

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ

Διδάκτορας Νικολίνα Μπουρλή
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Γεωλογίας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS



ΠΑΤΡΑ, 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ο κύκλος του άνθρακα

Οργανική ύλη

Χημική σύσταση βιομάζας

Οργανική ύλη στα ιζήματα

Προϋποθέσεις ύπαρξης
υδρογονανθράκων

Μετασχηματισμός της
οργανικής ύλης

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

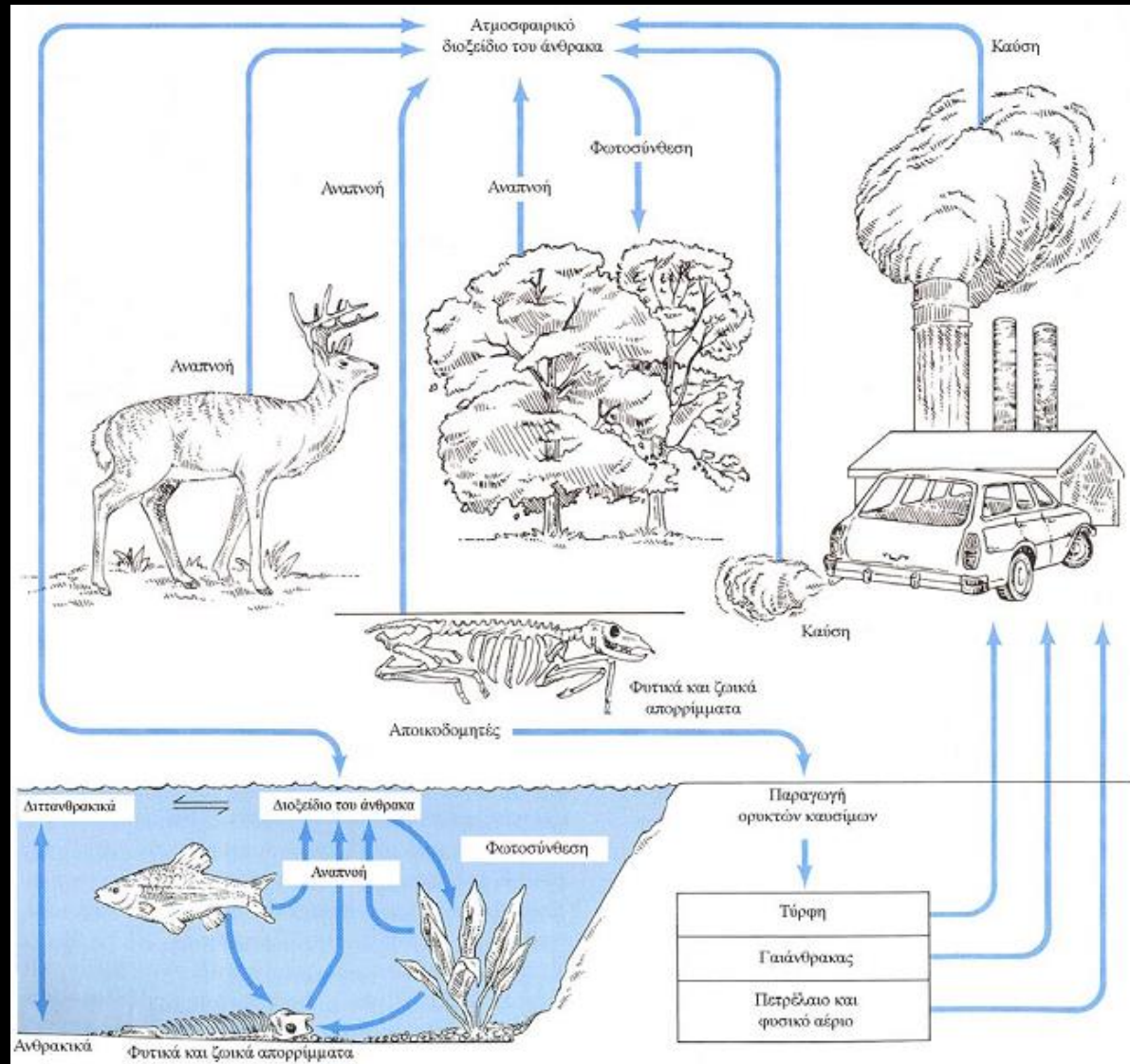
Ο κύκλος του άνθρακα στη γη (ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα, λιθόσφαιρα, βιόσφαιρα) ελέγχει τις διεργασίες δημιουργίας των οργανογενών ορυκτών καυσίμων.

Βρίσκεται σε οξειδωμένη μορφή στην ατμόσφαιρα (διοξείδιο του άνθρακα) και στο νερό (σε διαλυμένη μορφή), στη μορφή ανθρακικών αλάτων στα ορυκτά και σε ανοιγμένη μορφή στις ενώσεις της έμβιας ύλης.

Το τμήμα ανταλλαγής του CO₂ μεταξύ ατμόσφαιρας και θάλασσας-ωκεανών, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια του νερού –αέρα και γίνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Για να διατηρηθεί το ισοζύγιο του CO₂, σημαντικό ρόλο παίζουν τα φωτοσυνθετικά μικροφύκη που ζουν στους ωκεανούς, παίζοντας σπουδαίο ρυθμιστικό ρόλο οι τελευταίοι στη συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, βοηθώντας έτσι στη διατήρηση μιας ισορροπίας.

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ο κύκλος αρχίζει με την **φωτοσύνθεση**, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα ανακυκλώνεται με πολλούς τρόπους: την αναπνοή ζώων και φυτών, την βακτηριακή αποσύνθεση και φυσική οξείδωση των νεκρών οργανισμών και την καύση (φυσική ή ανθρώπινη)



Εικόνα 1. Ο κύκλος του Άνθρακα.

Πηγή. Δρ. Τσέζος Μάριος, Δρ. Ρεμουντάκη Εμμανουέλα, «Περιβάλλον Ι

Εισαγωγή στην Επιστήμη & Τεχνολογία Προστασίας του Περιβάλλοντος», Σημειώσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010

ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ

Το φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν και τα βακτήρια αποτελούν τα τρία είδη έμβιων οργανισμών με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στη δημιουργία πετρελαίου και γενικά ορυκτών καυσίμων.

Φυτοπλαγκτόν: διάτομα, μπλε-πρασινά φύκη, τα δινομαστιγωτά, κοκκολιθοφόρα.



Εικόνα 3. Τα κοκκολιθοφόρα.

ΤΑ ΠΡΩΤΙΣΤΑ: ΑΥΤΟΤΡΟΦΑ

ΦΥΚΗ (Algae)

ΡΟΔΟΦΥΚΗ
(Rhodophyta)



ΦΑΙΟΦΥΚΗ
(Phaeophyta)



ΧΛΩΡΟΦΥΚΗ
(Chlorophyta)



ΔΙΑΤΟΜΑ (Diatoms)

Chrysophyta



ΜΑΣΤΙΓΟΦΟΡΑ (Flagellates)

ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΟΦΟΡΑ
(Pyrrhophyta)



ΕΥΓΛΕΝΟΕΙΔΗ
(Euglenophyta)



Εικόνα 2. Διάφορα είδη από φυτοπλαγκτόν.

ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Λιπίδια

Υδατάνθρακες

Πρωτεΐνες

Λιγνίνη

Κοινή για
όλους τους
οργανισμούς

Χερσαία φυτά

ΛΙΠΙΔΙΑ

Τα λιπίδια είναι αδιάλυτα στο νερό αλλά διαλυτά σε οργανικούς καταλύτες (χλωροφόρμιο, αιθέρας, ακετόνη, ελαφρά αλκάνια, αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Χρησιμοποιούνται ως αποθήκες ενέργειας.

