



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ – ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΘΡΚΑΚΩΝ

ΚΟΥΓΙΟΥΛΗΣ ΧΡΙΣΤΟΣ

ΑΕΜ: 5125

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018





Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Γεωργακόπουλο Ανδρέα, που μου έδωσε την δυνατότητα να πραγματοποιήσω την παρούσα πτυχιακή εργασία.

Επίσης θα ήθελα ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλμπανάκη Κωνσταντίνο, καθώς επίσης και την Διδάκτορα κ. Κολιαδήμου Καλλιόπη, για την πολύτιμη καθοδήγηση τους κατά την συγγραφή του τρίτου κεφαλαίου της εργασίας.



Περίληψη

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η εξέταση της μοντελοποίησης ταμιευτήρων υδρογονανθράκων, από το αρχικό γεωλογικό στάδιο της ερμηνείας σεισμικών δεδομένων, έως την τελική ροή εργασίας που ακολουθείται από τους μηχανικούς ταμιευτήρων.

Τα αρχικά κεφάλαια της εργασίας έχουν κυρίως γεωλογικό χαρακτήρα, και εξετάζουν συνοπτικά την ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων, εισάγοντας κεντρικές έννοιες της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών, όπως οι στρωματογραφικές ακολουθίες, η κίνηση της ακτογραμμής, η ερμηνεία των επαφών, και ο διαχωρισμός των ακολουθιών σε υποενότητες.

Έπειτα, εξετάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι κύριοι τύποι ταμιευτήρων υδρογονανθράκων, οι ψαμμιτικοί και οι ανθρακικοί.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες γεωστατιστικής που χρησιμοποιούνται από μηχανικούς και λογισμικά για την καλύτερη προσομοίωση των γεωλογικών σχηματισμών, όπως τα βαριογράμματα. Έπειτα, εξετάζεται η στατιστική προσέγγιση Kriging και ορισμένες παραλλαγές της, όπως Simple Kriging, Ordinary Kriging, CoKriging και Kriging with External Drift.

Υστερα, εξετάζεται η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων γεωστατικής προσέγγισης, στις τρεις βασικές μορφές μοντελοποίησης, pixel based, object based και texture based.

Τέλος, αναλύεται η ροή εργασίας που ακολουθείται κατά την διάρκεια μοντελοποίησης. Εισάγονται οι έννοιες του rock model και property model παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές παράμετροι προς εξέταση, δηλαδή το πορώδες, η διαπερατότητα, και η αλληλεπίδραση των παραπάνω παραμέτρων.

Λέξεις κλειδιά :

Στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών, Γεωστατιστική, Kriging, pixel based modeling, rock model, property model



Abstract

The target of the present thesis was the examination of the modeling of petroleum reservoir, from the initial geological concepts, to the work flow used by reservoirs engineers.

The first chapters of the thesis revolve around geology, and briefly examine the interpretation of seismic data. Information regarding fundamental sequence stratigraphy concepts is provided, such as stratigraphic sequences, shoreline trajectories, and system tracts.

Additionally, the main types of hydrocarbon reservoirs, siliclastic and carbonate, are examined in greater detail

In the next chapters, fundamental principles of geostatistics are analyzed. Those concepts include variograms, and the different forms of Kriging such as Simple Kriging, Ordinary Kriging, CoKriging and Kriging with External Drift.

The implementation of these principles in the form of pixel based, object based and texture based modeling is examined later.

Finally, the thesis briefly touches upon the work flow used in modeling of petroleum reservoir. Concepts such as rock model and property model, permeability and porosity are introduced and examined.

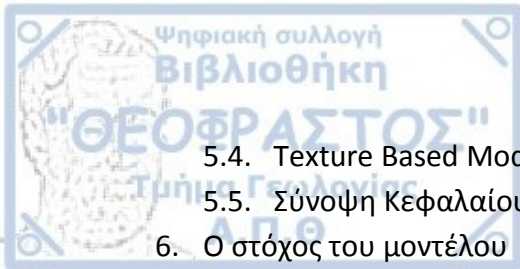
Key Words:

Sequence stratigraphy, Geostatistics, Kriging, pixel based modeling, rock model, property model.



Περιεχόμενα

- Περίληψη - Abstract
- Περιεχόμενα
 1. Εισαγωγή
 2. Σεισμικά Δεδομένα
 - 2.1. Direct Hydrocarbon Indicators
 3. Sequence Stratigraphy
 - 3.1. Εισαγωγικές Έννοιες
 - 3.2. Shoreline Trajectories
 - 3.3. System Tracts
 - 3.3.1. Highstand System Tract
 - 3.3.2. Falling Stage System Tract
 - 3.3.3. Lowstand System Tract
 - 3.3.4. Transgressive System Tract
 - 3.4. Stratigraphic Surfaces
 - 3.4.1. Subaerial Unconformity
 - 3.4.2. Correlative Conformity
 - 3.4.3. Basal Surface of Forced Regression
 - 3.4.4. Regressive Surface of Marine
 - 3.4.5. Maximum Regressive Surface
 - 3.4.6. Maximum Flooding Surface
 - 3.5. Stratal Terminations
 4. Τύποι Ταμιευτήρων
 - 4.1. Ταμιευτήρες Αιολικού Περιβάλλοντος
 - 4.2. Ταμιευτήρες Ποτάμιου Περιβάλλοντος
 - 4.3. Ταμιευτήρες Δελταϊκού Περιβάλλοντος
 - 4.4. Ταμιευτήρες Ρηχού Θαλάσσιου Περιβάλλοντος
 - 4.5. Ταμιευτήρες Βαθέως Θαλάσσιου Περιβάλλοντος
 - 4.6. Ανθρακικοί Ταμιευτήρες
 5. Γεωστατιστική
 - 5.1. Γενικές Έννοιες Γεωστατιστικής
 - 5.2. Pixel Based Modeling
 - 5.3. Object Based Modeling



- 5.4. Texture Based Modeling
- 5.5. Σύνοψη Κεφαλαίου
- 6. Ο στόχος του μοντέλου
 - 4.1. Πιθανοί στόχοι ενός μοντέλου
- 7. Rock Model
 - 4.1. Model Framework - Model Elements
 - 4.2. Δομικά Χαρακτηριστικά - Ρήγματα
 - 4.3. Model Elements
- 8. Property Model
 - 5.1. Πορώδες
 - 5.2. Διαπερατότητα
 - 5.3. Σχέση Διαπερατότητας - Πορώδους
- 9. Βιβλιογραφία

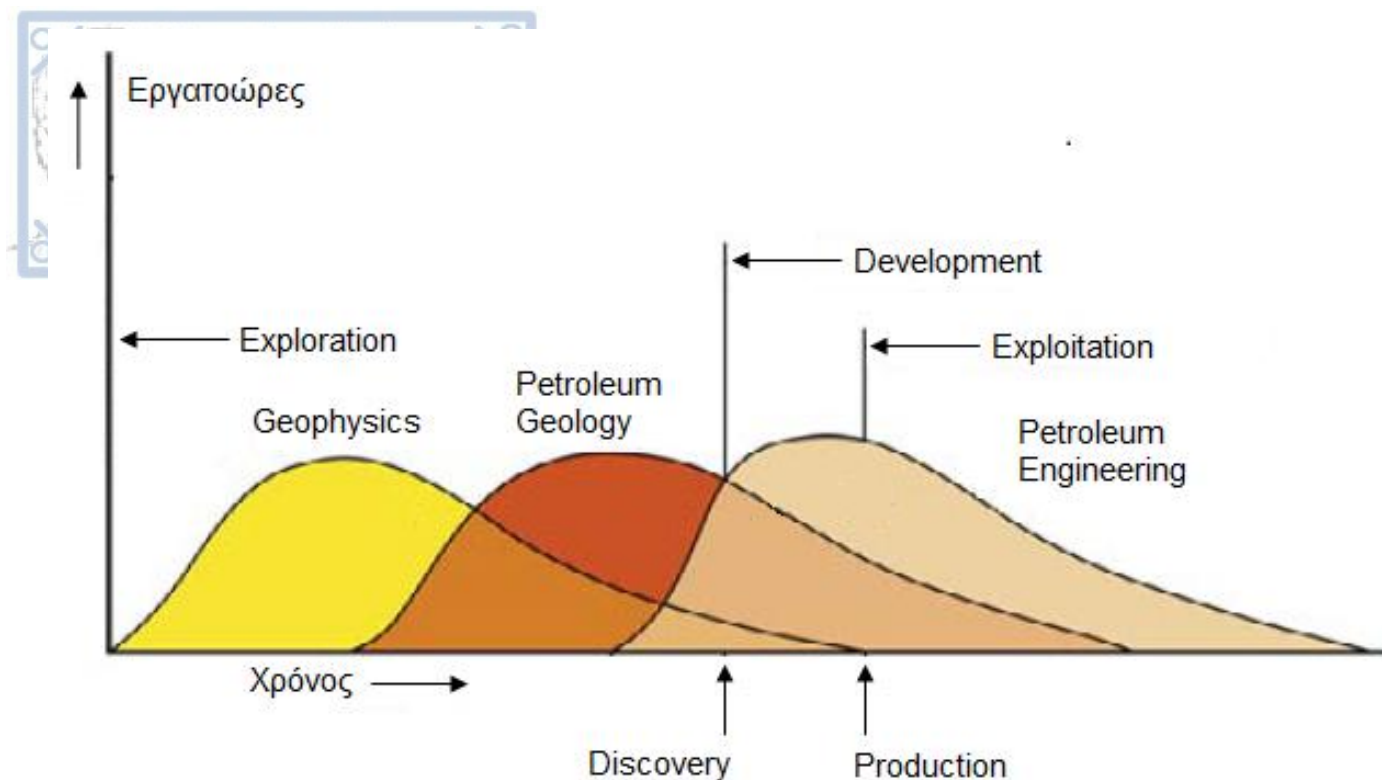


Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η ερεύνα και η εξόρυξη υδρογονανθράκων, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, αποτελεί μια κοστοβόρα και χρονοβόρα διαδικασία, η οποία αποτελείται από αριθμό σταδίων και μελετών. Η πρωταρχική έρευνα, αναφορικά με την πιθανή ύπαρξη και την ποσότητα υδρογονανθράκων σε μια περιοχή, είναι γεωλογικού και γεωφυσικού χαρακτήρα. Στόχος της είναι η κατανόηση των γεωλογικών συνθηκών, και ο εντοπισμός σχηματισμών με οικονομικό ενδιαφέρον. Το κύριο εργαλείο που διαθέτουν οι γεωλόγοι είναι τα σεισμικά δεδομένα. Η ερμηνεία τους γίνεται με βάση τις αρχές της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών και της τεκτονικής. Τελικό αποτέλεσμα της γεωλογικής έρευνας είναι η κατασκευή γεωλογικών μοντέλων, με βάση τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί λεπτομερέστερη μελέτη και ερμηνεία στην περιοχή των ερευνών.

Εάν τα αποτελέσματα του γεωλογικού προγράμματος είναι ενθαρρυντικά, δύναται να λάβουν χώρα ερευνητικές γεωτρήσεις, και να ληφθούν επιπλέον σεισμικά δεδομένα. Οι ερευνητικές γεωτρήσεις μπορούν να επιβεβαιώσουν την ύπαρξη υδρογονανθράκων και να δώσουν άμεσες πληροφορίες για τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Παράλληλα, η μεγαλύτερη πυκνότητα σεισμικών δεδομένων βελτιώνει την ακρίβεια της ερμηνείας. Εφόσον οι ενδείξεις, και η εκτίμηση του κοιτάσματος είναι θετικές, το ερευνητικό πρόγραμμα αποκτά σταδιακά χαρακτήρα λιγότερο ποιοτικό, και περισσότερο ποσοτικό. Το επίκεντρο μετατοπίζεται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς στην εκτίμηση ιδιοτήτων, όπως το πορώδες και η διαπερατότητα. Επιπλέον, εκτιμάται η ποσότητα και το είδος των υδρογονανθράκων, και του καλύτερου τρόπου απολήψεως τους. Την εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων αναλαμβάνουν κυρίως οι μηχανικοί πετρελαίου, με την κατασκευή μοντέλων ταμειυτήρων και μοντέλων παραγωγής. Εργαλείο των μηχανικών πετρελαίου είναι οι διάφορες μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης, και η εφαρμογή τους για την εκτίμηση ιδιοτήτων στον χώρο και τον χρόνο.

Η μοντελοποίηση ενός ταμειυτήρα είναι η διαδικασία, κατά την διάρκεια της οποίας οι μηχανικοί και οι γεωλόγοι θα πρέπει να λάβουν αποφάσεις, και να οδηγηθούν σε όσο το δυνατόν ακριβέστερα συμπεράσματα αναφορικά με την δομή του ταμειυτήρα, των ιδιοτήτων του, του σχήματος του, του πορώδους, της διαπερατότητας των σχηματισμών του, πως αυτά τα χαρακτηριστικά διαφέρουν στον χώρο, ποία θα είναι η εξέλιξη τους σε βάθος χρόνου, των ενοτήτων που τον αποτελούν, πως θα βελτιστοποιηθεί η παραγωγή κλπ. Τελικός στόχος είναι



η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη και η κατανόηση της συμπεριφοράς και της κίνησης των ρευστών, δηλαδή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου.

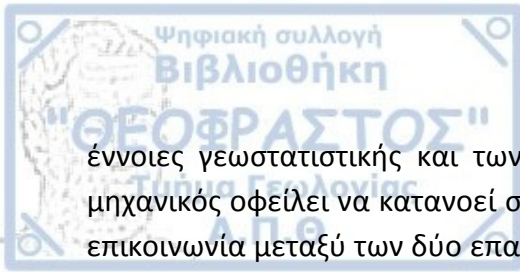
Η σταδιακή αλλαγή του χαρακτήρα του προγράμματος παρουσιάζεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.

Σχήμα 1.1. Τα τρία κεντρικά επαγγέλματα στην βιομηχανία πετρελαίου επικεντρώνονται σε συγκεκριμένα στάδια των ερευνών και παραγωγής ενώ βρίσκονται πάντα σε στενή συνεργασία (Τροποποιημένο από Slatt, 2007).

