε συγκεκριμένες διεργασίες βιοορυκτοποίησης, μαζί με τις ανόργανες διεργασίες, οδηγούν στο σχηματισμό υβριδικού ανθρακικά, όπου διαφορετικές βιοτικές διαδικασίες λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα.

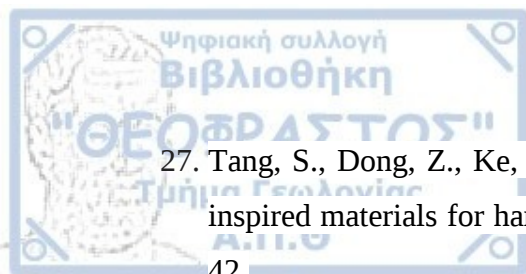


Εικ. 5 Διεργασίες βιοορυκτοποίησης από Κυανοβακτήρια υπό SEM. (Α) Κάθετη τομή επιφάνειας σταλακτίτη. (Β) Λεπτομερής όψη της εξωτερικής περιφέρειας του σταλακτίτη, που παρουσιάζει ποτάμιο φλοιό με χαρακτηριστικές ζώνες και νημάτια του ενδολιθικού *Leptolyngbya perforans* και *L. ercegoniense* που καταστρέφει τον σταλακτίτη, ενώ η άνω ζώνη καλύπτεται από κοκκώδη επιλιθικά είδη όπως ο *Chroococcus lithophilus*. (C , D) Οι κρύσταλλοι ασβεστίτη με ευδιάκριτες οπές και κανάλια εκσκαφής καταλαμβάνονται από νηματώδη κυανοβακτήρια. (Ε) Νηματώδη κυανοβακτήρια των ενδολιθικών *Leptolyngbya perforans* βγαίνουν από κρύσταλλο ασβεστίτη (μπλε βέλος) και ασβεστοποιημένα περιβλήματα νημάτων κυανοβακτηρίων (κόκκινο βέλος). (ΣΤ) Ασβεστοποιημένα περιβλήματα νημάτων κυανοβακτηρίων από κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου μικρού μεγέθους. (Ζ) Κατακράτηση κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου από νηματώδη κυανοβακτήρια. (Η) EPS μαζί με νήματα.

1. Βακούλα, Ε. Κ. (2017). Ο ρόλος της διατροφής στη λιθίαση του ουροποιητικού (Master's thesis).
2. Ευστρατιάδης, Γ., Κυβεντίδης, Α., & Διαμαντίδης, Μ. (2006). Η αγγειακή ασβεστοποίηση σε ασθενείς με χρόνια νεφρική ανεπάρκεια. *Ελληνική Νεφρολογία-Hellenic Nephrology*, 18(2).
3. Κατσογιάννης, Ι. Α. (2002). Απομάκρυνση αρσενικού από υπόγεια νερά με συνδυασμό διεργασιών (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).
4. Κοπανάκης, Η. (2015). Δυναμική των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων και μελέτη του δυναμικού πυρηνοποίησής τους στην ανατολική Μεσόγειο (Doctoral dissertation, Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος).
5. Κοφινά, Α. Κ. (2006). Ανάκτηση ανόργανων φωσφορικών από υδατικά διαλύματα (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Χημικών Μηχανικών).
6. Λαγοπάτη, Ν. (2018). Βιοϋλικά με βάση τον υδροξυαπατίτη φυσικής προέλευσης σε εφαρμογές στην αναγεννητική ορθοπεδική ιατρική.
7. Στεργίου, Γ. Ν. (2012). Σύνθεση κόνεως υδροξυαπατίτη παρουσία του βιοπολυμερούς χιτοζάνη και αμινοξέων (Bachelor's thesis).
8. Ταμπάκης, Ι. (2020). *Καθαρισμός νερού από βαρέα μέταλλα: συμβατικές και προηγμένες μέθοδοι* (Bachelor's thesis).
9. Τσαούση, Γ. Μ. Σ. (2010). Σύνθεση μαγνητίτη από υδατικά διαλύματα δισθενούς και τρισθενούς σιδήρου (Bachelor's thesis).
10. Χήνης, Δ. (2020). Πειραματική και θεωρητική μελέτη μίας διαβαθμισμένης βιομμητικής δομής.
11. Gulbrandsen, L. H. (2009). The emergence and effectiveness of the Marine Stewardship Council. *Marine Policy*, 33(4), 654-660.
12. Gurzau, E. S., Neagu, C., & Gurzau, A. E. (2003). Essential metals—case study on iron. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 56(1), 190-200.
13. Kanellopoulos, C., Lamprinou, V., Politi, A., Voudouris, P., & Economou-Amilli, A. (2022). Insights on the biomineralization processes and related diversity of

cyanobacterial microflora in thermogenic travertine deposits in Greek hot springs (North-West Euboea Island). *Depos. Rec.* 8, 1055-1078.