Κύριες ομάδες: τα λίπη των οργανισμών, τα φυτικά έλαια, τα λιπαρά οξέα, οι χρωστικές και τα στεροειδή.

Απαντούν στους καρπούς, τους σπόρους, τα φρούτα, ενώ είναι άφθονα στο θαλάσσιο πλαγκτόν και τα διάτομα. Αποτελούν εξαιρετικούς βιοδείκτες της πρόδρομης οργανικής ύλης (π.χ. στερόλες)

Η χαρακτηριστική και πολύπλοκη δομή τους διατηρείται παρά τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα ιζήματα.

Χαρακτηριστικά λιπίδια είναι επίσης η χοληστερόλη, η β-καροτίνη, η φυτόλη κ.α.

ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΕΣ

Οι υδατάνθρακες περιλαμβάνουν τα σάκχαρα και τα πολυμερή.

Λειτουργούν σαν πηγές ενέργειας (άμυλο) αλλά και σαν ιστός υποστήριξης στα φυτά και μερικά ζώα (κυτταρίνη).

Συνεισφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό οξυγόνου λόγω υψηλής περιεκτικότητας (~50%).

Χαρακτηριστικοί υδατάνθρακες είναι η φρουκτόζη, η λακτόζη, η κυτταρίνη, οι πολυσακχαρίτες.

ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ

Οι πρωτεΐνες είναι συστατικά όλων των οργανισμών, με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στους ζωικούς οργανισμούς.

Αποτελούν βασικά συστατικά διαφορετικών δομικών στοιχείων των οργανισμών και στερεών μερών (δέρμα, μύες, νύχια, οπλές, τρίχες, ακίδες) ενώ συμμετέχουν και σε βιοχημικές αντιδράσεις όπως ένζυμα και ορμόνες.

Αποτελούν τον πολυμερισμό αμινοξέων και είναι η κύρια πηγή αζώτου.

Χαρακτηριστικές πρωτεΐνες είναι η αλανίνη, η λυσίνη, η μεθιονίνη, η τρυπτοφάνη κ.α.

ΛΙΓΝΙΝΗ

Η λιγνίνη (τα ξυλώδη) και οι συγγενικές τανίνες είναι διαδεδομένες ενώσεις στους φυτικούς οργανισμούς.

Περιέχει αρωματικές (φαινολικές) δομές και κυριαρχούν στους ιστούς των φυτών.

Είναι ανθεκτική στην βακτηριακή αποδόμηση και δημιουργεί έτσι την βασική δομή των χουμικών αποθέσεων.

Στα ιζήματα δημιουργεί κυρίως αέριους υδρογονάνθρακες και αλειφατικές αλυσίδες.

ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

Το οργανικό υλικό των ιζηματογενών σχηματισμών δύναται να είναι χερσαίας ή θαλάσσιας προέλευσης. Το οργανικό υλικό των ιζημάτων που προέρχεται από χερσαία περιβάλλοντα είναι πλούσιο σε ξυλώδη υλικά και κηρούς. Τα ξυλώδη αυτά υλικά αποτελούνται από κυτταρίνη, λιγνίνη καθώς και μικρή ποσότητα λιπιδίων. Η κυτταρίνη δύναται να βιοδιασπαστεί σε μεθάνιο, αιθάνιο, λόγω της συνεχούς αυξανόμενης θερμοκρασίας, εν αντιθέσει με τη λιγνίνη η οποία είναι ανθεκτικότερη και διατηρείται βαθιά κάτω από την επιφάνεια. Οι κηροί των φυτών δύναται να παράγουν μακριές αλυσίδες κανονικών αλκανίων ύστερα από τη θερμική αποδόμηση με αποτέλεσμα το αργό πετρέλαιο που περιέχει σε μεγάλο ποσοστό τέτοιες αλυσίδες, να σχετίζεται με παράκτια ιζηματογένεση και ειδικότερα σε δέλτα ποταμών. Το οργανικό υλικό των ιζημάτων που προέρχεται από υδάτινα περιβάλλοντα είναι πλούσιο σε άμορφο υλικό και σε υδρογόνο. Συναντάται διαλυμένο σε μορφή σωματιδίων ή σε κολλοειδή μορφή. Σημαντικές ποσότητες οργανικής ύλης σε θαλάσσια περιβάλλοντα πιθανόν να είναι αλλόχθονες και να προέρχονται από τη χέρσο (π.χ. θαλάσσιες ακτές, δέλτα ποταμών). Συνήθως, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη δημιουργία ορυκτών καυσίμων περιορίζεται στα ιζήματα που προήλθαν από υδάτινο περιβάλλον.

ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

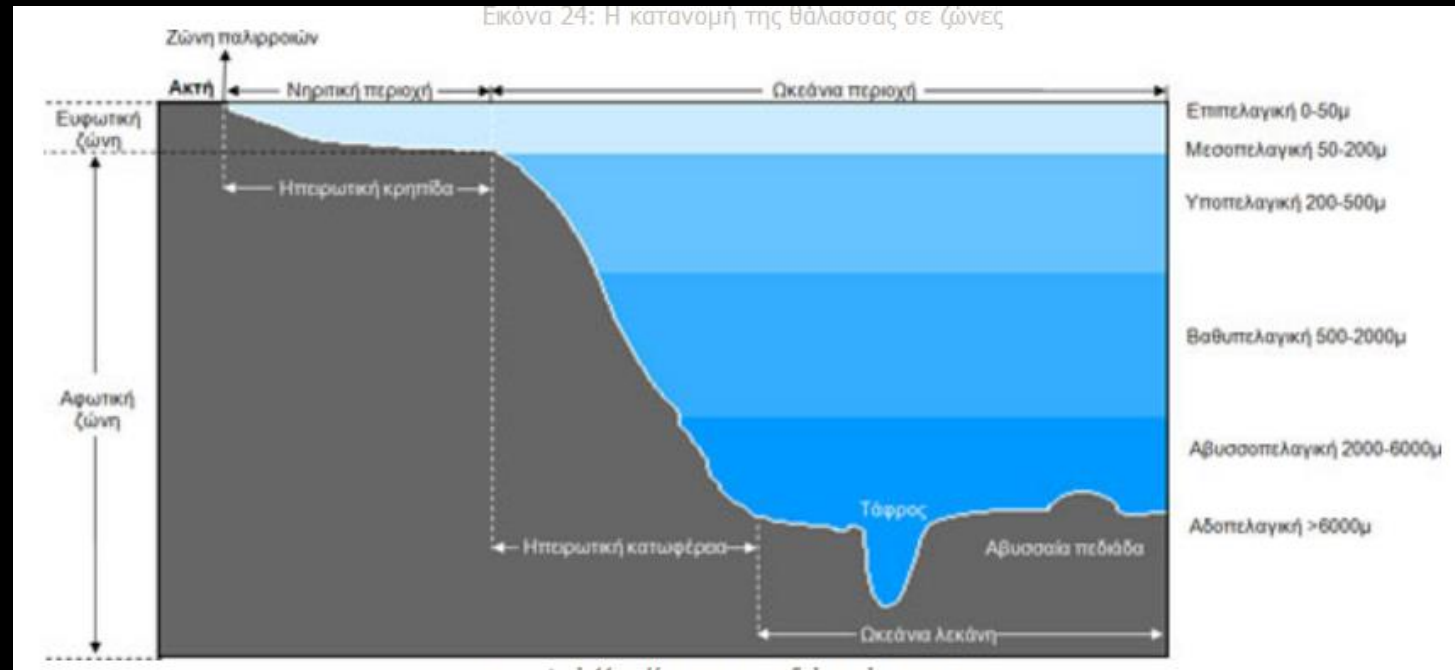
Οι βασικότερες προϋποθέσεις για τη δημιουργία ιζήματος πλούσιο σε οργανική ύλη είναι τόσο η παραγωγή του σε μεγάλες ποσότητες όσο και η διατήρηση αυτής (ανθεκτικότητα σε οξείδωση και βιοαποικοδόμηση). Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα της οργανικής ύλης είναι η **παραγωγικότητα** και η **διατήρηση**.