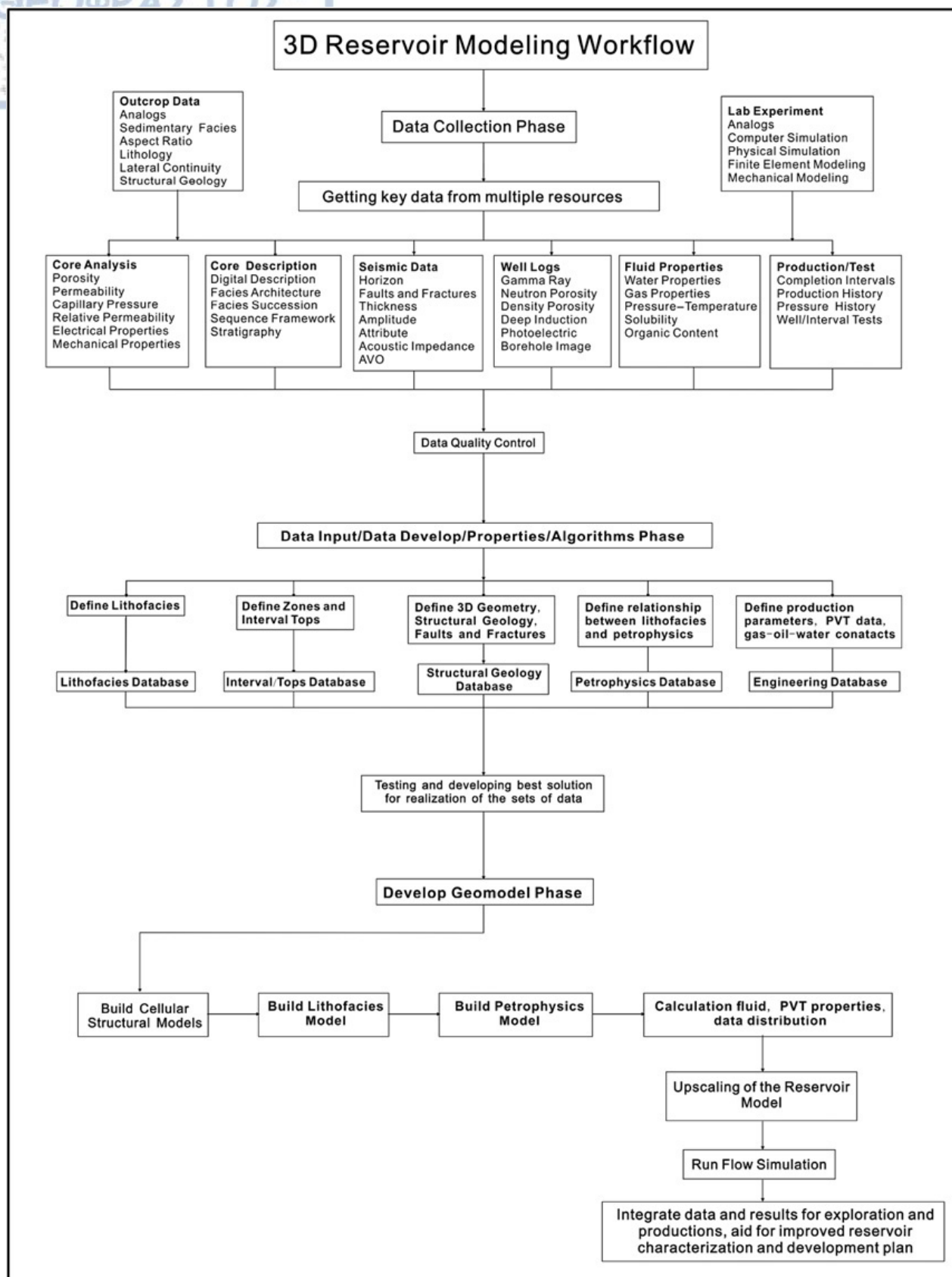
Τόσο τα γεωλογικά μοντέλα, όσο και τα μοντέλα ταμειυτήρων πρέπει να αξιολογούνται πάντα, γνωρίζοντας ότι αποτελούν έναν συμβιβασμό, και δεν αντιπροσωπεύουν με απόλυτη ακρίβεια την πραγματικότητα (Overeem, 2008 ; Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

Βασικό παράγοντα για την κατασκευή ενός αξιόπιστου γεωλογικού μοντέλου, αποτελεί η σωστή και πλήρης κατανόηση των γεωλογικών διαδικασιών που ασκούνται σε μια λεκάνη, όπως η ιζηματογένεση και η διαγένεση, και η κατανόηση της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών, με την βοήθεια της οποίας θα λάβει χώρα και η ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων. Αναλόγως, για την κατασκευή ενός αξιόπιστου μοντέλου ταμειυτήρα, είναι απαραίτητη η γνώση γεωστατιστικής, και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα γεωλογικά μοντέλα κατασκευάζονται κυρίως από γεωλόγους, και τα μοντέλα ταμειυτήρων και παραγωγής από ειδικευμένους μηχανικούς. Είναι λοιπόν σημαντικό ένας γεωλόγος να γνωρίζει, τουλάχιστον σε βασικό επίπεδο, ορισμένες



έννοιες γεωστατιστικής και των μεθόδων που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί. Ομοίως, ένας μηχανικός οφείλει να κατανοεί σε θεμελιώδη βαθμό απαραίτητες γεωλογικές έννοιες, ώστε η επικοινωνία μεταξύ των δύο επαγγελμάτων να πραγματοποιείται ομαλά. Λάθη που μπορεί να γίνουν κατά την διάρκεια της μετάφρασης όρων, ή κατά την διάρκεια της ποσοτικοποίησης της γεωλογίας μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στα μοντέλα ταμιευτήρων και παραγωγής.



Διάγραμμα 1.2. Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται αναλυτικά η ροή εργασιών για την κατασκευή ενός μοντέλου ταμειυτήρα. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν με λεπτομέρεια ορισμένα μόνο τμήματα του παραπάνω διαγράμματος (Slatt, 2013).



- Page intentionally left blank -

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τα σεισμικά δεδομένα αποτελούν το βασικό εργαλείο στην αρχική μελέτη μιας περιοχής για πιθανά κοιτάσματα υδρογονανθράκων. Η αρχική μορφή των σεισμικών δεδομένων, όμως, δεν επιτρέπει την ερμηνεία τους. Πρέπει συνεπώς να πραγματοποιηθεί η ανάλογη τροποποίηση και ο καθαρισμός τους, διαδικασία που απασχολεί κυρίως τον κλάδο της γεωφυσικής. Παράλληλα, η πυκνότητα των σεισμικών δεδομένων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό της ποιότητα της ερμηνείας (Simm Bacon, 2014).

Την τροποποίηση των σεισμικών δεδομένων ακολουθεί η ερμηνεία τους από ειδικευμένους γεωλόγους με την χρήση των αρχών της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών, οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια. Η παραπάνω μελέτη επιτρέπει τον σχηματισμό εικόνας για την γεωλογική ιστορία της υπό εξέταση λεκάνης και θέτει τα θεμέλια για τις μελλοντικές γεωλογικές προσομοιώσεις με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.

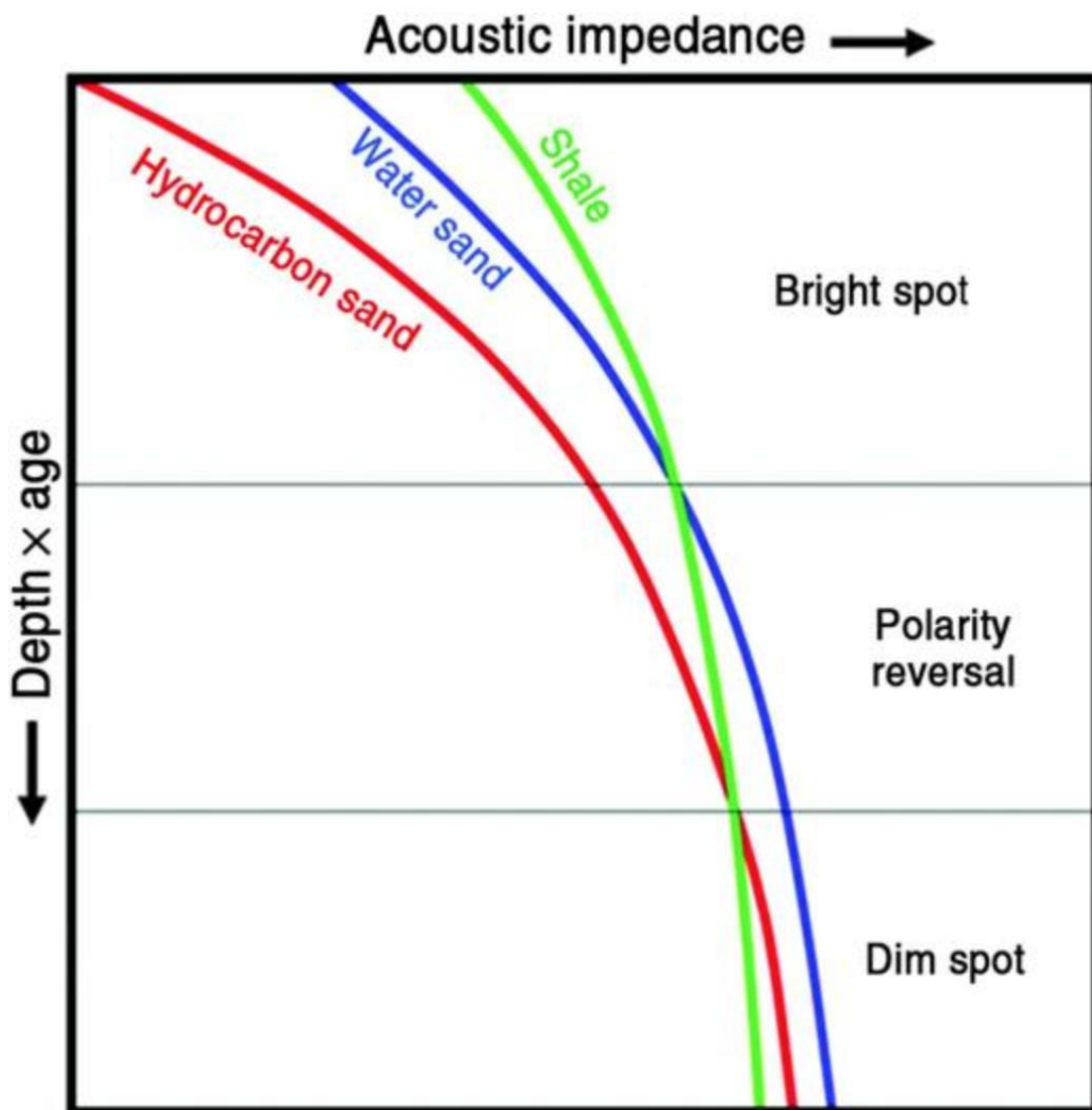
Μελλοντικό συμπλήρωμα των σεισμικών δεδομένων αποτελούν οι διαγραφίες ερευνητικών γεωτρήσεων, που πραγματοποιούνται σε στοχευόμενα σημεία. Οι πληροφορίες που παρέχουν οι διαγραφίες είναι πολύ υψηλής σημασίας, καθώς επιτρέπουν την επιβεβαίωση των μοντέλων και την βελτίωση τους, καθώς επίσης και την άμεση παρατήρηση των υπό εξέταση γεωλογικών σχηματισμών (Slatt, 2006 ; Simm Bacon, 2014).

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές των σεισμικών δεδομένων (Slatt, 2006 ; Simm Bacon, 2014 ; Catuneanu, 2006).

- Η αναγνώριση πιθανών ταμιευτήρων υδρογονανθράκων.
- Η αναγνώριση της δομής παγίδευσης ταμιευτήρων.
- Η εκτίμηση της ποσότητας των υδρογονανθράκων ενός ταμιευτήρα.
- Η εκτίμηση της φύσης των υδρογονανθράκων ενός ταμιευτήρα.
- Η κατανόηση της γεωλογικής ιστορίας της εξεταζόμενης περιοχής.
- Η ανάπτυξη του προγράμματος των ερευνητικών γεωτρήσεων.

2.1. Direct Hydrocarbon Indicators

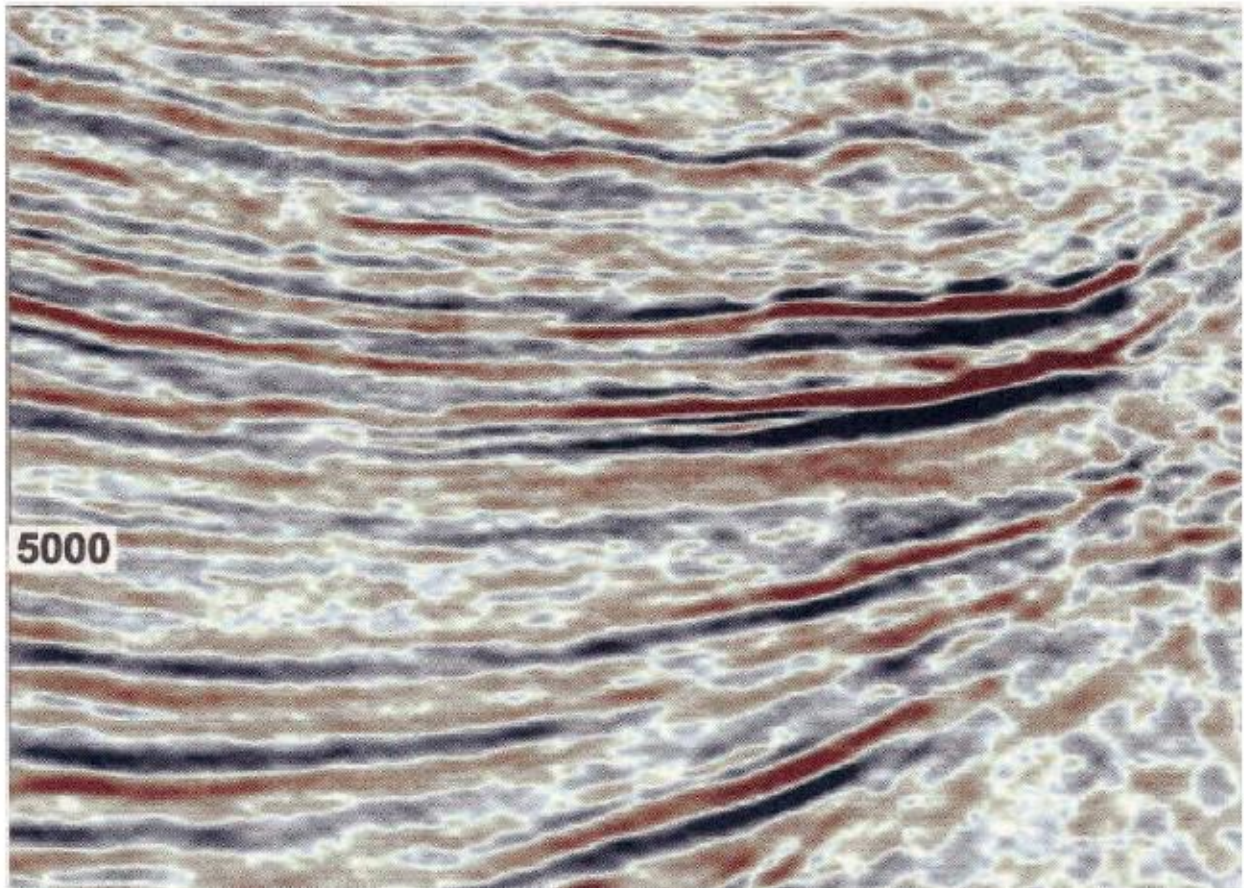
Τα σεισμικά δεδομένα εκφράζουν χωρικές αλλαγές στην ακουστική αντίσταση και όχι απαραίτητα αλλαγές στην λιθολογία. Με βάση την παραπάνω πραγματικότητα, έχουν αναπτυχθεί ορισμένες μέθοδοι για την βελτιστοποίηση της αναγνώρισης πιθανών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (Slatt, 2006 ; Simm Bacon, 2014).