14. Kanellopoulos, C., Lamprinou, V., Politi, A., Voudouris, P., Iliopoulos, I., Kokkaliari, M., ... & Economou-Amilli, A. (2022). Microbial Mat Stratification in Travertine Depositions of Greek Hot Springs and Biomineralization Processes. *Minerals*, 12(11), 1408.
15. Knoll, A. H. (2003). Biomineralization and evolutionary history. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 54(1), 329-356.
16. Maradshi, W. (2015). Συγκριτική μελέτη των ζεόλιθων ως προς την ικανότητα τους για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα.
17. Marin, F., Pokroy, B., Luquet, G., Layrolle, P., & De Groot, K. (2007). Protein mapping of calcium carbonate biominerals by immunogold. *Biomaterials*, 28(14), 2368-2377.
18. Miller, S. A., & Myers, R. J. (2019). Environmental impacts of alternative cement binders. *Environmental science & technology*, 54(2), 677-686.
19. Poudyal, L., & Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment and Sustainability*, 4, 100024.
20. Prather, K. A., Hatch, C. D., & Grassian, V. H. (2008). Analysis of atmospheric aerosols. *Annu. Rev. Anal. Chem.*, 1, 485-514.
21. Ramanan, R., Kim, B. H., Cho, D. H., Oh, H. M., & Kim, H. S. (2016). Algae–bacteria interactions: evolution, ecology and emerging applications. *Biotechnology advances*, 34(1), 14-29.
22. Robbins, L. J., Lalonde, S. V., Planavsky, N. J., Partin, C. A., Reinhard, C. T., Kendall, B., ... & Konhauser, K. O. (2016). Trace elements at the intersection of marine biological and geochemical evolution. *Earth-Science Reviews*, 163, 323-348.
23. Sharma, V., Srinivasan, A., Nikolajeff, F., & Kumar, S. (2021). Biomineralization process in hard tissues: The interaction complexity within protein and inorganic counterparts. *Acta biomaterialia*, 120, 20-37.
24. Shin, H., Jo, S., & Mikos, A. G. (2003). Biomimetic materials for tissue engineering. *Biomaterials*, 24(24), 4353-4364.
25. Skinner, H. C. W., & Jahren, A. H. (2003). Biomineralization. *Treatise on geochemistry*, 8, 682.
26. Stanley, S. M. (2008). Effects of global seawater chemistry on biomineralization: past, present, and future. *Chemical reviews*, 108(11), 4483-4498.



27. Tang, S., Dong, Z., Ke, X., Luo, J., & Li, J. (2021). Advances in biomineralization-inspired materials for hard tissue repair. *International Journal of Oral Science*, 13(1), 42.
28. White, W. M. (2020). *Geochemistry*. John Wiley & Sons.
29. Wollast, R. (1994). The relative importance of biomineralization and dissolution of CaCO_3 in the global carbon cycle. *Bull Inst. Ocean Monaco Spec*, 13, 13-35.
30. Zhang, Y., Hu, X., Wang, Y., & Jiang, N. (2023). A critical review of biomineralization in environmental geotechnics: Applications, trends, and perspectives. *Biogeotechnics*, 100003.

Ηλεκτρονικές πηγές:

https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_sequestration

<https://dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/28421/3/StroungarisVasilisMsc2023.pdf>

[Advances in biomineralization-inspired materials for hard tissue repair | International Journal of Oral Science \(nature.com\)](#)

<https://doaj.org/article/0fa16fff58d84f47a1f63463d60b856b>

[Biomimetics | Free Full-Text | Forced Biomineralization: A Review \(mdpi.com\)](#)

[Morphology control and molecular templates in biomineralization - ScienceDirect](#)

https://www.fabeelous.gr/journal3/blog/post?journal_blog_post_id=16

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949929123000037>

<https://www.oryktosploutos.net/2022/06/%CE%B7-%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B5%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%B2%CE%B9%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AF%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B1-%CF%80%CE%BB%CE%B1%CE%AF%CF%83%CE%B9/>

[Biominerals | Mineralogical Magazine | GeoScienceWorld](#)

<https://www.smithsonianmag.com/blogs/national-museum-of-natural-history/2021/04/22/how-biominerals-are-stepping-stones-climate-change-research/>

[Future Market Insights, Inc.](#)

<https://factcheckgreek.afp.com/doc.afp.com.33CC6M9>



<http://ikee.lib.auth.gr/record/125685/files/%CE%91%CE%B9%CF%89%CF%81%CE%BF%CF%8D%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%B1%20%CE%A3%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%B1%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%92%CF%81%CE%BF%CF%87%CF%8C%CF%80%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7.pdf>

<https://www.frontiersin.org/search?query=biomineralization&tab=top-results&origin=https%3A%2F%2Fwww.frontiersin.org%2F>