Η οργανική ύλη στα υδατικά περιβάλλοντα δημιουργείται μέσω της φωτοσύνθεσης του φυτοπλαγκτόν. Η **παραγωγικότητα** της φωτοσύνθεσης καθορίζει την ανάπτυξη των υπόλοιπων μορφών ζωής (ζωοπλαγκτόν και ανώτεροι οργανισμοί). Υψηλή παραγωγικότητα συνοδεύεται από αντίστοιχη έντονη παρουσία βακτηρίων, τα οποία αναπτύσσονται αποδομώντας τους νεκρούς ζωικούς και φυτικούς οργανισμούς. Έτσι, η παραγωγικότητα επηρεάζεται από τους μηχανισμούς της φωτοσύνθεσης, δηλαδή από την ένταση ηλιακού φωτός-ακτινοβολίας, τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων θρεπτικών συστατικών καθώς και τη θερμοκρασία.

Η ένταση της ακτινοβολίας αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα, διότι ορίζει την ευφωτική ζώνη, η οποία δύναται να οριοθετήσει τις περιοχές της υφαλοκρηπίδας, καθώς και το ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιείται η φωτοσύνθεση. Ένας ακόμα καθοριστικός παράγοντας της αναπλήρωσης των θρεπτικών συστατικών άρα και της παραγωγικότητας, θεωρείται το φαινόμενο της ανάβρυσης, κατά το οποίο τα θαλάσσια ρεύματα που προέρχονται από τα μεγάλα ωκεάνια βάθη να φθάνουν στην ευφωτική ζώνη με παράλληλη συνεισφορά ανόργανων συστατικών και οξυγόνου. Ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα με καλή ανακύκλωση της στήλης του νερού και τροφοδοσία από χερσαίες πηγές θεωρούνται εξαιρετικά παραγωγικά. Τέτοια περιβάλλοντα είναι οι υφαλοκρηπίδες και οι εκβολές μεγάλων ποταμών.

ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΣΤΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

Η διατήρηση, δηλαδή η δυνατότητα της οργανικής ύλης να αντιστέκεται στην οξείδωση και τελικά να διατηρείται με αποτέλεσμα να υπάρχει ικανοποιητική τελική συγκέντρωση αυτής στο ίζημα, εξαρτάται από τη σύσταση οργανικού υλικού, την περιεκτικότητα του οξυγόνου στο ίζημα, το ρυθμό ιζηματογένεσης, την κοκκομετρία καθώς και το είδος των ορυκτών. Γενικότερα, ένα ανοξικό περιβάλλον (συγκέντρωση οξυγόνου $\leq 0,1$ ml/l) ευνοεί τη διατήρηση της οργανικής ύλης διότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου, τόσο εντονότερος είναι ο ρυθμός της βιοαποικοδόμησης. Κατάλληλα περιβάλλοντα διατήρησης της οργανικής ύλης θεωρούνται οι λίμνες και οι λιμνοθάλασσες.



Εικόνα 4. Κατανομή της θάλασσας σε ζώνες.

ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

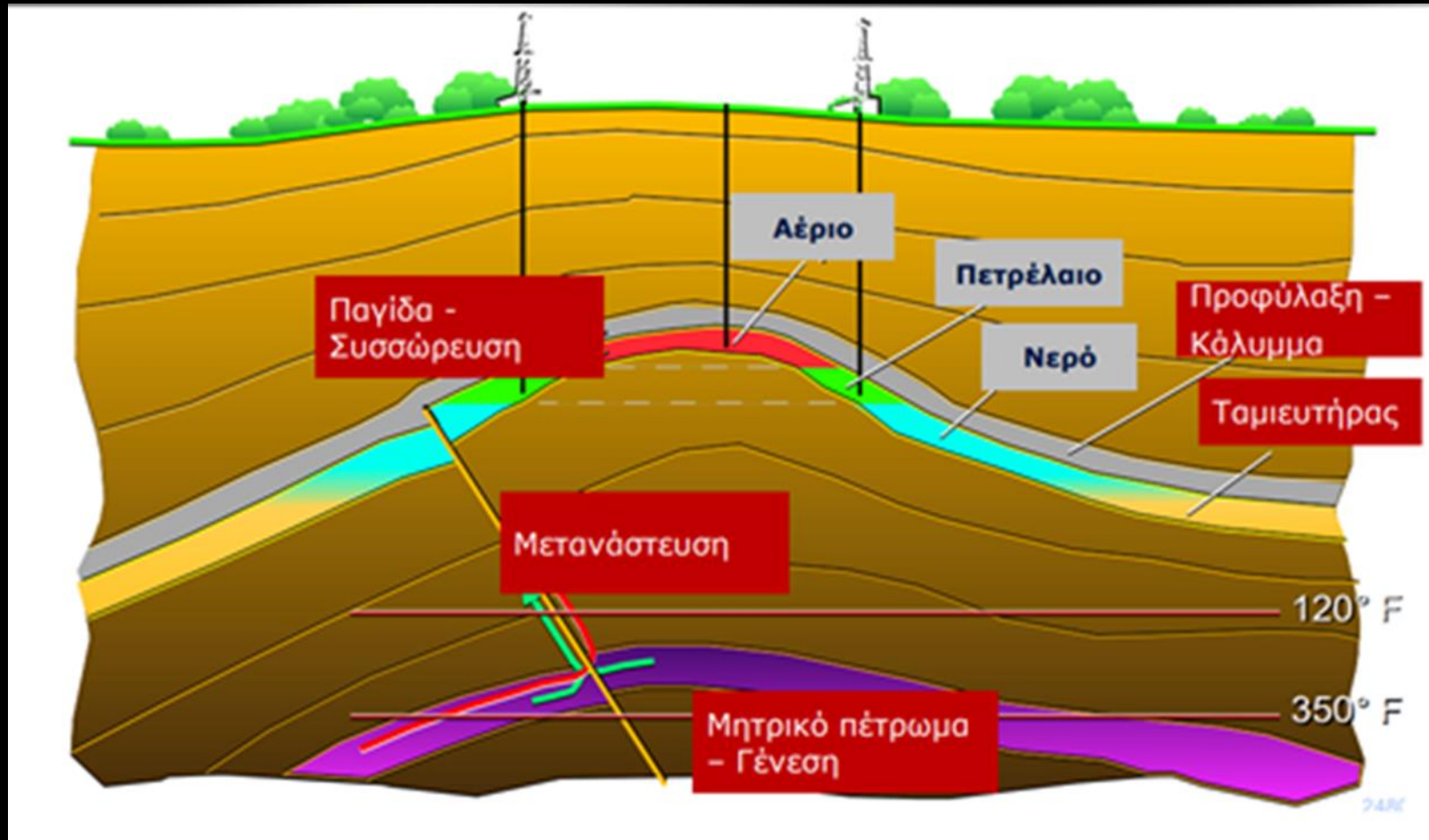
Για τη γένεση, συγκέντρωση και τελικά παραγωγή των υδρογονανθράκων θα πρέπει να τηρούνται κάποιες βασικές γεωλογικές συνθήκες, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 5.