Διάγραμμα 2.1. Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της ακουστικής αντίστασης των σχιστόλιθων, των κορεσμένων σε υδρογονάνθρακες ψαμιτών, και των κορεσμένων σε νερό ψαμιτών. Ανάλογα με το βάθος, και την πολικότητα που χρησιμοποιείται από τα σεισμικά δεδομένα, δύναται να παρουσιαστούν μια σειρά από Direct Hydrocarbon Indicators (Brown Abriel, 2014)

Τα πιο συνηθισμένα είδη Direct Hydrocarbon Indicators είναι το bright spot, το dim spot, το flat spot, η gas chimney και polarity reversal.

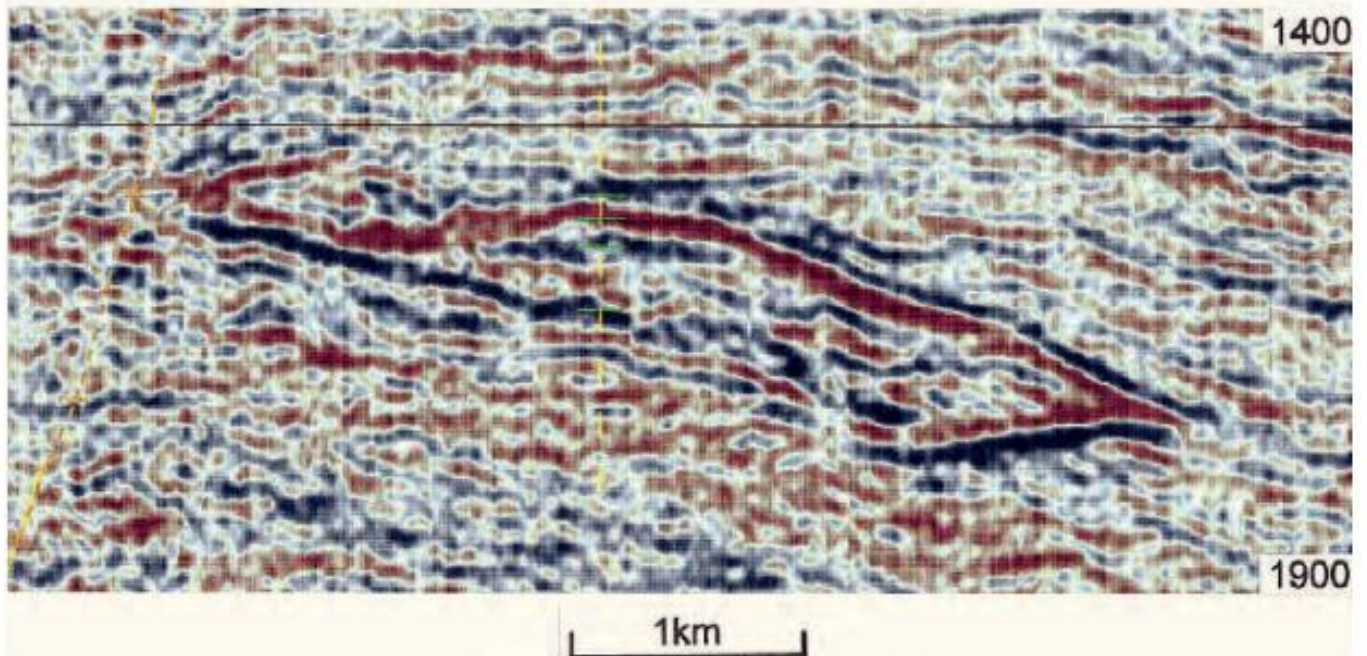
Η εμφάνιση του bright spot οφείλεται στην απότομη αλλαγή της ακουστικής αντίστασης, μεταξύ του υπερκείμενου σχιστόλιθου, και του πετρώματος ταμιευτήρα, που είναι συνήθως ένας ψαμμιτικός σχηματισμός. Η αντίθεση των δύο πετρωμάτων, χαμηλή ακουστική αντίσταση στον ψαμμίτη, και υψηλή ακουστική αντίσταση στον σχιστόλιθο, είναι πολύ έντονη, και συνεπώς η αποτύπωση της θα είναι πολύ φωτεινή στα σεισμικά δεδομένα, εξού το όνομα bright spot. Με την αύξηση του βάθους, η πιθανότητα εμφάνισης bright spot μειώνεται, καθώς ο ψαμμίτης και ο σχιστόλιθος έχουν υποστεί συμπίεση (Slatt, 2006).



Εικόνα 2.2. Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται τέσσερα bright spot κοιτασμάτων φυσικού αερίου, σε βάθος περίπου πέντε χιλιάδων μέτρων (Brown, 2004).

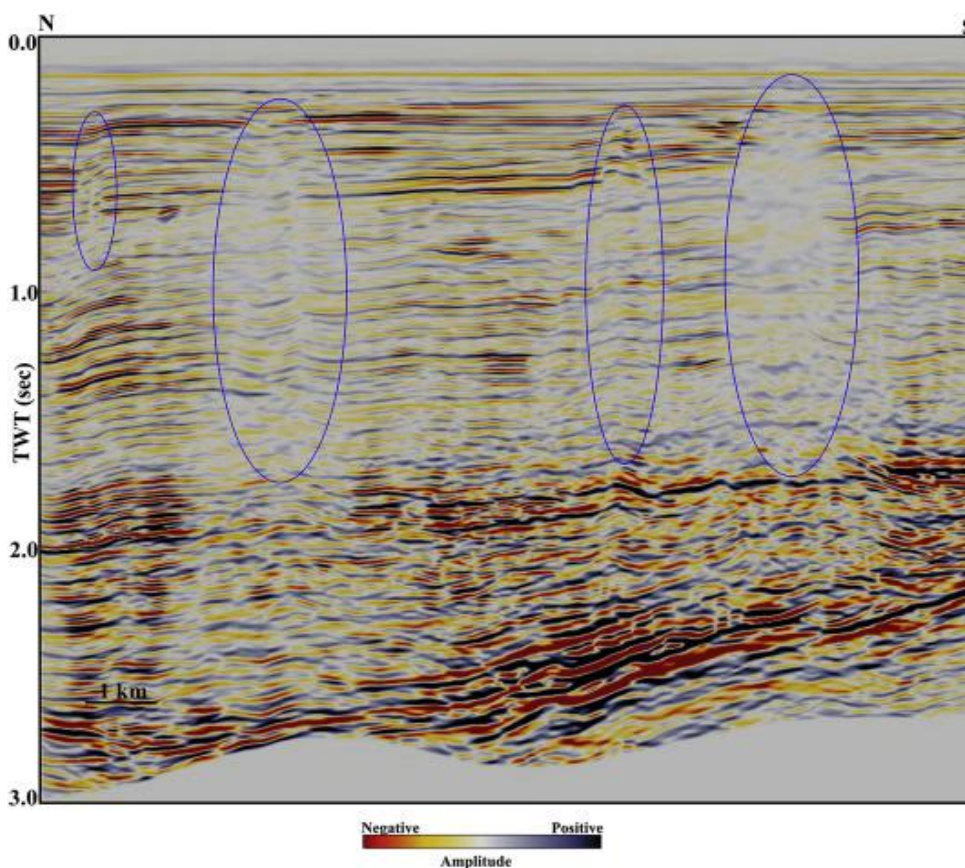
Η εμφάνιση του dim spot οφείλεται στην ύπαρξη έντονα συμπιεσμένων ψαμμιτών, με μεγάλη ακουστική αντίσταση, και υπερκείμενους σχιστόλιθους, με χαμηλότερη ακουστική αντίσταση όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.1.. Η ύπαρξη υδρογονανθράκων μειώνει την ακουστική αντίσταση του ψαμμίτη, προκαλώντας μείωση της αντίθεσης των ακουστικών αντιστάσεων των δύο πετρωμάτων. Η ελαττωμένη αντίθεση αποτυπώνεται ως ένα θολό σημείο (Slatt, 2006).

Η εμφάνιση ενός flat spot οφείλεται συνήθως στην επαφή νερού και φυσικού αερίου. Το τμήμα του πετρώματος, που είναι κορεσμένο σε φυσικό αέριο χαρακτηρίζεται από χαμηλή ακουστική αντίσταση, ενώ το τμήμα κορεσμένο σε νερό έχει υψηλότερη ακουστική αντίσταση. Η παραπάνω αντίθεση εμφανίζεται ως μια επίπεδη επιφάνεια.



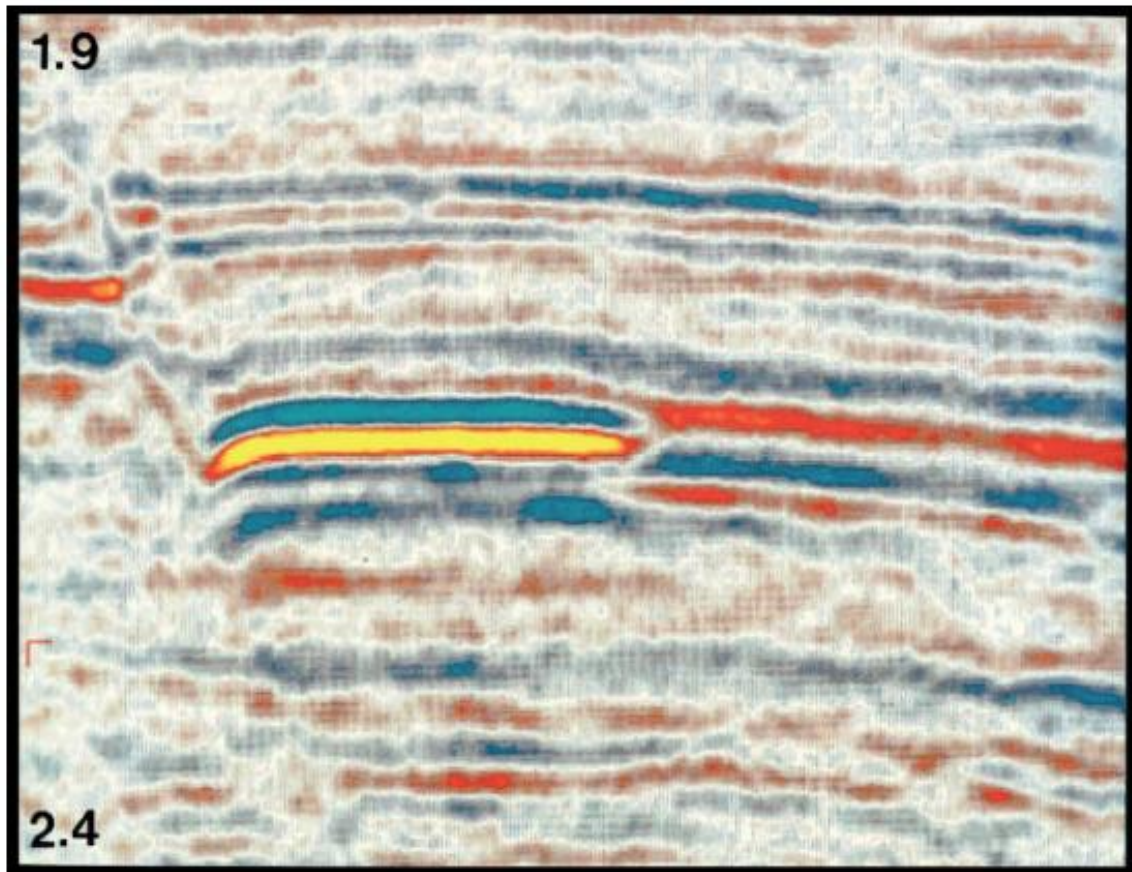
Εικόνα 2.3. Στην παραπάνω εικόνα εμφανίζεται ένα flat spot και ένα bright spot (Brown, 2004).

Η εμφάνιση της gas chimney οφείλεται σε προβληματική παγίδευση ενός κοιτάσματος φυσικού αερίου. Αν και δεν αποτελεί στόχο προς εκμετάλλευση, η ύπαρξη μιας gas chimney υποδηλώνει την παρουσία φυσικού αερίου σε μεγαλύτερο βάθος (Simm Bacon, 2014).



Εικόνα 2.4. Στην εικόνα αριστερά φαίνονται τέσσερις gas chimneys. (Singh et al 2016).

Η εμφάνιση polarity reversal οφείλεται στην ύπαρξη υπερκείμενων σχιστόλιθων με χαμηλή ακουστική αντίσταση, και υποκείμενων ψαμμιτών κορεσμένων σε υδρογονάνθρακες. Η αναστροφή πολικότητας είναι μια ενδιάμεση κατάσταση, μεταξύ του bright spot, και του dim spot.



Εικόνα 2.5. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται μια αναστροφή πολικότητας, σε ένα κοίτασμα στον Κόλπου του Μεξικό (Brown, 2004).



- Page intentionally left blank -

3.1. Εισαγωγικές Έννοιες

Κατά την δεκαετία του 1970, η ερευνητική ομάδα της εταιρείας Exxon, υπό την ηγεσία του γεωλόγου Peter Vail, επιφορτίστηκε με την βελτίωση του τρόπου ερμηνείας των σεισμικών δεδομένων, με απώτερο στόχο την μείωση της αβεβαιότητας των ερευνητικών προγραμμάτων της εταιρείας. Τα αποτελέσματα των μελετών τους δημοσιεύτηκαν το 1977, στο 26 Memoir της AAPG, με τον τίτλο " Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration ". Ο Peter Vail και η ομάδα του εισήγαγε την έννοια της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών, και παράλληλα μια νέα, επαναστατική μέθοδο ερμηνείας σεισμικών δεδομένων.