- Μητρικό πέτρωμα (source rock): είναι το πέτρωμα που γεννά το πετρέλαιο. Κυρίως πρόκειται για λεπτόκοκκα ιζήματα τα οποία δημιουργούνται στο φυσικό τους περιβάλλον από αποσάθρωση (π.χ. ψαμμιτικοί σχηματισμοί σε περιβάλλοντα όπως θάλασσες, ποταμοί κ.λπ.).
- Ταμιευτήρας υδρογονανθράκων (reservoir): είναι ο σχηματισμός στον οποίο πραγματοποιείται η συσσώρευση των υδρογονανθράκων (ανθρακικοί, αμμούχοι). Βασικούς παράγοντες για την ύπαρξη σχηματισμού-ταμιευτήρα αποτελούν το υψηλό πορώδες και η διαπερατότητα του. Το πορώδες του ταμιευτήρα επηρεάζει σημαντικά τα αποθέματα ενός πιθανού ή υπαρκτού πετρελαϊκού πεδίου, ενώ η διαπερατότητα επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο τα πετρελαϊκά ρευστά μπορούν να κινηθούν έξω από τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

- Σχηματισμός προφύλαξης – κάλυμμα (cap rock): είναι εκείνος ο σχηματισμός χαμηλής διαπερατότητας που αποτελεί κάλυμμα για την αναστολή της διαφυγής των υδρογονανθράκων από τους πόρους προς την επιφάνεια. Λειτουργεί δηλαδή σαν μονωτήρας ώστε να μονώσει το πετρέλαιο στη μονάδα αποθήκευσης του. Το ιδανικό πέτρωμα κάλυψης είναι από λεπτόκοκκη λιθολογία, και είναι εύπλαστο και πλευρικά συνεχές (π.χ. φλύσχης, εβαπορίτες, σχιστόλιθοι κ.λπ.).
- Παγίδες υδρογονανθράκων (traps): γεωλογικοί σχηματισμοί που βοηθούν στη φυλάκιση του πετρελαίου και στη διατήρηση υψηλής συγκέντρωσης του. Πρακτικά, οι παγίδες λειτουργούν ως ένα υποεπιφανειακό εμπόδιο στη μετανάστευση του πετρελαίου προς την επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα την τοπική συγκέντρωση πετρελαίου. Υπάρχουν διάφορα είδη παγίδων όπως οι δομικές, στρωματογραφικές και υδροδυναμικές παγίδες.
- Ρήγματα και διακλάσεις: δημιουργούν διόδους για τη μετανάστευση του πετρελαίου.

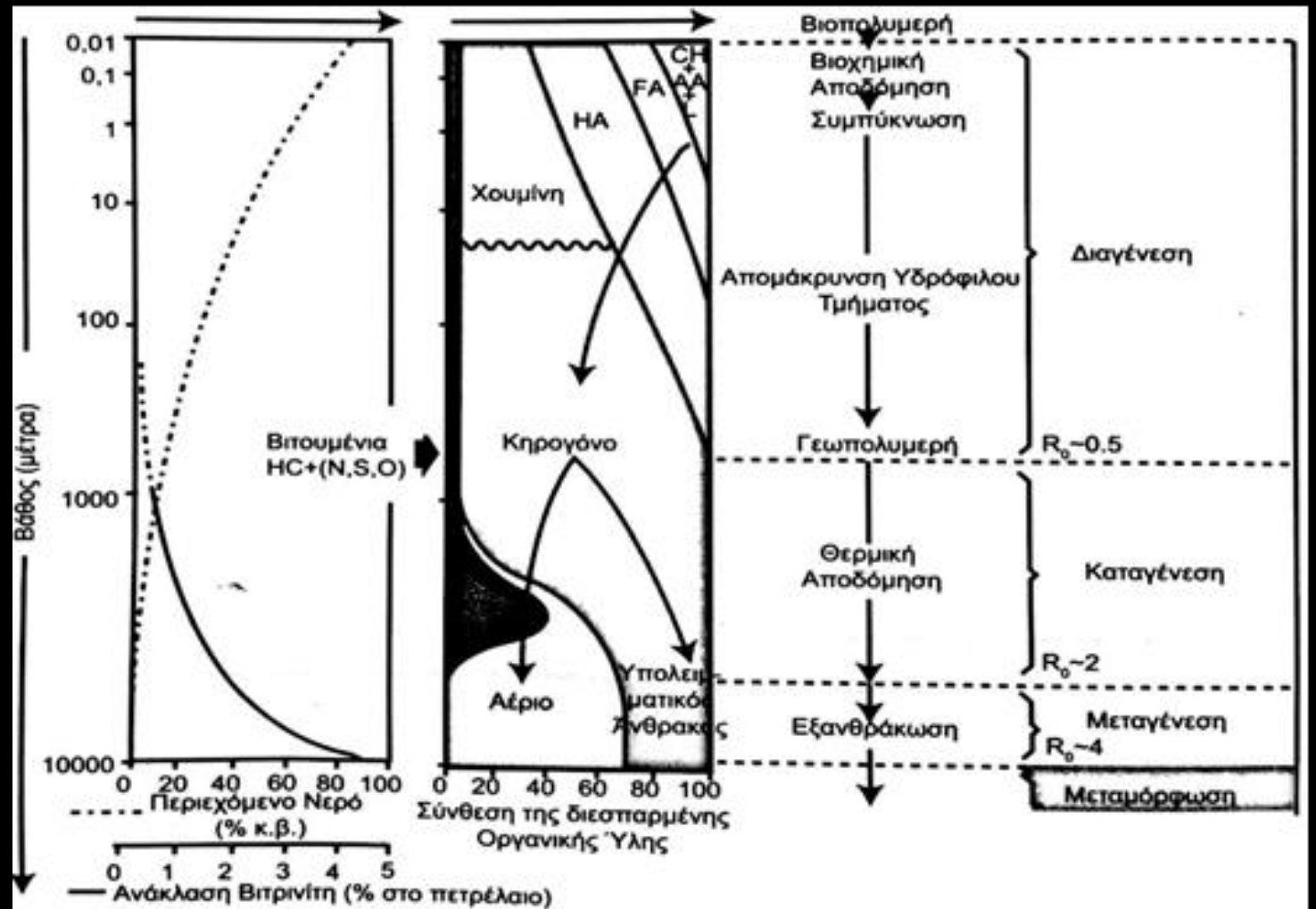
ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ



Εικόνα 5. Προϋποθέσεις ύπαρξης πετρελαϊκού συστήματος (Τζαναβάρη Ιωάννα, 2017).

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ

Μετά τον θάνατο των έμβιων οργανισμών, η οργανική ύλη συσσωρεύεται και διατηρείται στα ιζήματα και στα ιζηματογενή πετρώματα, συνυπάρχοντας φυσικά με διάφορα ορυκτά και νερό. Στο σύνολο αυτών, επιδρούν διαφορετικές φυσικοχημικές διεργασίες οι οποίες εξαρτώνται από το νερό που κυκλοφορεί στους πόρους καθώς και τη σύσταση του, την πίεση, την θερμοκρασία, το ρυθμό της βιοαποικοδόμησης καθώς και το χρόνο. Οι διεργασίες αυτές, έχουν ως αποτέλεσμα τον μετασχηματισμό της οργανικής ύλης και διακρίνονται σε τέσσερα στάδια: **διαγένεση**, **καταγένεση**, **μεταγένεση** και **μεταμόρφωση**.