Η στρωματογραφία ιζηματογενών ακολουθιών (Sequence Stratigraphy) αποτελεί την πιο πρόσφατη, και επαναστατική εξέλιξη της λιθοστρωματογραφίας, και ορίζεται ως " η μελέτη των πετρωμάτων που αποτελούν ένα χρόνο-στρωματογραφικό πλαίσιο, επαναλαμβανόμενων και γενετικά συγγενικών στρωμάτων, που οριοθετούνται από σύμφωνες ή ασύμφωνες επιφάνειες " (Posamentier et al., 1988). Η γνώση της στρωματογραφίας ακολουθιών είναι απαραίτητη για την αναγνώριση πιθανών ταμιευτήρων, και παλαιοπεριβαλόντων, μέσω της μελέτης σεισμικών δεδομένων.

Στην στρωματογραφία ιζηματογενών ακολουθιών, μεγάλης σημασία κατέχει η κατανόηση της ισορροπίας και της ταυτόχρονης αλληλεπίδρασης των εξωτερικών παραγόντων (allogenic processes) που επιδρούν σε μία ιζηματογενή λεκάνη. Οι παράγοντες αυτοί είναι η ευστατική, η τεκτονική, το κλίμα και η συνολική ενέργεια του συστήματος (Catuneanu, 2002 2006 ; Miall, 2010 ; Coe et al, 2003 ; Emery Myers, 1996).

- Η ευστατική (eustatic) ελέγχει τον ρυθμό μεταβολής του επιπέδου της θάλασσας.
- Η τεκτονική επηρεάζει τον συνολικό όγκο των ωκεανών, το βάθος τους και την ανύψωση των ηπείρων, δημιουργώντας έμμεσα υλικό προς αποσάθρωση.
- Το κλίμα ελέγχει τις διαδικασίες της αποσάθρωσης και της διάβρωσης, κυβερνώντας ουσιαστικά την παροχή ιζημάτων (sediment supply). Το κλίμα, με την σειρά του, ελέγχεται από τους κύκλους Milankovitch.
- Η συνολική ενέργεια του συστήματος (energy flux) ελέγχει τον τρόπο και ρυθμό μεταφοράς των ιζημάτων, τα θαλάσσια ρεύματα, και την θαλάσσια διάβρωση και ελέγχεται κυρίως από κλιματικούς παράγοντες.

Η αλληλεπίδραση των παραπάνω παραγόντων οδηγεί στην μετατόπιση της θέσης των παράκτιων περιοχών, και στην δημιουργία σύμφωνων και ασύμφωνων επιφανειών. Οι επιφάνειες αυτές διακρίνονται στα σεισμικά δεδομένα και η ερμηνεία τους αποτελεί το επίκεντρο της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών.

Η παροχή ιζημάτων (sediment supply) ορίζεται ως " η ποσότητα (flux) και η κοκκομετρία (grain size) του ιζήματος που μεταφέρεται προς την ιζηματογενή λεκάνη, μέσω διάφορων μεταφορικών παραγόντων. Αποτελεί το παραπροϊόν της αλληλεπίδρασης του τεκτονισμού και του κλίματος " (Catuneanu, 2006). Με βάση τον παραπάνω ορισμό, είναι προφανές ότι ένα περιβάλλον με υγρό κλίμα και ανώμαλο ανάγλυφο θα διαθέτει μεγαλύτερη παροχή ιζημάτων, συγκρινόμενο με ένα περιβάλλον με ομαλό ανάγλυφο και ξηρό κλίμα.

Η έννοια του χώρου απόθεσης ιζημάτων (accommodation space) περιγράφει το " ποσό του χώρου, που είναι διαθέσιμο προς κατάληψη από ιζήματα. Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του βασικού επιπέδου, και της επιφάνειας απόθεσης " (Jernvey, 1988). Ο χώρος απόθεσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, συγκρίνοντας τον χώρο που δημιουργήθηκε ή ελαττώθηκε, λόγω τεκτονικής ή αλλαγής του βασικού επιπέδου, με τον χώρο που καταναλώθηκε, λόγω απόθεσης ιζημάτων (Catuneanu, 2006).

Ως βασικό επίπεδο (base level) ορίζεται το " επίπεδο ισορροπίας μεταξύ διάβρωσης και απόθεσης " (Cross, 1991). Το επίπεδο αυτό επιτυγχάνεται όταν ο ποταμός μπορεί να μεταφέρει πλήρως τα ιζήματα του, δίχως να λαμβάνει χώρα αποσάθρωση (Leopold and Bull, 1979). Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, το βασικό επίπεδο μπορεί να ταυτιστεί με το επίπεδο της θάλασσας. Στην πραγματικότητα, το βασικό επίπεδο βρίσκεται ελαφρώς χαμηλότερα από την επιφάνεια της θάλασσας. Μετράται από το datum, και ελέγχεται από την ευστατική.

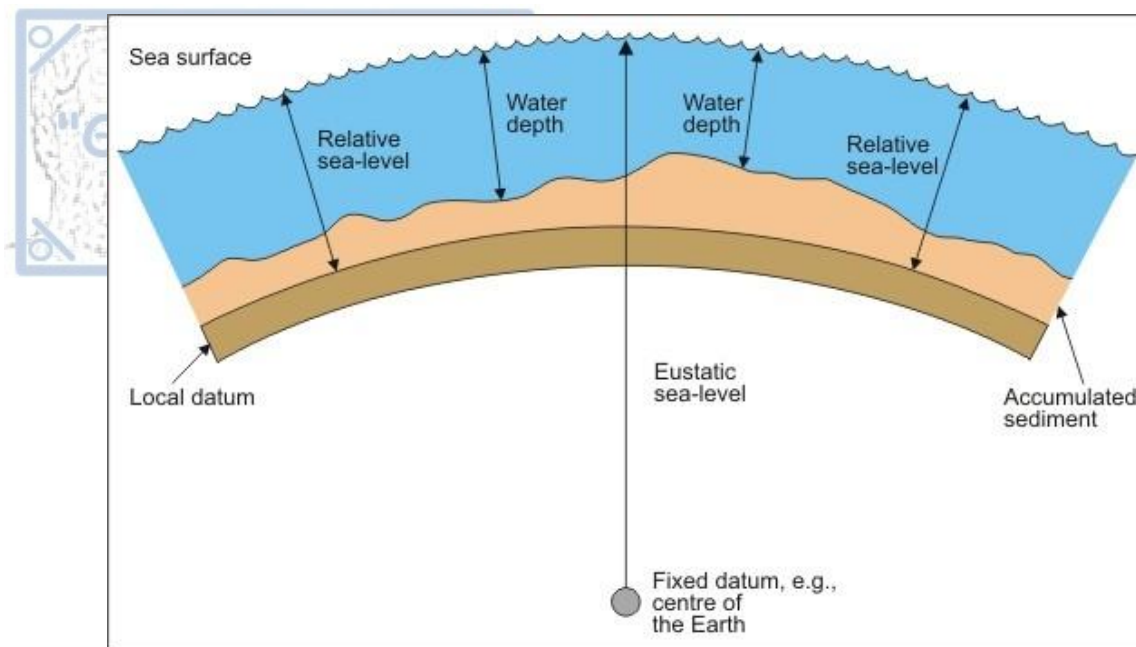
Η ευστατική (eustasy) αποτελεί το επίπεδο της θάλασσας συγκρινόμενο με το κέντρο της Γης και ελέγχει κυρίως την μεταβολή του βασικού επιπέδου.

Το σχετικό επίπεδο της θάλασσας (relative sea level) μετράται συγκρινόμενο με έναν ορίζοντα (datum) που είναι ανεξάρτητος από το πάχος των αποθέσεων. Η μεταβολή του datum λαμβάνει χώρα κατά την διάρκεια τεκτονικών κινήσεων, και μετράται από το κέντρο της Γης.

Το βάθος της υδάτινης στήλης (water depth) μετράται από τον βυθό της θάλασσας, δηλαδή από το datum, εάν προστεθούν σε αυτό τα ιζήματα .

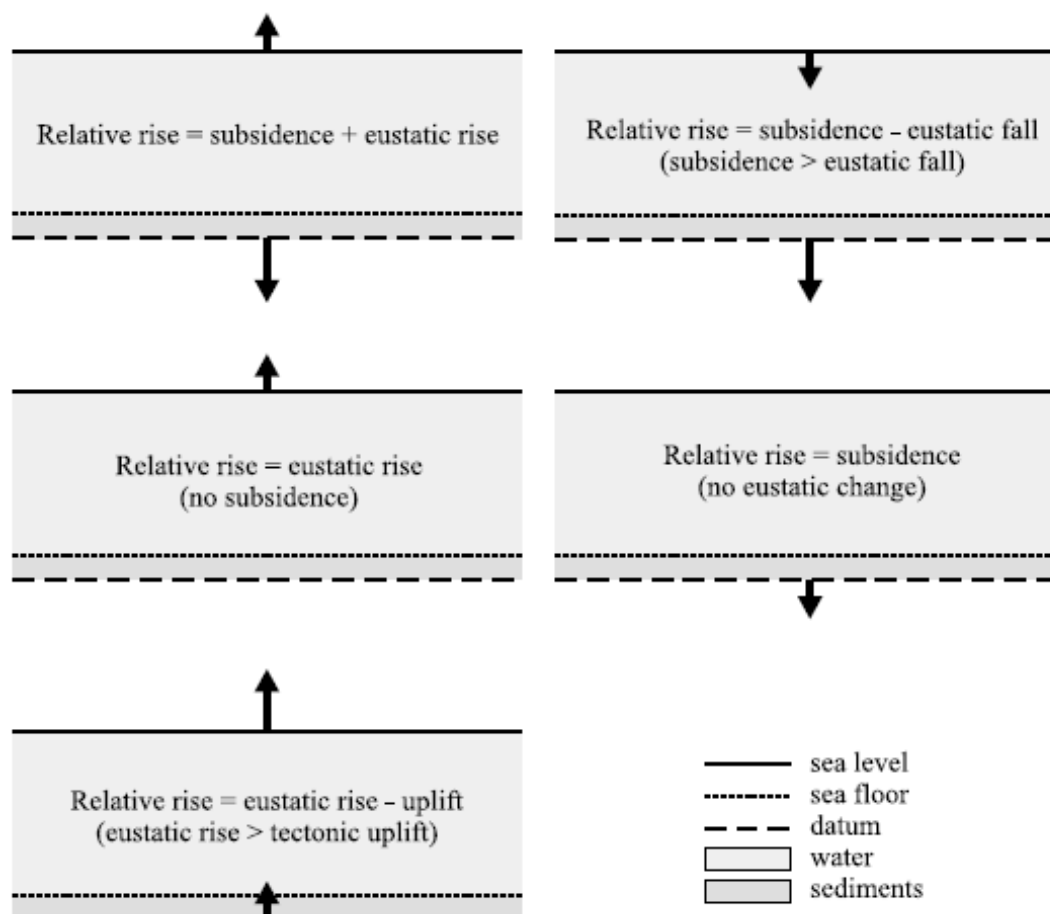
Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η μεταβολή του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, εξαρτάται από την αλληλεπίδραση του βασικού επιπέδου (ευστατική) και του datum (τεκτονική).

Για παράδειγμα, μπορεί να λάβει χώρα αύξηση του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, ενώ το βασικό επίπεδο παραμένει σταθερό, εάν πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα μείωση του datum (τεκτονική ταπείνωση). Αύξηση του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, μπορεί να πραγματοποιηθεί με παράλληλη πτώση του datum (τεκτονική ταπείνωση), και του βασικού επιπέδου (ευστατική πτώση), εάν ο ρυθμός ταπείνωσης του datum είναι μεγαλύτερος. Αντιθέτως, πτώση του σχετικού επιπέδου της θάλασσας θα πραγματοποιηθεί εάν ο ρυθμός πτώσης του βασικού επιπέδου είναι μεγαλύτερος (Catuneanu, 2006). Στις παραπάνω απλές περιπτώσεις δεν λήφθηκε καθόλου υπόψιν το πάχος των ιζημάτων που πιθανώς αποτίθενται στο σύστημα, και μετρήθηκε η πιθανή μεταβολή (αύξηση ή μείωση) του χώρου απόθεσης ιζημάτων (accommodation space).



Σχήμα 3.1.
Απεικόνιση της μέτρησης του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, του βάθους της υδάτινης στήλης, και του datum (Slatt, 2006).

Εάν μετρηθεί το βάθος της υδάτινης στήλης, τότε θα μπορούσαμε να αντιληφθούμε καλύτερα το εναπομείναντα διαθέσιμο χώρο απόθεσης ιζημάτων (available accommodation space) και αν αυτός αυξάνεται (πιθανή επίκληση) ή μειώνεται (πιθανή απόσυρση). Οι παραπάνω έννοιες αποτελούν συχνή πηγή σύγχυσης. Για παράδειγμα, η αύξηση του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, ταυτίζεται λανθασμένα με την αύξηση της επιφάνειας της θάλασσας, ενώ κάτι τέτοιο δεν ισχύει πάντα. Είναι πιθανή η αύξηση του σχετικού επιπέδου της θάλασσας, εξαιτίας μείωσης της επιφάνειας της θάλασσας, με παράλληλη πτώση του datum. Η μείωση του βάθους της υδάτινης στήλης συγχέεται συχνά με πτώση του βασικού επιπέδου. Το βασικό επίπεδο όμως μετράται από το datum, και όχι από τις ιζηματογενείς αποθέσεις. Συνεπώς, μπορεί να λάβει χώρα αύξηση του βασικού επιπέδου, με παράλληλη πτώση του βάθους υδάτινης στήλης, λόγω μεγάλης προσφοράς ιζημάτων. Αναλόγως, η πτώση του βασικού επιπέδου μπορεί να συνδυαστεί με αύξηση του βάθους υδάτινης στήλης, λόγω μικρής προσφοράς ιζημάτων.



Εικόνα 3.2.
Περιπτώσεις αύξησης του σχετικού επιπέδου της θάλασσας (Catuneanu, 2002).

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι πιο κοινές περιπτώσεις αύξησης του σχετικού επιπέδου της θάλασσας (relative sea level). Ανάλογα σχήματα μπορούν να δημιουργηθούν για τις περιπτώσεις μείωσης του σχετικού επιπέδου της θάλασσας. Πρέπει να τονιστεί ότι το σχετικό επίπεδο της θάλασσας μετράται από το datum, και είναι ανεξάρτητο από το πάχος των αποθέσεων. Ο νέος χώρος που δημιουργείται μπορεί να καταληφθεί από ιζήματα, αλλάζοντας το βάθος του νερού.

3.2. Shoreline Trajectories

Η ακτογραμμή μιας παράκτιας περιοχής στην οποία λαμβάνει χώρα απόθεση ιζημάτων, μπορεί να αλλάξει θέση στον χώρο κατά την διάρκεια του γεωλογικού χρόνου. Η κίνηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της αλληλεπίδρασης της ιζηματοπόθεσης, και της δημιουργίας accommodation space.

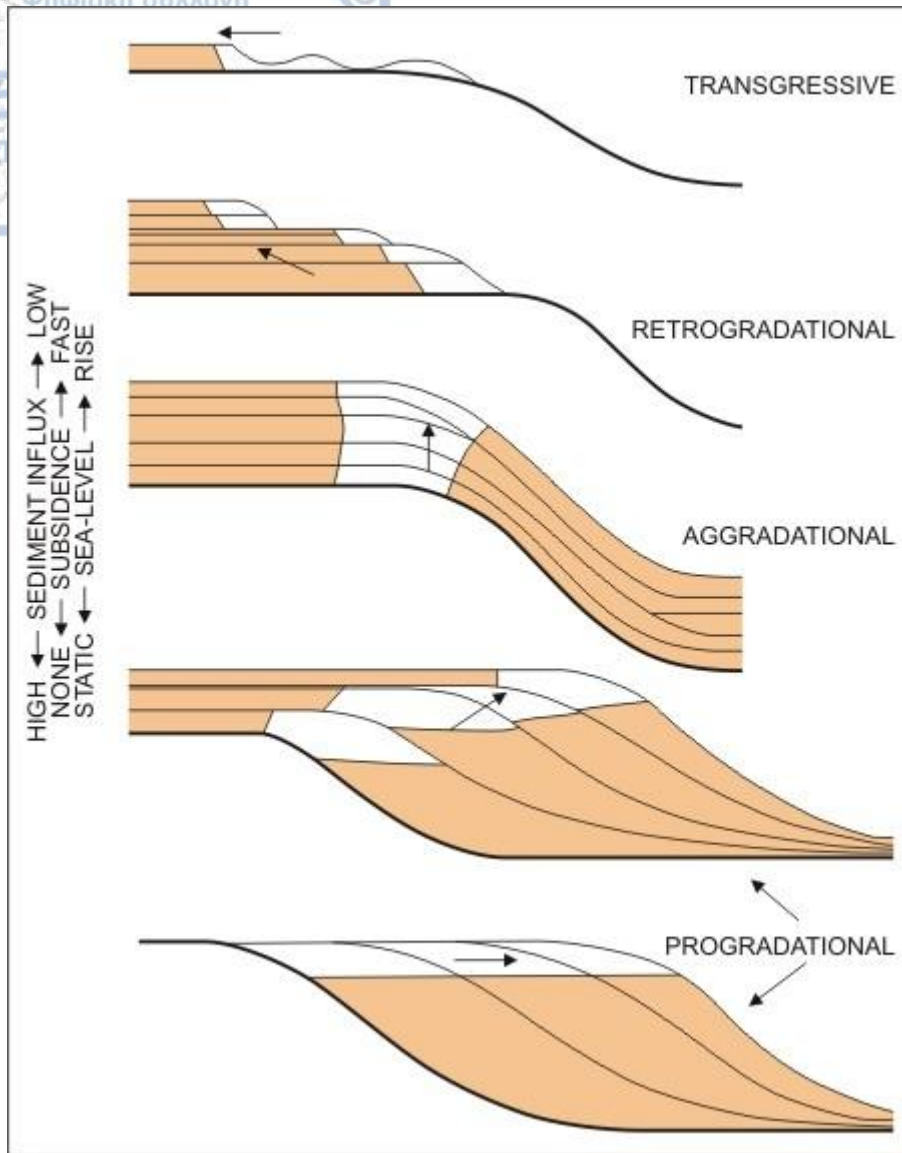
- Η επίκλυση (*transgression*) ορίζεται ως " η μετατόπιση της ακτογραμμής προς την ενδοχώρα. Αυτή η κίνηση προκαλεί αλλαγές στην ιζηματολογική σύσταση των σχηματισμών που αποτίθενται, και την αύξηση του βάθους της υδάτινης στήλης στην περιοχή της ακτογραμμής " (Catuneanu, 2006).

Η οπισθοδρόμηση (*retrogradation*) αποτελεί την μετατόπιση, ή υποχώρηση της ακτής προς την ενδοχώρα (Coe et al, 2003), εξαιτίας της ανισορροπίας μεταξύ της παροχής ιζημάτων, και της δημιουργίας accommodation space. Συγκεκριμένα, το accommodation space αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι μπορεί να καταλειφθεί από τα ιζήματα που αποτίθενται. Το αποτέλεσμα της παραπάνω κίνησης ονομάζεται επίκλυση.

- Η απόσυρση (*regression*) ορίζεται ως " η μετατόπιση της ακτής προς την κατεύθυνση της θάλασσας, με ταυτόχρονη μείωση του βάθους της υδάτινης στήλης " (Catuneanu, 2006).

Η προώθηση (*progradation*) ορίζεται ως " το κτίσιμο της ακτογραμμής, με ταυτόχρονη μετατόπιση της προς την κατεύθυνση την θάλασσα, από παράκτιες αποθέσεις ποτάμιας προέλευσης, ή από την συνεχή συσσώρευση ιζημάτων, που έχουν μεταφερθεί από κύματα ή θαλάσσια ρεύματα " (Bates Jackson, 1987). Το αποτέλεσμα της προώθησης ονομάζεται απόσυρση, και λαμβάνει χώρα όταν η παροχή ιζημάτων είναι μεγαλύτερη από την δημιουργία accommodation space (Slatt, 2006 ; Coe et al, 2003).

- Η πρόσχωση (*aggradation*) πραγματοποιείται όταν στο σύστημα επικρατεί ισορροπία μεταξύ της παροχής ιζημάτων και της δημιουργίας accommodation space. Κατά την διάρκεια της πρόσχωσης, τα ιζήματα αποτίθενται κατακόρυφα, χωρίς μεταβολή της σχετικής θέσης της ακτογραμμής στο οριζόντιο επίπεδο (Slatt, 2006 ; Coe et al, 2003).



Εικόνα 3.3. Τα σχήματα στα αριστερά παρουσιάζουν τους πιθανούς τρόπους απόθεσης ιζημάτων, σε συνάρτηση με την παροχή ιζημάτων, και την μεταβολή του βασικού επιπέδου (Slatt, 2006).

Εάν συνδυαστούν οι παραπάνω κινήσεις της ακτογραμμής, με την ταυτόχρονη και επαναλαμβανόμενη αλλαγή του επιπέδου της θάλασσας και την αλληλεπίδραση της παροχής ιζημάτων με την δημιουργία accommodation space, γίνεται εφικτό να οριστούν τρεις γενικές καταστάσεις, δύο αποσύρσεις, και μία επίκληση.

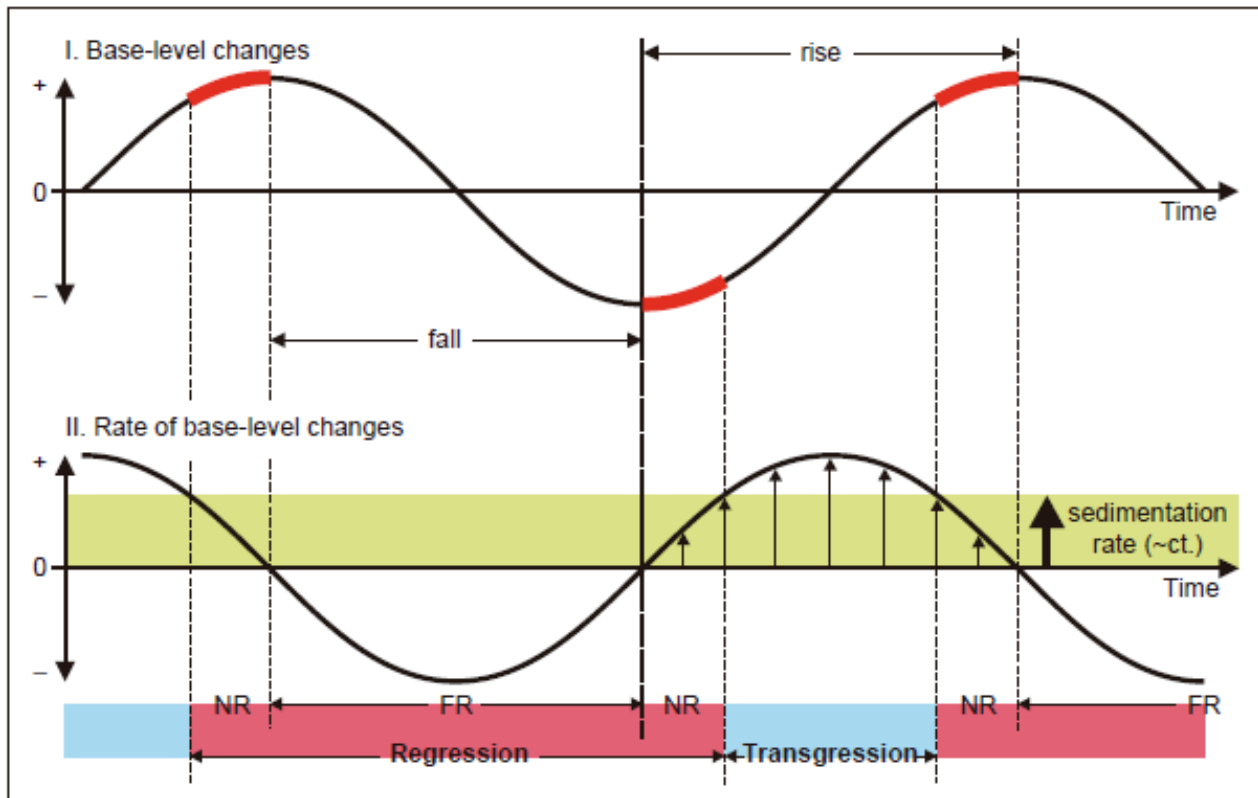
- Την υποχρεωτική απόσυρση (*forced regression*), η οποία ορίζεται ως “ η αναγκαστική μετατόπιση της ακτής προς την κατεύθυνση της θάλασσας, υπό την επήρεια εξωτερικών παραγόντων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ιζηματογένεση ” (Posamentier et al, 1992b). Forced regression λαμβάνει χώρα κατά την απότομη πτώση του βασικού επιπέδου.

Κατά την διάρκεια της forced regression, η ακτογραμμή αναγκάζεται να κινηθεί προς την κατεύθυνση της θάλασσας λόγω της αλλαγής του βασικού επιπέδου, όχι λόγω της ανισορροπίας ανάμεσα στην παροχή ιζημάτων και την δημιουργία accommodation space.

- Την κανονική απόσυρση (*normal regression*), η οποία αποτελεί απόσυρση που σχετίζεται με άνοδο, και όχι πτώση του επιπέδου της θάλασσας. Normal regression λαμβάνει χώρα κατά το αρχικό και τελικό στάδιο της αύξησης του βασικού επιπέδου.

Κατά την διάρκεια της normal regression, η ακτογραμμή μετατοπίζεται προς την κατεύθυνση της θάλασσας λόγω της ανισορροπίας ανάμεσα στην παροχή ιζημάτων και του accommodation space. Συγκεκριμένα, η παροχή ιζημάτων είναι μεγαλύτερη από τον ρυθμό δημιουργίας accommodation space.

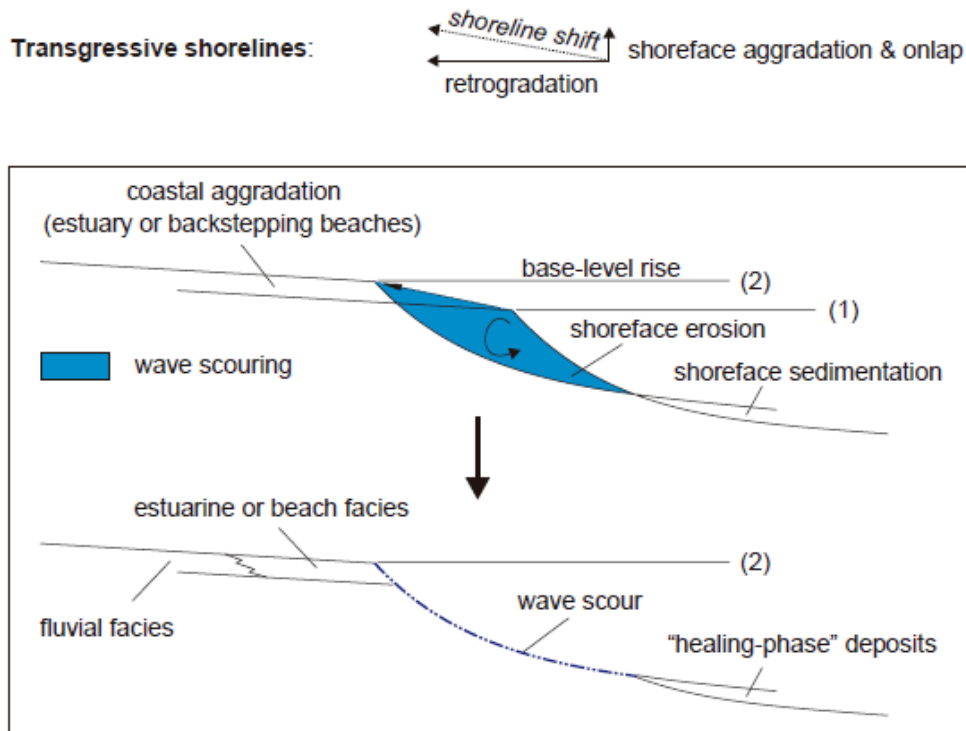
- Την επίκλυση (*transgression*) που λαμβάνει χώρα κατά την απότομη αύξηση του βασικού επιπέδου.



Σχήμα 3.4. Μεταβολή και ρυθμός μεταβολής του βασικού επιπέδου. Τροποποιημένο από (Catuneanu 2006).