Εικόνα 6. Διεργασίες μετασχηματισμού της οργανικής ύλης στα ιζήματα (Tissot and Welte, 1984).

ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ

Οι θειοενώσεις που δημιουργούνται από την αντίδραση της οργανικής ύλης με το παραγόμενο θείο δύνανται να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για το περιβάλλον απόθεσης της οργανικής ύλης. Πιο συγκεκριμένα, η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο σηματοδοτεί θαλάσσια περιβάλλοντα σε αντίθεση με χερσαία περιβάλλοντα χαμηλής αλατότητας.

Είναι λογικό, πως οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά το στάδιο της διαγένεσης επηρεάζουν τη στοιχειακή σύσταση της οργανικής ύλης (συγκεντρώσεις άνθρακα υδρογόνου, αζώτου, θείου και οξυγόνου).

Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί πως κατά τη δημιουργία γεωμονομερών και γεωπολυμερών δε συμμετέχει το σύνολο του οργανικού υλικού που βρίσκεται στα ιζήματα. Αυτό συμβαίνει, διότι κάποια μόρια διατηρούν την αρχική τους δομή λόγω χημικής αδράνειας (π.χ. μόρια που προέρχονται από λιπίδια, λιγνίνη). Έτσι, διαμορφώνουν το κλάσμα των βιτουμενίων και αποτελούν μέρος των υδρογονανθράκων που θα δημιουργηθούν στα επόμενα στάδια. Για όλα τα παραπάνω, τα μόρια αυτά είναι ιδιαίτερης σημασίας διότι δύνανται να διατηρήσουν σε μεγάλο βαθμό τη δομή και τα βιολογικά χαρακτηριστικά τους, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως βιοδείκτες και να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τον προσδιορισμό της προέλευσης της οργανικής ύλης.

Συνοψίζοντας, το θερμοκρασιακό επίπεδο των 50-60°C, θεωρείται το τέλος της διαγένεσης καθώς όλες οι οργανικές ουσίες έχουν μετατραπεί και υφίστανται μόνο ως κηρογόνο, βιτουμένιο και ποσότητες αέριων υδρογονανθράκων κυρίως βιογενές αερίου ενώ παράλληλα υφίσταται ένα μικρό κλάσμα υδρογονανθράκων που είναι διαθέσιμο ώστε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πετρελαίου στα επόμενα στάδια.

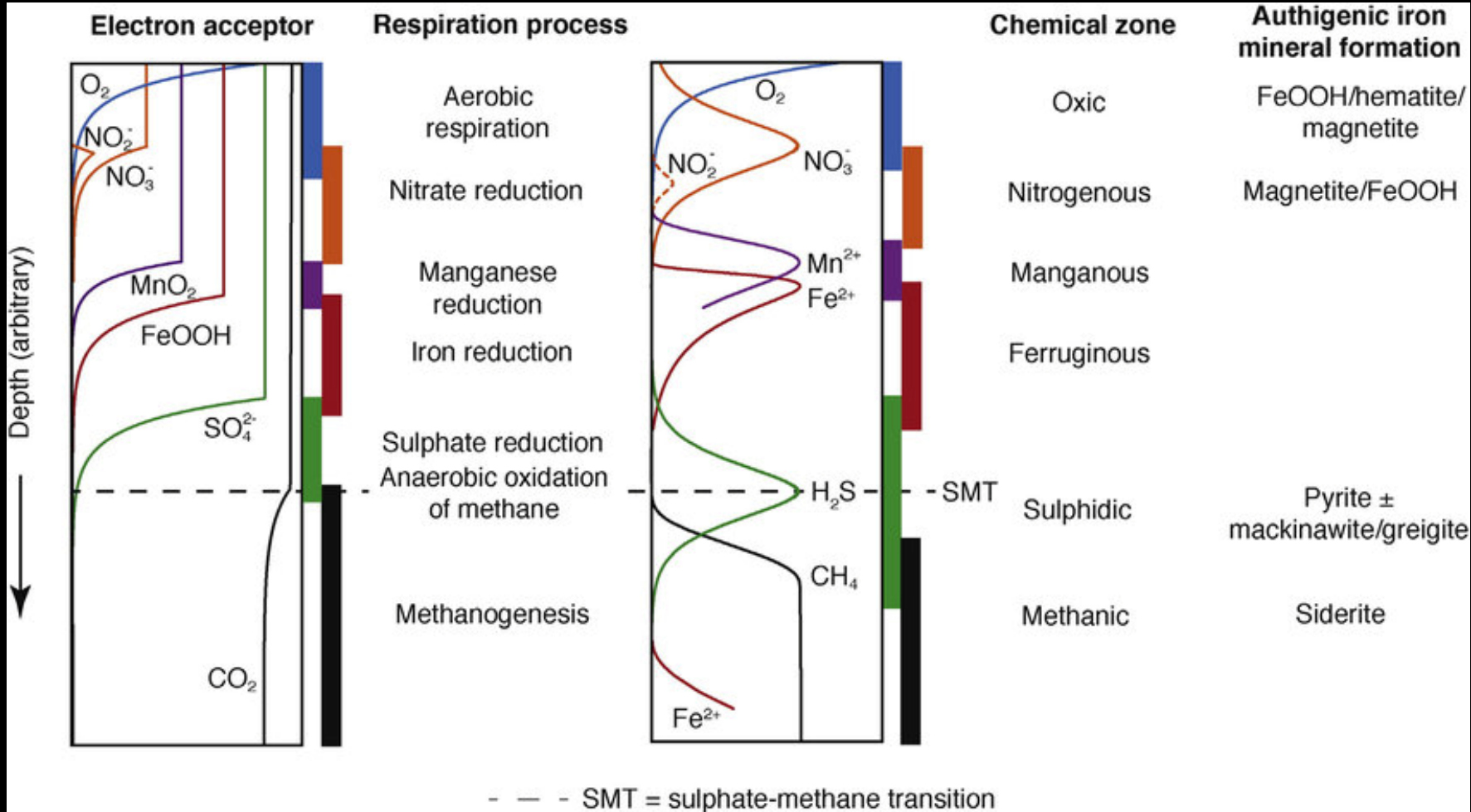
ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ

Μετά την απόθεση του οργανικού υλικού και τη διατήρηση του στα ιζήματα χωρίς οξείδωση, ξεκινά το πρώτο στάδιο μετασχηματισμού της οργανικής ύλης, το στάδιο της διαγένεσης. Η διαγένεση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία έως 60 °C και έως 1 km σε βάθος ταφής της οργανικής ύλης.

Αρχικά, ξεκινά η αποδόμηση των βίο-πολυμερών σε μικρότερα, τα γεωμονομερή, μέσω υδρόλυσης, με διαφορετικό ρυθμό για κάθε ομάδα συστατικών της οργανικής ύλης, λόγω κυρίως βακτηριακής δραστηριότητας. Αρχικά, αποδομούνται οι πρωτεΐνες, ακολουθούν οι υδατάνθρακες και τέλος τα λιπίδια και η λιγνίνη, αφού χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη σταθερότητα στη δομή τους.

Με τη διάσπαση της οργανικής ύλης αποβάλλεται διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο και μεθάνιο, ενώ παραμένει ένα αδιάλυτο υπόλειμμα που συμμετέχει στη σύνθεση του κηρογόνου.

ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ



Εικόνα 7. Κατανομή του βάθους των ιζηματογενών διαγενετικών ζωνών που προκαλούνται από οξειδοαναγωγή (επεξεργασμένο από: Canfield and Thamdrup (2009) and Jørgensen and Kasten (2006)).

ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ

Τα γεωμονομερή, αποδομούνται στη διεπιφάνεια του ιζήματος λόγω δραστηριότητας αερόβιων βακτηρίων ενώ καθώς το βάθος αυξάνει, η αποδόμηση συνεχίζεται λόγω της ανάπτυξης αναερόβιων βακτηρίων, σύμφωνα με την αντίδραση της ζύμωσης και με αποτέλεσμα τη δημιουργία βιογενούς αερίου.

Παράλληλα, τα γεωμονομερή που προέκυψαν, ενώνονται και δημιουργούν νέες δομές, τα γεωπολυμερή. Τα γεωπολυμερή χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη σταθερότητα στη χημική τους δομή και υψηλότερη αντοχή στη βακτηριακή αποδόμηση. Μέσω της συσσωμάτωσης των δημιουργημένων γεωπολυμερών προκύπτει το **κηρογόνο**. Το θείο που ανάχθηκε από τα αναερόβια βακτήρια ενσωματώνεται στο κηρογόνο και επηρεάζει τόσο την κινητική των υδρογονανθράκων, όσο και την περιεκτικότητα του πετρελαίου σε θείο.

ΚΗΡΟΓΟΝΟ

Το κηρογόνο είναι το τελικό προϊόν της διαγένεσης και ορίζεται ως το αδιάλυτο οργανικό υλικό των ιζηματογενών πετρωμάτων σε οργανικούς διαλύτες, στο νερό και σε οξυγονούχα οξέα. Βέβαια, το κηρογόνο διατηρείται και στα επόμενα στάδια μετασχηματισμού της οργανικής ύλης μέχρι τη μεταμόρφωση. Όταν αυτό θερμανθεί στον γήινο φλοιό της Γης σε θερμοκρασία περίπου 90°C απελευθερώνει υγρούς υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο), ενώ σε θερμοκρασία περίπου 150 °C απελευθερώνει αέριους υδρογονάνθρακες (φυσικό αέριο).

Το κηρογόνο αποτελείται από δομές, οι οποίες εμφανίζουν διάφορα στοιχεία των οργανισμών (π.χ. ιστοί, σπόροι κ.λπ.). Οι δομές αυτές, ορίζονται ως οργανικά δομικά συστατικά (macerals), οι σημαντικότεροι τύποι των οποίων είναι ο βιτρινίτης, ο εξινίτης και ο ινετρινίτης. Ο βασικότερος εξ αυτών θεωρείται ο βιτρινίτης ο οποίος προέρχεται από ξυλώδους ιστούς ανώτερων φυτών. Ο εξινίτης, προέρχεται από φύκη, σπόρους και κηρούς φύλλων. Τέλος, ο ινετρινίτης προέρχεται από διαφορετικό είδος οργανικής ύλης, το οποίο δεν έχει υποστεί οξείδωση (Durand, 1980; Πασαδάκης, 2015).

ΚΗΡΟΓΟΝΟ

Επιπροσθέτως, το κηρογόνο κατατάσσεται σε τέσσερις βασικούς τύπους (I, II , III, IV) σύμφωνα με το μοντέλο του van Krevelen που χρησιμοποιεί την αναλογία H/C και O/C (Tissot and Welte, 1984; Nunez-Betelu et al., 1994; Vandenbroucke et al., 2007; Πασαδάκης, 2015). Αναλυτικότερα:

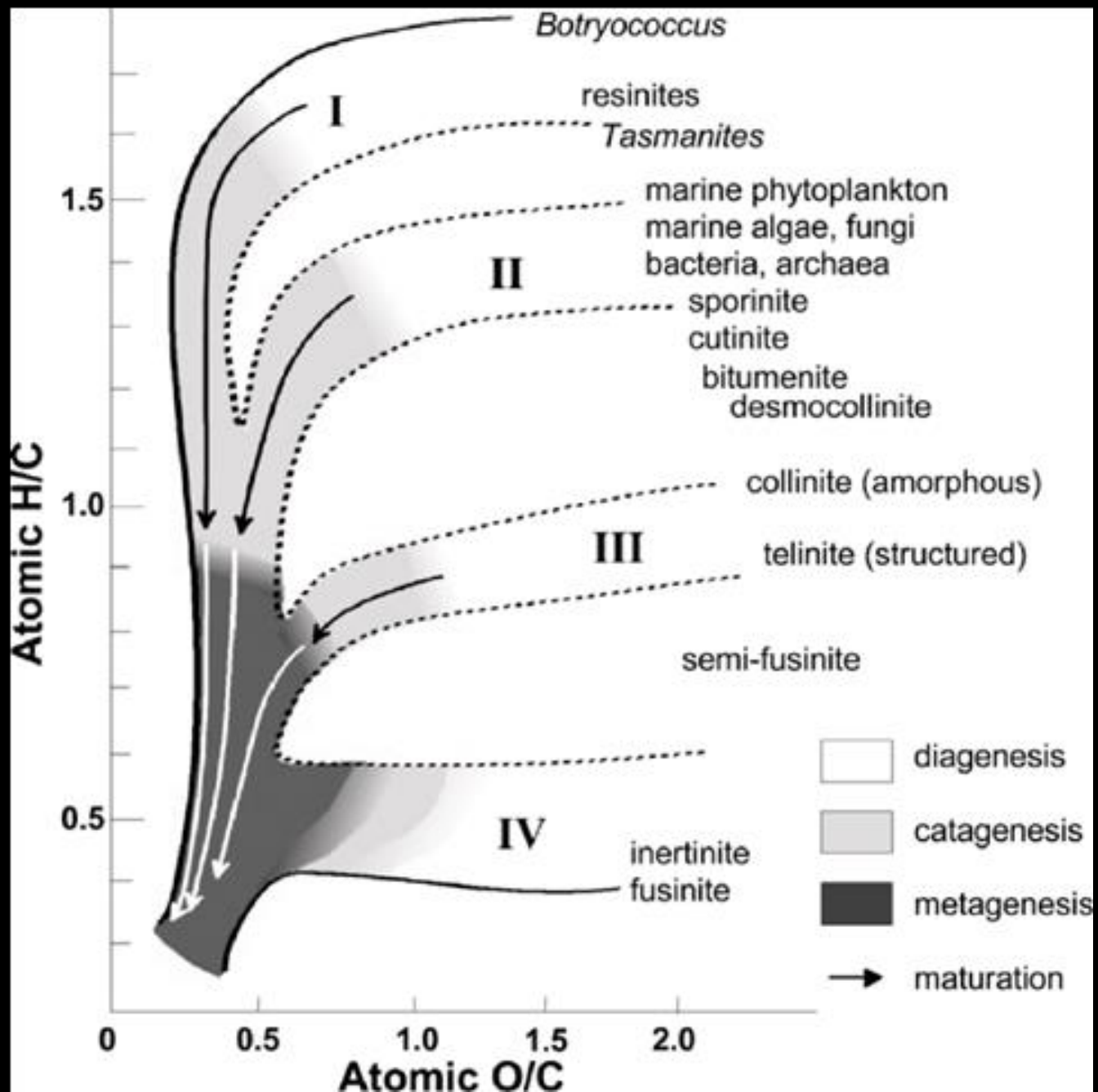
- **Τύπος I:** πρόκειται για κηρογόνο με υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο και χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου. Ο τύπος κηρογόνου I κατέχει την μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής υδρογονανθράκων, τόσο υγρών όσο και αέριων. Προέρχεται κυρίως από λιπίδια της οργανικής ύλης και από λιμναία φύκη ή φύκη σε σε αβαθή θαλάσσια περιβάλλοντα. Χημικά, περιέχει κυρίως λιπτινίτη, αλγινίτη και αλειφατικές αλυσίδες.
- **Τύπος II:** πρόκειται για κηρογόνο με ενδιάμεσες περιεκτικότητες υδρογόνου και οξυγόνου. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που εμφανίζεται με υψηλές συγκεντρώσεις θείου. Θεωρείται ο πιο διαδεδομένος τύπος κηρογόνου και παράγει κυρίως υγρούς και λιγότερο αέριους υδρογονάνθρακες. Η προέλευση του είναι διαφορετική από τον τύπο I, συνήθως από θαλάσσια άλγη (φύκη) και σπόρους φυτών σε θαλάσσια περιβάλλοντα με αναγωγικές συνθήκες. Τα βασικά οργανικά δομικά συστατικά που τον αποτελούν είναι ο εξινίτης, ο κουτινίτης κ.λπ.). Χημικά, είναι περιέχει κυρίως αλειφατικές αλυσίδες αλλά και ναφθενικά και αρωματικά συστατικά.