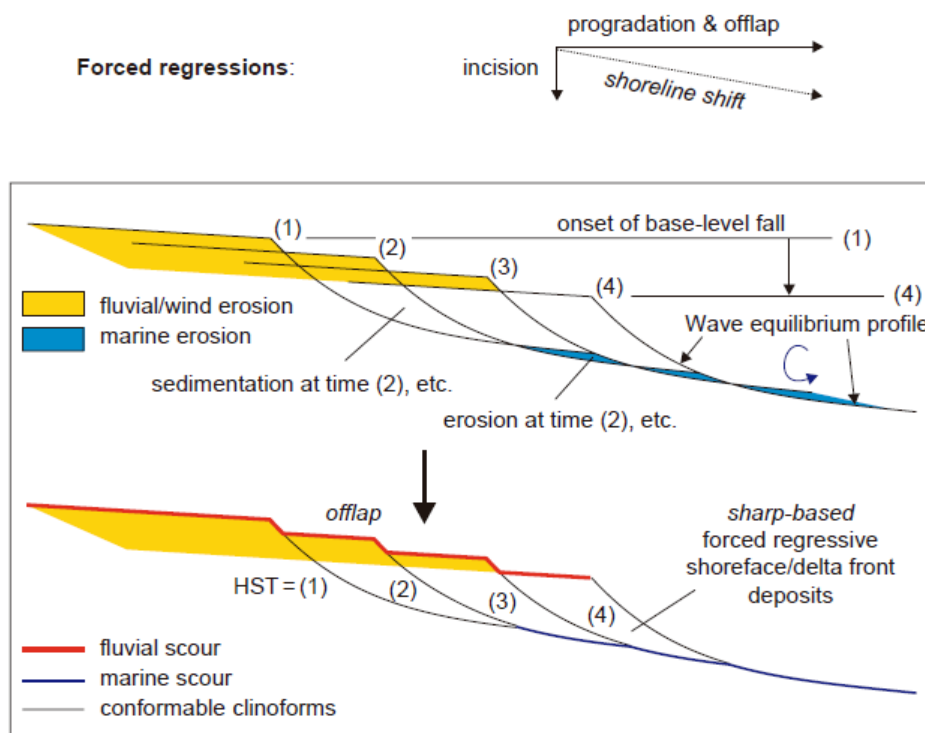
Στο σχήμα 3.4. παρατηρείται ότι στα σημεία με κόκκινο χρώμα της άνω καμπύλης, δηλαδή τις στιγμές που το βασικό επίπεδο ανεβαίνει, αλλά με χαμηλό ρυθμό, λαμβάνει χώρα normal regression. Η παραπάνω αλλαγή οφείλεται στην αργή αύξηση του accommodation space. Η ακτογραμμή, επειδή δεν διαθέτει τον απαραίτητο χώρο για την απόθεση των ιζημάτων, αναγκάζεται να προωθηθεί προς την κατεύθυνση της θάλασσας, και προς τα πάνω, πραγματοποιώντας ουσιαστικά απόσυρση, η οποία συνοδεύεται από ελαφρά αύξηση του βασικού επιπέδου. Μόλις το βασικό επίπεδο αρχίζει να αυξάνει με έντονο ρυθμό, λαμβάνει χώρα επίκλυση, καθώς ο διαθέσιμος χώρος αυξάνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι μπορεί να καταληφθεί από τα ιζήματα που παρέχονται. Όταν το βασικό επίπεδο φτάσει στο μέγιστο ύψος του, τότε ακολουθεί η ανάλογη πτώση του, οδηγώντας σε forced regression, καθώς ο χώρος απόθεσης μειώνεται πλέον με έντονο ρυθμό, αναγκάζοντας το μέτωπο να κινηθεί προς την κατεύθυνση της θάλασσας, και προς τα κάτω.

Στο σχήμα 3.5. παρουσιάζεται η τυπική μορφή επίκλυσης. Η άνοδος του βασικού επιπέδου πραγματοποιείται γρήγορα, από την θέση 1 στην θέση 2, οδηγεί σε σημαντική διάβρωση του μετώπου. Η δράση των κυμάτων οδηγεί στην ανισορροπία του συστήματος, η οποία αποκαθίσταται με την απόθεση ιζημάτων σε βαθύτερα τμήματα (*healing phase deposits*).



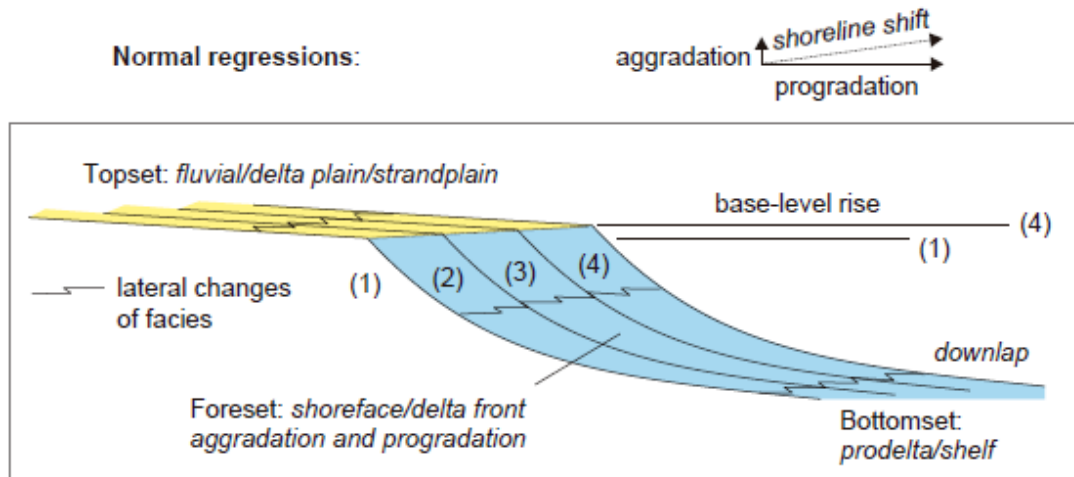
Σχήμα 3.5. Σχηματική απεικόνιση επίκλυσης (Catuneanu 2006).

Στο σχήμα 3.6. παρουσιάζεται η τυπική μορφή forced regression. Η σταδιακή πτώση του βασικού επιπέδου, από την θέση 1 έως την θέση 4, πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό, αναγκάζοντας την ακτογραμμή να κινηθεί προς την κατεύθυνση της θάλασσας και προς τα κάτω. Παράλληλα, λαμβάνει χώρα διάβρωση, λόγω της δράσης κυμάτων, και απόθεση υλικού σε μεγαλύτερο βάθος.



Σχήμα 3.6. Σχηματική απεικόνιση forced regression (Catuneanu, 2006).

Στο σχήμα 3.7. παρουσιάζεται η τυπική μορφή normal regression. Η άνοδος του βασικού επιπέδου πραγματοποιείται με αργό ρυθμό, από την θέση 1, στην θέση 4, σε αντίθεση με την περίπτωση της επίκλησης. Χώρος απόθεσης ιζημάτων δεν μπορεί να αυξηθεί με ικανοποιητικό βαθμό, με αποτέλεσμα την προώθηση του μετώπου προς την κατεύθυνση της θάλασσας, και προς τα πάνω λόγω απόθεσης μεγάλου πάχους ιζημάτων.



Σχήμα 3.7. Σχηματική απεικόνιση normal regression (Catuneanu, 2006).

3.3. System Tracts

Κατά την διάρκεια της ερμηνείας των σεισμικών δεδομένων, ο στόχος των γεωλόγων είναι η εύρεση συγκεκριμένων οριζόντων και ακολουθιών πετρωμάτων, οι οποίες οριοθετούν αποθετικά συστήματα. Απώτερος σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η κατανόηση της λειτουργίας τους στο παρελθόν, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με την πιθανή κοκκομετρία των πετρωμάτων, την πιθανή λειτουργία τους ως ταμιευτήρες ή μητρικά πετρώματα, και την ποιότητα τους. Στο μέλλον, τα συμπεράσματα αυτά ίσως μπορέσουν να γενικευτούν και να εφαρμοστούν συνολικά στην περιοχή της έρευνας.

Ένα αποθετικό σύστημα (*depositional system*) ορίζεται ως " το τρισδιάστατο σύστημα από φάσεις, με κοινή γενετική προέλευση, που καταγράφει σημαντικά παλαιό-γεωμορφολογικά στοιχεία " (Galloway, 1989).

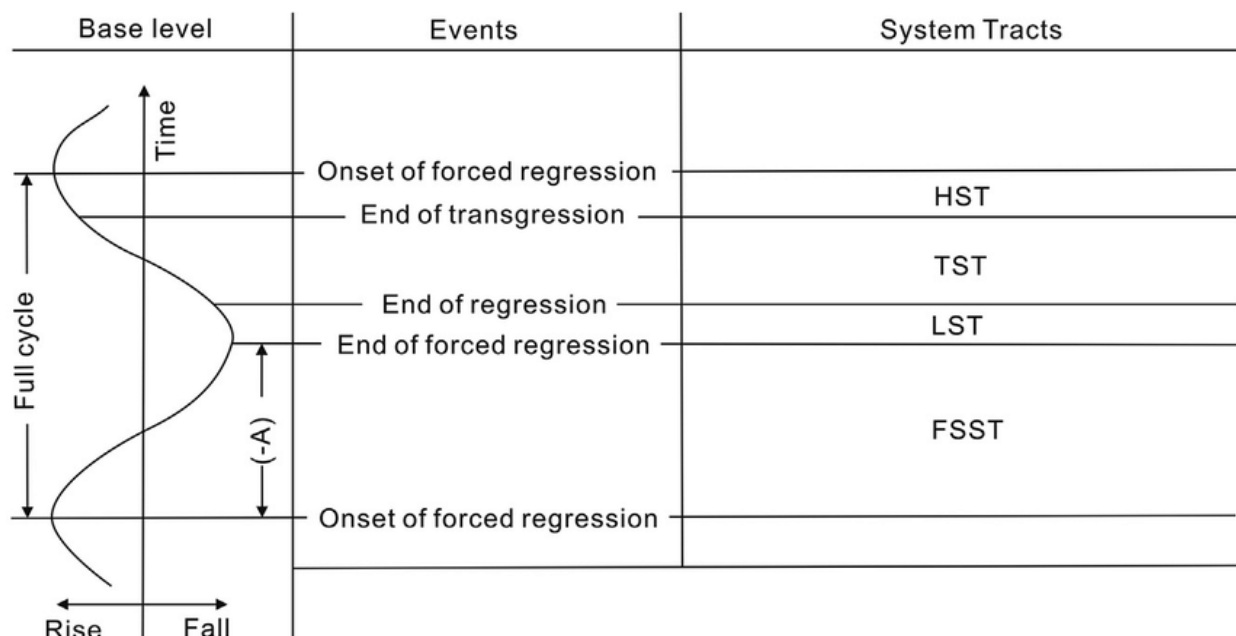
Μια ακολουθία (*sequence*) ορίζεται ως " μια σχετικά σύμφωνη ακολουθία στρωμάτων, συγγενικής γενετικής προέλευσης, που οριοθετείται από σύμφωνες ή ασύμφωνες επιφάνειες " (Mitchum, 1977).

Ένα System Tract ορίζεται ως " η σύνδεση αποθετικών συστημάτων, όμοιας ηλικίας, που συνιστά την υποδιαίρεση μιας ακολουθίας " (Brown Fisher, 1977). " Κάθε System Tract χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη χωρική κατανομή των στρωμάτων που το αποτελούν, και συνδέεται με έναν τύπο shoreline trajectory (forced regression, normal regression, transgression). Αντιπροσωπεύει μια αλλαγή στην σχέση της παροχής ιζημάτων, της ενέργειας του συστήματος, και του accommodation space " (Catuneanu, 2002 2006 ; Miall, 2010).

Λόγω του μεγάλου αριθμού μοντέλων στην Sequence Stratigraphy, ο αριθμός των System Tracts δεν είναι συγκεκριμένος. Μπορούν όμως να οριστούν τέσσερα κύρια System Tracts, τα οποία χρησιμοποιούνται από το σύνολο των μοντέλων (Catuneanu, 2006 ; Slatt, 2006 ; Coe et al.). Τα System Tracts οριοθετούν μια ολοκληρωμένη ακολουθία, και κάθε ένα ταυτίζεται με ένα shoreline trajectory.

- Το πρώτο System Tract ονομάζεται *Highstand System Tract* (HST), και σχετίζεται με *Normal Regression*. Χαρακτηρίζει το υψηλότερο επίπεδο της ακτογραμμής, με παράλληλη αύξηση του βασικού επιπέδου, με χαμηλό ρυθμό.
- Το δεύτερο System Tract ονομάζεται *Falling Stage System Tract* (FSST), και σχετίζεται με την απότομη πτώση του βασικού επιπέδου, και *Forced Regression*.
- Το τρίτο System Tract ονομάζεται *Lowstand System Tract* (LST), και σχετίζεται με *Normal Regression*. Χαρακτηρίζει χαμηλότερο επίπεδο της ακτογραμμής, και την ακόλουθη αύξηση του βασικού επιπέδου, με χαμηλό ρυθμό.
- Το τέταρτο System Tract ονομάζεται *Transgressive System Tract* (TST), και σχετίζεται με *Transgression*. Χαρακτηρίζει την απότομη αύξηση του βασικού επιπέδου με έντονο ρυθμό, και την αντίστοιχη επίκληση.

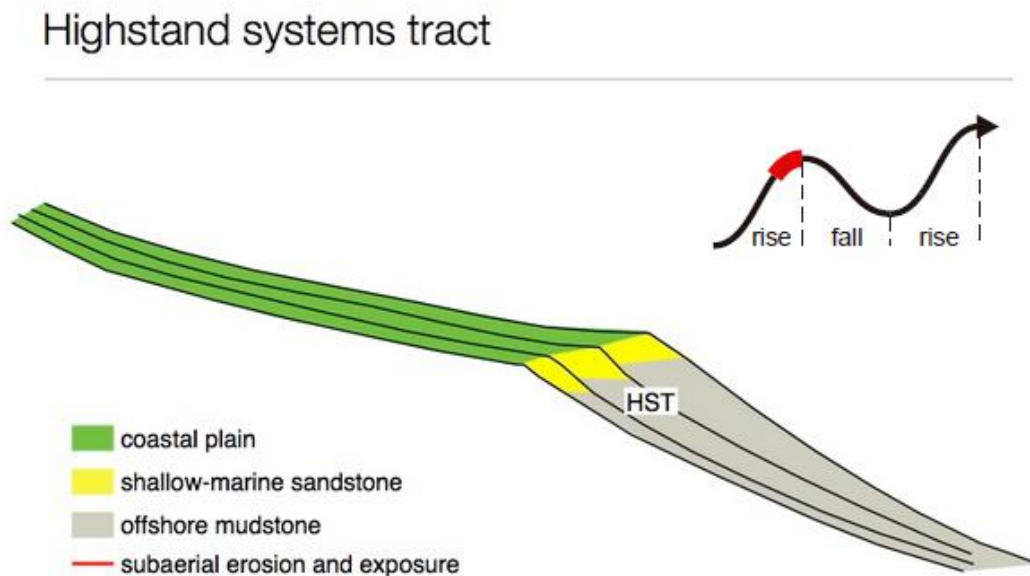
Η ολοκλήρωση του *Transgressive System Tract* (TST) οδηγεί στο *Highstand System Tract* (HST), δηλαδή την μείωση του ρυθμού αύξησης του βασικού επιπέδου, και την δημιουργία της επόμενης ακολουθίας. Η κυκλικότητα της διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 8.8.



Σχήμα 3.8. Απεικόνιση της κυκλικότητας των System Tracts. URL: researchgate.net/figure/The-four-system-tracts-relative-to-the-five-events-of-the-base-level-cycle-modified-from_fig1_316266362

3.3.1. Highstand System Tract

Κατά την διάρκεια ενός Highstand System Tract, το βασικό επίπεδο της θάλασσας αυξάνεται με χαμηλό ρυθμό, ο οποίος παράλληλα ελαττώνεται σε βάθος χρόνου. Η μικρή αύξηση δεν επιτρέπει την ικανοποιητική δημιουργία accommodation space. Το παραπάνω έλλειμμα προκαλεί την προώθηση της ακτογραμμής προς την κατεύθυνση της θάλασσας, normal regression. Παράλληλα, ο τρόπος απόθεσης των ιζημάτων οδηγεί στην προώθηση και ανύψωση της ακτογραμμής, progradation and aggradation stacking pattern. Στο πρώιμο στάδιο ενός Highstand System Tract παρατηρείται aggradation pattern, που μεταπίπτει σταδιακά σε progradation pattern, κατά το τελικό του στάδιο. Η μέγιστη κοκκομετρία των ιζημάτων που αποτίθενται στο χερσοποτάμιο (fluvial) τμήμα του Highstand System Tract, τείνει να μειώνεται με τον χρόνο, λόγω μείωσης της μεταφορικής ικανότητας, και ελάττωσης της ενέργειας του ποταμού, εξαιτίας της μείωσης κλίσης, δίνοντας ένα fining-upward vertical profile. Παραδόξως, η ποσότητα της άμμου, στο ποσοστό άμμου/αργίλου τείνει να αυξάνει, increased net amount of sand. Σε shallow marine περιβάλλοντα, ισχύει το αντίθετο, coarsening-upward vertical profile (Catuneanu, 2006). Την ολοκλήρωση του Highstand System Tract ακολουθεί η πτώση του βασικού επιπέδου με έντονο ρυθμό, Falling Stage System Tract, και την έκθεση των αποθέσεων σε χερσαίο περιβάλλον και στη διάβρωση, subaerial unconformity, κάτι που μειώνει σημαντικά την πιθανότητα διατήρησής τους. Οι fluvial, shallow water και shoreline ψαμμίτες μπορούν να αποτελέσουν πιθανούς ταμιευτήρες υδρογονανθράκων λόγω μεγάλης χωρικής έκτασης, και κατάλληλης κοκκομετρίας. Πρόβλημα για τον σχηματισμό παγίδας αποτελεί η απουσία αργιλικών πετρωμάτων (cap rock), και η ασυμφωνία που σχηματίζεται κατά το Falling Stage System Tract (Catuneanu, 2002 2006 ; Catuneanu et al, 2011 ; Coe et al, 2003 ; Emery Myers, 1996).

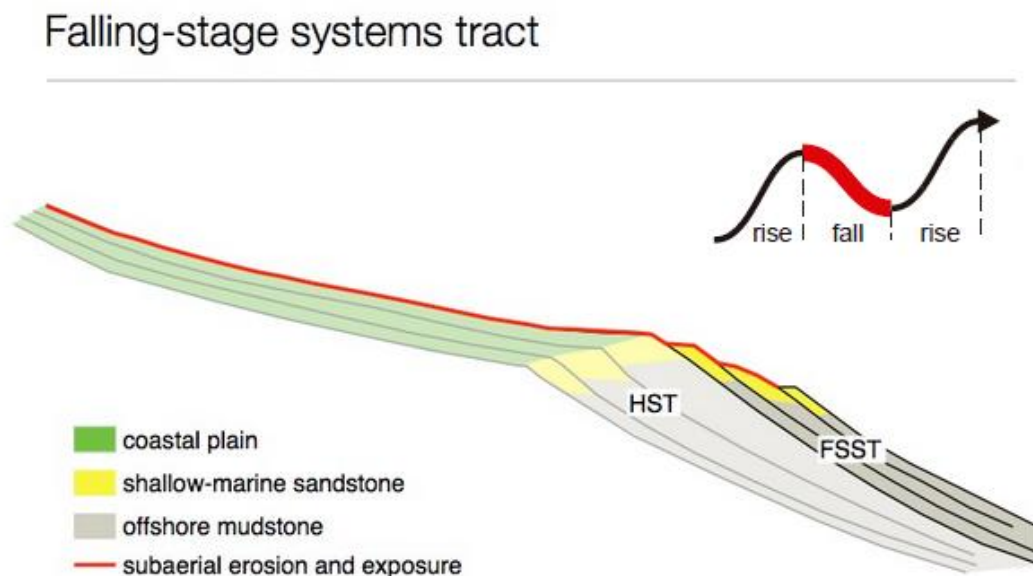


Σχήμα 3.9. Το σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο απόθεσης ιζημάτων, καθώς επίσης και την κίνηση της ακτογραμμής, κατά την διάρκεια αύξησης του βασικού επιπέδου με χαμηλό ρυθμό, Highstand System Tract. Τροποποιημένο από strata.uga.edu/sequence/tracts.html και (Catuneanu, 2006).

3.3.2. Falling Stage System Tract

Κατά την διάρκεια ενός Falling Stage System Tract, το βασικό της θάλασσας ταπεινώνεται με έντονο ρυθμό. Η παραπάνω πτώση αναγκάζει την ακτογραμμή σε κίνηση με κατεύθυνση την θάλασσα, forced regression. Οι αποθέσεις είναι κυρίως shallow-water, με χαρακτηριστική μορφή προώθησης και πτώσης, aggradation and offlap pattern, deep-water marine, και σπανίως fluvial και δελταϊκές (Catuneanu, 2002). Εξαιτίας της σημαντικής και απότομης πτώσης του βασικού επιπέδου, οι αποθέσεις fluvial και shallow-water μπορεί να αποσαθρωθούν, λόγω της δράσης κυμάτων, ή της έκθεσης τους σε χερσαίες συνθήκες. Σε περίπτωση που οι shallow-water ψαμμίτες παραμείνουν ανέπαφοι, τότε μπορούν μελλοντικά να αποτελέσουν ταμιευτήρες (Catuneanu, 2006).

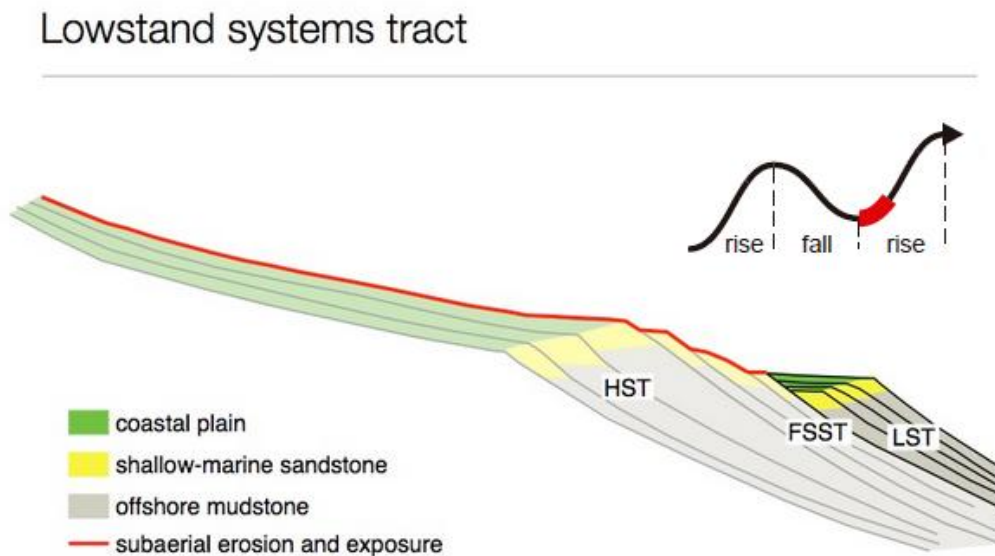
Η πτώση του βασικού επιπέδου μπορεί να οδηγήσει, πιθανώς, στη δημιουργία εγκιβωτισμένων μαιάνδρων, incised meander belts. Η ύπαρξη εγκιβωτισμένων μαιάνδρων, υποδηλώνει την πλήρη έκθεση της υφαλοκρηπίδας σε διάβρωση, οδηγεί στη μεταφορά αμμόδους ιζήματος, και την δημιουργία deep water marine ψαμμιτών, με την μορφή τουρβιδιτικών ροών. Αντιθέτως, η απουσία εγκιβωτισμένων μαιάνδρων, οδηγεί στη μεταφορά αργιλικού υλικού, την δημιουργία deep water mudstones, και υποδηλώνει με ολοκληρωμένη έκθεση της υφαλοκρηπίδας σε διάβρωση (Catuneanu, 2006). Οι τουρβιδίτες, deep water turbidite fans, είναι πλούσιοι σε αμμόδες υλικό, και παρουσιάζουν σημαντική χωρική εξάπλωση, κάτι που τους καθιστά πιθανούς μελλοντικούς ταμιευτήρες (Catuneanu, 2002 2006 ; Coe et al, 2003 ; Emery Myers, 1996).



Σχήμα 3.10. Το σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο απόθεσης ιζημάτων, καθώς επίσης και την κίνηση της ακτογραμμής, κατά την διάρκεια πτώσης του βασικού επιπέδου, με σημαντικό ρυθμό, Falling Stage System Tract. Τροποποιημένο από strata.uga.edu/sequence/tracts.html και (Catuneanu, 2006).

3.3.3. Lowstand System Tract

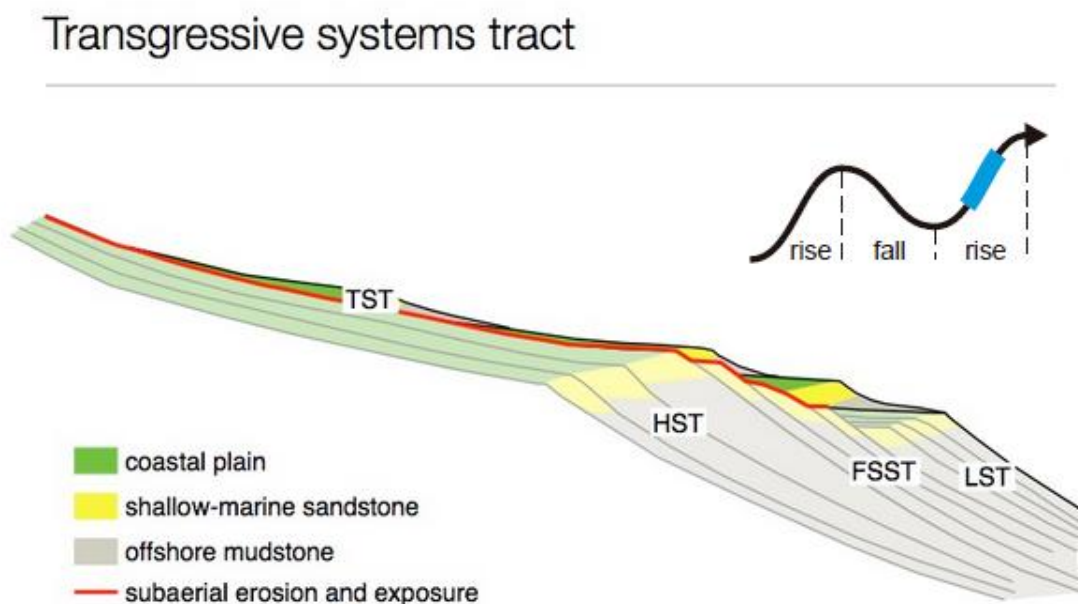
Κατά την διάρκεια ενός Lowstand System Tract, το βασικό επίπεδο της θάλασσας αυξάνεται με χαμηλό ρυθμό, ο οποίος παράλληλα αυξάνεται σε βάθος χρόνου. Ο τρόπος απόθεσης των ιζημάτων οδηγεί στην προώθηση και ανύψωση της ακτογραμμής, progradation and aggradation stacking pattern και normal regression. Η αύξηση του βασικού επιπέδου επιτρέπει την απόθεση των ιζημάτων μεγάλης κοκκομετρίας στο πλημμυρικό πεδίο του ποταμού, η οποία σταδιακά βαίνει αυξανόμενη. Το παραπάνω φαινόμενο οδηγεί στην μείωση της κοκκομετρίας του υλικού που αποτίθεται σε shallow water και deep water marine περιβάλλοντα. Οι high energy - deep water τουρβιδίτες του Falling Stage System Tract μεταπίπτουν σταδιακά σε low energy - deep water τουρβιδίτες, με ταυτόχρονη αλλαγή της κοκκομετρίας, από άμμο σε άργιλο. Στις εκβολές των ποταμών, συνήθως μαιάνδρων ή πλεξοειδών, πιθανή είναι η δημιουργία δέλτα. Οι δελταϊκές αποθέσεις καλύπτουν την subaerial unconformity που δημιουργήθηκε κατά την πτώση του βασικού επιπέδου, και την μετάπτωση από Falling Stage System Tract, σε Lowstand System Tract. Την ολοκλήρωση του Lowstand System Tract ακολουθεί η αύξηση του βασικού επιπέδου με έντονο ρυθμό, Transgressive System Tract, και την έκθεση των αποθέσεων σε περιβάλλον με έντονα θαλάσσια ρεύματα και αποσάθρωση, κάτι που μειώνει σημαντικά την πιθανότητα διατήρησής τους. Πιθανά πετρώματα ταμιευτήρες του Lowstand System Tract αποτελούν οι fluvial, channel fills, και οι δελταϊκές αποθέσεις, με υψηλή αναλογία άμμου/αργίλου, και οι αποθέσεις σε shallow marine περιβάλλοντα (Catuneanu, 2002 2006 ; Catuneanu et al, 2011 ; Coe et al, 2003 ; Emery Myers, 1996).



Σχήμα 3.11. Το σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο απόθεσης ιζημάτων, καθώς επίσης και την κίνηση της ακτογραμμής, κατά την διάρκεια αύξησης του βασικού επιπέδου με χαμηλό ρυθμό, Lowstand System Tract. Τροποποιημένο από strata.uga.edu/sequence/tracts.html και (Catuneanu, 2006).