ΚΗΡΟΓΟΝΟ

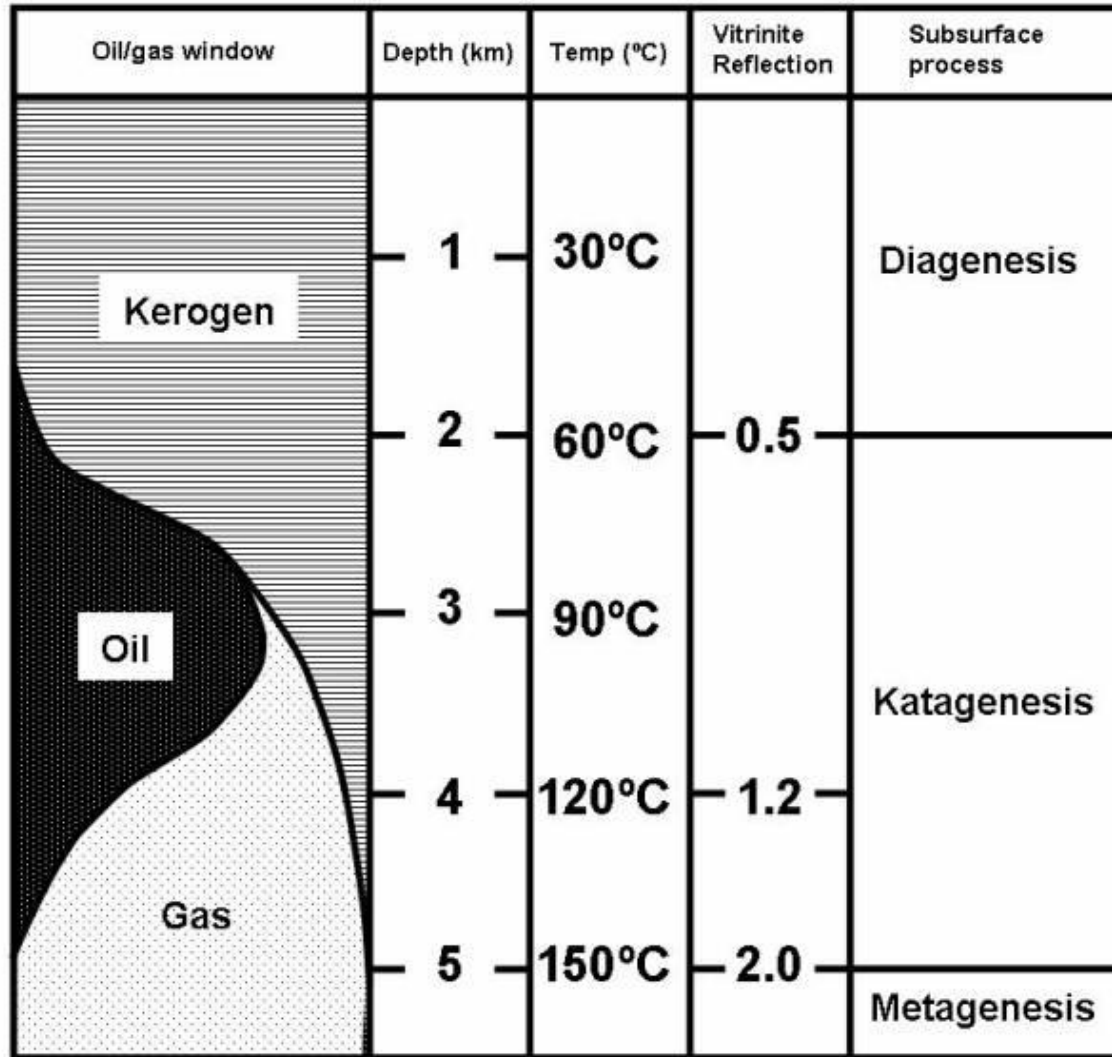
- **Τύπος III:** πρόκειται για κηρογόνο, με υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο και αρκετά έως πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Παρουσιάζει τη χαμηλότερη δυνατότητα γένεσης υδρογονανθράκων και παράγει κυρίως αέριους υδρογονάνθρακες σε μεγάλα βάθη και υψηλές θερμοκρασίες. Θεωρείται πως έχει χερσαία προέλευση από κυτταρίνη και λιγνίνη και απαντάται συνήθως σε παράκτιους σχηματισμούς κλαστικών ιζημάτων. Το βασικό δομικό συστατικό του είναι ο βιτρινίτης. Χημικά, περιλαμβάνει κυρίως πολυαρωματικές δομές.
- **Τύπος IV:** πρόκειται για κηρογόνο με ιδιαίτερα χαμηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου και πολύ υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Δε διαθέτει την ικανότητα να παράγει υδρογονάνθρακες. Αναφέρεται πως προκύπτει από οξείδωση κηρογόνου διαφορετικής προέλευσης και το βασικό οργανικό δομικό συστατικό του είναι ο ινετρινίτης. Χημικά, εμφανίζεται υπό τη μορφή πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων.

ΚΗΡΟΓΟΝΟ

Εικόνα 8. Διάγραμμα Van Krevelen που δείχνει την κατανομή των τύπων κηρογόνου σε σχέση με τους λόγους H/C και O/C. (Clifford Walters, 2007)



ΚΗΡΟΓΟΝΟ



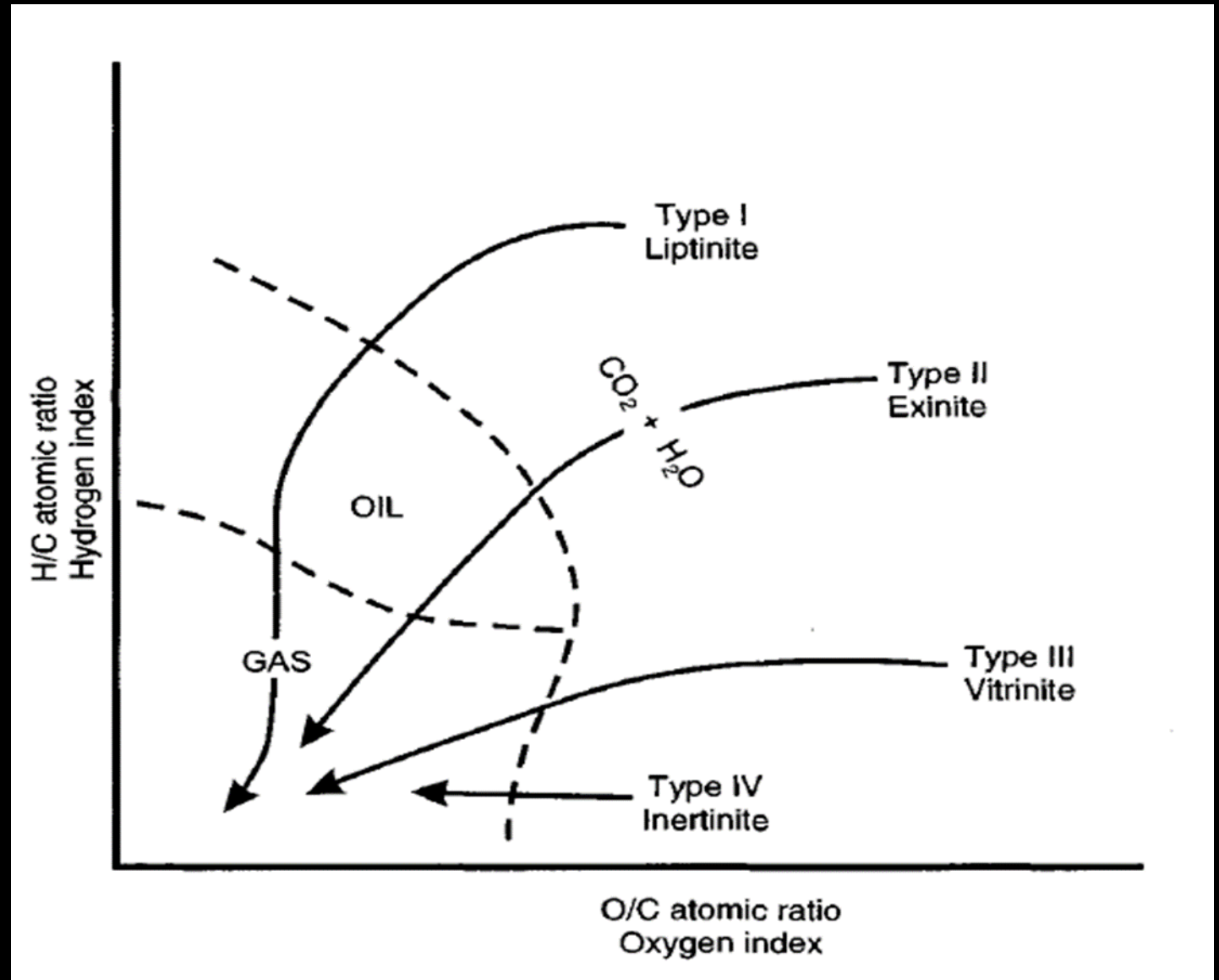
Types of Kerogen and Their Hydrocarbon Potential

Environment	Kerogen Type	Kerogen Form	Origin	HC Potential
Aquatic	I	Alginite	Algal bodies	Oil
		Amorphous Kerogen	Structureless debris of algal origin	
			Structureless planktonic material, primarily of marine origin	
Terrestrial	II	Exinite	Skins of spores and pollen, cuticle of leaves and herbaceous plants	Gas, some oil
	III			
	IV	Inertinite	Oxidized, recycled woody debris	None

Εικόνα 9,10. Οι τύποι του κηρογόνου και το δυναμικό των υδρογονανθράκων.

ΚΗΡΟΓΟΝΟ

Εικόνα 11. (Gluyas and Swarbrick, 2004)



ΚΗΡΟΓΟΝΟ

Ανάλογα με την προέλευση μπορεί ο τύπος κηρογόνου σε ένα ίζημα να είναι μικτός και ασαφής ανάμεσα σε δυο τύπους.

Ανάλογα με το επίπεδο της θερμικής ωριμότητας των κηρογόνων, διακρίνονται σε:

Ανώριμα (όπου δεν παράγονται βιτουμένια αλλά παράγεται βιογενές αέριο από οργανισμούς)

Ώριμα (όπου παράγονται βιτουμένια από την θερμική διάσπαση του κηρογόνου)

Υπερώριμα (όπου έχει ολοκληρωθεί η θερμική παραγωγή βιτουμενίων και μπορεί να παραχθεί μόνο μεθάνιο)

Η ποσότητα και ποιότητα του κηρογόνου στα μητρικά πετρώματα ελέγχεται από:

- Το ρυθμό απόθεσης και ταφής
- Το λόγο χερσαίας και θαλάσσιας τροφοδοσίας
- Το οξειδοαναγωγικό καθεστώς του περιβάλλοντος απόθεσης

Η ποσότητα του κηρογόνου στα μητρικά πετρώματα υπολογίζεται με το %TOC (ποσοστό βάρους)

Η ποιότητα του κηρογόνου συνήθως εκφράζεται με κιλά υδρογονανθράκων ανά τόνο πετρώματος.

ΚΑΤΑΓΕΝΕΣΗ

Με το πέρας του σταδίου της διαγένεσης, η ωρίμανση του οργανικού υλικού συνεχίζεται στο στάδιο της καταγένεσης. Η καταγένεση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 60-170 °C και σε βάθος ταφής της οργανικής ύλης σε 1-4 km, όπου οι ήδη υπάρχοντες υδρογονάνθρακες υφίστανται θερμική πυρόλυση με αποτέλεσμα δημιουργούνται μεγάλα ποσά υδρογονανθράκων (υγρών και αέριων).

Αρχικά, διασπώνται οι δεσμοί των μορίων του κηρογόνου με αποτέλεσμα την ελάττωση της συγκέντρωσης των ετεροατόμων που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Έτσι, η συγκέντρωση του οξυγόνου μειώνεται αισθητά, γεγονός που φαίνεται και στο διάγραμμα Van Krevelen. Επιπλέον, η αποσύνθεση του κηρογόνου, με τη διάσπαση των δεσμών άνθρακα, οδηγεί στη μείωση της αναλογία H/C, με συνέπεια το βαθμιαίο εμπλουτισμό του σε αρωματικές δομές.

Στη συνέχεια, η αναλογία ανάμεσα στο αέριο και το πετρέλαιο αυξάνεται αισθητά αφού οι ήδη υπάρχοντες υδρογονάνθρακες αποσυντίθενται σε μικρότερα μόρια.

Κατά το τέλος της καταγένεσης, έχουν σχηματιστεί σημαντικές ποσότητες πετρελαίου, συμπυκνωμάτων καθώς και υγρό αέριο με μεγάλα ποσά περιεχόμενου μεθανίου (Tissot and Welte, 1978; Hunt, 1979; Vandenbroucke et al., 2007; Πασαδάκης, 2015).

ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΗ

Μετά την καταγένηση, ακολουθεί το τελευταίο στάδιο μετασχηματισμού του οργανικού υλικού, το στάδιο της μεταγένεσης. Λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες περίπου 150-250°C και σε μεγάλα βάθη έως 10km. Στο στάδιο αυτό, παράγεται ξηρό αέριο (μεθάνιο).

Ειδικότερα, η παραγωγή του μεθανίου προκύπτει μέσω της διάσπασης των δεσμών άνθρακα των υδρογονανθράκων που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα στάδια.

Παράλληλα, στο απομένον κηρογόνο, λόγω αναδιοργάνωσης των αρωματικών δομών, δημιουργούνται στερεές δομές, τα πυροβιτουμένια.

Το τέλος της μεταγένεσης θεωρείται πως συμβαίνει έως του 300°C, θερμοκρασία κατά την οποία ξεκινά η μεταμόρφωση των ορυκτών, όπου δύναται να παραχθεί όξινο αέριο με υψηλές συγκεντρώσεις υδρόθειου (H₂S) μέσω θερμικής αναγωγής θειικών ενώσεων.