3.3.4. Transgressive System Tract

Κατά την διάρκεια ενός Transgressive System Tract, το βασικό επίπεδο της θάλασσας αυξάνεται με υψηλό ρυθμό, ο οποίος παράλληλα αυξάνεται σε βάθος χρόνου. Η παραπάνω αλλαγή προκαλεί την κίνηση της ακτογραμμής προς την ενδοχώρα και την απόθεση σημαντικών ποσοτήτων ιζημάτων, aggradation και transgression. Παράλληλα λαμβάνει χώρα η δημιουργία ικανοποιητικού χώρου απόθεσης ιζημάτων, accommodation space. Στο Transgressive System Tract αναμένουμε την ύπαρξη όλων των πιθανών αποθέσεων, fluvial, shallow water και deep water marine (Catuneanu, 2002). Μεγάλη έκταση αποκτούν οι δύο πρώτες κατηγορίες, με κοκκομετρία άμμου, fluvial onlap, ενώ η τρίτη παρουσιάζει μικρό πάχος και διαστάσεις, με κοκκομετρία αργίλου, marine onlap. (Galloway, 1989). Η μέγιστη κοκκομετρία των ιζημάτων που αποτίθενται στο fluvial τμήμα τείνει να μειώνεται με τον χρόνο, δίνοντας ένα fining-upward vertical profile, με παράλληλη μείωση του ποσοστού άμμου/αργίλου. Σε παράκτιες, coastal, περιοχές παρουσιάζεται backstepping, και ο σχηματισμός λιμνοθάλασσας (Catuneanu, 2006). Στα σημεία με μεγαλύτερο βάθος παρουσιάζεται χαμηλή παροχή ιζημάτων, κυρίως αργίλων, ενώ παράλληλα λειτουργούν θαλάσσια ρεύματα, με αποτέλεσμα την ομαλοποίηση του υποθαλάσσιου ανάγλυφου, και τον σχηματισμό healing phase wedges. Γενικά, οι αποθέσεις του Transgressive System Tract παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες να διατηρηθούν, λόγω της σταθερότητας που παρουσιάζει το ακόλουθο Highstand System Tract. Cap rocks μπορούν να σχηματιστούν από τα αργιλικά ιζήματα που αποτίθενται κατά το Transgressive System Tract σε deep water marine συνθήκες, και καλύπτουν τα αμμώδη ιζήματα του Lowstand System Tract, δημιουργώντας δομές πιθανής παγίδευσης υδρογονανθράκων. Ομοίως, τα fluvial και shallow water ιζήματα, δύναται να αποτελέσουν μελλοντικούς ταμιευτήρες (Catuneanu, 2002 2006).

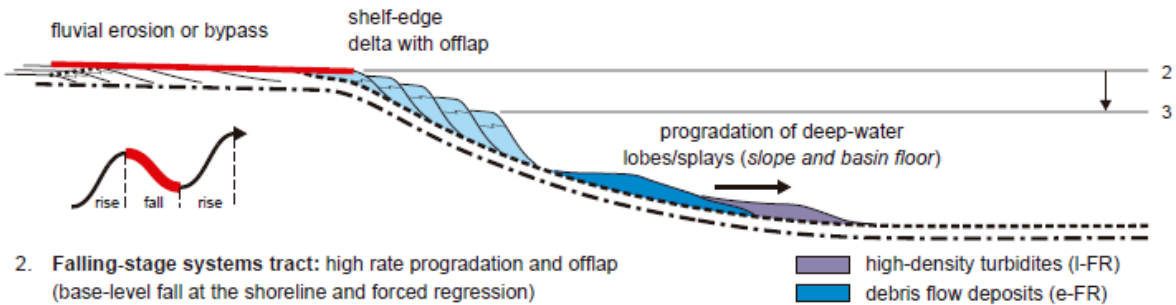


Σχήμα 3.12. Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο απόθεσης ιζημάτων, καθώς επίσης και την κίνηση της ακτογραμμής, κατά την διάρκεια έντονης αύξησης του βασικού επιπέδου, Transgressive System Tract. Τροποποιημένο από strata.uga.edu/sequence/tracts.html και (Catuneanu, 2006).

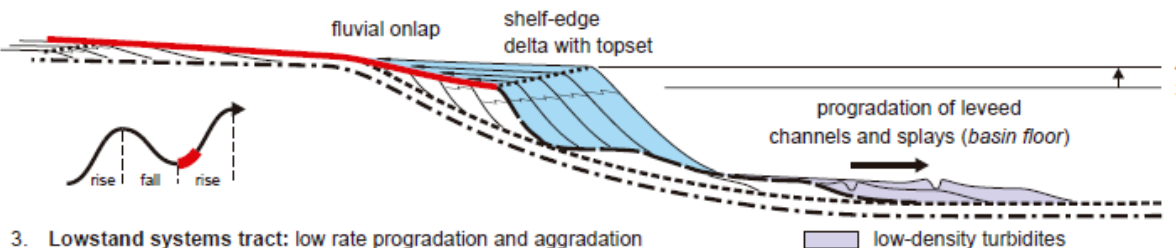
shelf delta,
aggradation & progradation



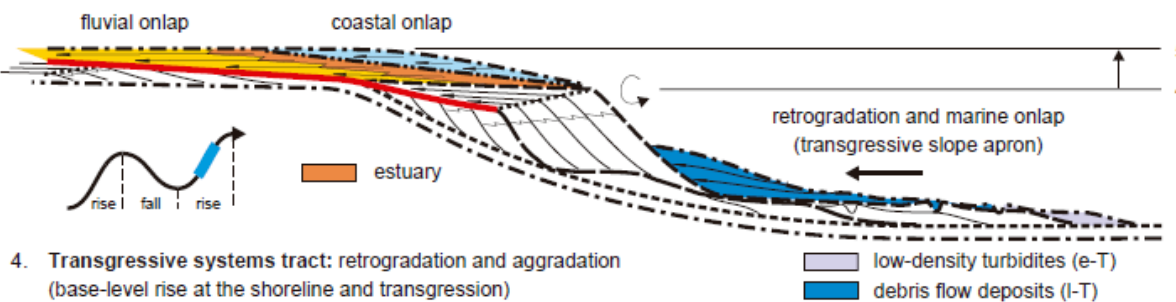
1. Highstand systems tract: low rate progradation and aggradation (base-level rise at the shoreline and normal regression)



2. Falling-stage systems tract: high rate progradation and offlap (base-level fall at the shoreline and forced regression)



3. Lowstand systems tract: low rate progradation and aggradation (base-level rise at the shoreline and normal regression)



4. Transgressive systems tract: retrogradation and aggradation (base-level rise at the shoreline and transgression)

— subaerial unconformity
--- correlative conformity
- - - basal surface of forced regression
- · - · - transgressive ravinement surface

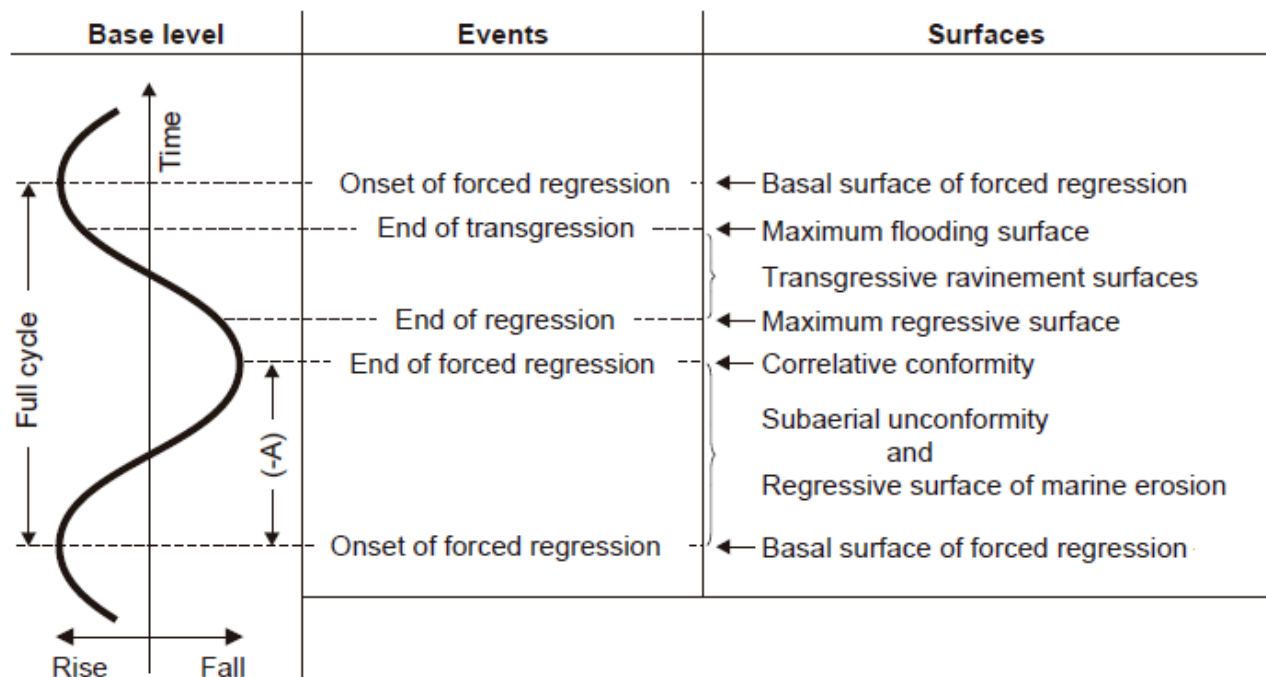
— maximum regressive surface
- - - maximum flooding surface
- · - · - within-trend normal regressive surface
~ ~ ~ lateral shifts of facies

Σχήμα 3.13. Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει με ξεκάθαρο τρόπο όλα τα System Tracts, την κίνηση της ακτογραμμής σε κάθε περίπτωση, καθώς και την μορφή των ιζηματογενών αποθέσεων (Catuneanu, 2006). Παράλληλα, αναγράφονται και οι επιφάνειες που χρησιμοποιούνται στην Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια. Η παραπάνω διαδικασία, απόθεσης και κίνησης, αποτελεί μια ολοκληρωμένη ακολουθία (Catuneanu, 2002 2006 ; Coe et al, 2003 ; Emery Myers, 1996).

3.4. Stratigraphic Surfaces - Στρωματογραφικές Επιφάνειες

Οι στρωματογραφικές επιφάνειες, Stratigraphic Surfaces, " σηματοδοτούν αλλαγές σε αποθετικά καθεστώτα, depositional regimes, δηλαδή, αλλαγές στο αποθετικό περιβάλλον, στη μεταφορά φορτίου και στη συνολική ενέργεια του συστήματος, μέσα στον χρόνο. Προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της μεταβολής του βασικού επιπέδου, base level change, και της ιζηματοπόθεσης, sedimentation " (Catuneanu, 2006). Οι στρατιγραφικές επιφάνειες αναγνωρίζονται στα σεισμικά δεδομένα με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η γεωμετρία τους, η φύση των γεωλογικών επαφών που τις ορίζουν, σύμφωνες ή ασύμφωνες

Στην στρωματογραφία ιζηματογενών ακολουθιών χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο, επιφάνειες που συνδέονται με την συνεχή αλλαγή του βασικού επιπέδου, της θέσης της ακτογραμμής, και των System Tracts. Αυτές οι επιφάνειες ονομάζονται Επιφάνειες Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών, Sequence Stratigraphic Surfaces. Παρουσιάζουν συγκεκριμένα χωρικά χαρακτηριστικά, όπως η γεωμετρία τους, και συνήθως ταυτίζονται χρονικά με την ολοκλήρωση, ή την εκκίνηση, ενός System Tract (Catuneanu, 2006 2002 ; Catuneanu et al, 2011 ; Miall, 2010).



Σχήμα 3.14. Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει τον συσχετισμό ανάμεσα στην αλλαγή του βασικού επιπέδου, την αλλαγή των System Tracts, και την δημιουργία Sequence Stratigraphic Surfaces. Παρατηρείται ότι ορισμένες επιφάνειες δημιουργούνται κατά την διάρκεια ενός System Tract, και όχι κατά την έναρξη ή τον τερματισμό του (Catuneanu, 2006).

Κάθε επιφάνεια παρουσιάζει ορισμένα διαγνωστικά κριτήρια, όπως η γεωμετρία της, η φύση της επαφής, σύμφωνη ή ασύμφωνη, τα πετρώματα που βρίσκονται άνω και κάτω από αυτήν. Η εύρεση των παραπάνω χαρακτηριστικών πραγματοποιείται συνήθως με την μελέτη σεισμικών δεδομένων και υλικού δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Miall, 2010 ; Catuneanu, 2002 2006).

Λόγο του σημαντικό αριθμού μοντέλων στην Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών, ο αριθμός των Stratigraphic Surfaces δεν είναι συγκεκριμένος. Μπορεί όμως να διακριθεί ένα σύνολο επιφανειών, οι οποίες είναι κοινές σε σχεδόν όλα τα μοντέλα. Οι παραπάνω επιφάνειες είναι έξι στον αριθμό, και παρουσιάζονται στην συνέχεια.

1. Η Χερσαία Ασύμφωνη Επιφάνεια, *Subaerial Unconformity*.
2. Η Σχετική Σύμφωνη Επιφάνεια, *Correlative Conformity*.
3. Η Βασική Επιφάνεια Υποχρεωτικής Απόσυρσης, *Basal Surface of Forced Regression*.
4. Η Επιφάνεια Απόσυρσης Θαλάσσιας Διάβρωσης, *Regressive Surface of Marine Erosion*.
5. Η Μέγιστη Επιφάνεια Απόσυρσης, *Maximum Regressive Surface*.
6. Η Μέγιστη Πλημμυρική Επιφάνεια, *Maximum Flooding Surface*.

3.4.1. Χερσαία Ασύμφωνη Επιφάνεια - *Subaerial Unconformity*

Η Χερσαία Ασύμφωνη Επιφάνεια είναι " μια επιφάνεια αποσάθρωσης, ή τουλάχιστον μη ιζηματοπόθεσης, που σχηματίζεται κατά την πτώση του βασικού επιπέδου, λόγω της δράσης της ποτάμιας, αιολικής, και θαλάσσιας αποσάθρωσης. Ο σχηματισμός της ξεκινά κατά την εκκίνηση της πτώσης του βασικού επιπέδου, και την απόσυρση της θάλασσας, *forced regression*, και αποκτά την μέγιστη έκταση της κατά την παύση της πτώσης του βασικού επιπέδου, *end of forced regression* " (Catuneanu, 2006). Το αίτιο του σχηματισμού της Χερσαίας Ασύμφωνης Επιφάνειας αποτελεί *συνήθως*, η μόνιμη ανάγκη των ποτάμιων συστημάτων να προσαρμόζουν το προφίλ ισορροπίας τους, ως αντίδραση στην πτώση του βασικού επιπέδου στην περιοχή (Catuneanu, 2002 2006 ; Emery Myers, 1996). Αυτή η μεταβολή αποτρέπει την ιζηματοπόθεση στο χερσαίο περιβάλλον, καθώς τα ποτάμια ιζήματα μεταφέρονται προς τα κατάντη στο σύνολο τους. Αντιθέτως, ενθαρρύνεται η αποσάθρωση. Σπανιότερα, *Subaerial Unconformity* μπορεί να σχηματιστεί κατά την περίοδο σταθερότητας του βασικού επιπέδου, εάν η ενέργεια του θαλάσσιου συστήματος είναι πολύ υψηλή, δηλαδή λαμβάνει χώρα *wave scouring* (Catuneanu, 2006).

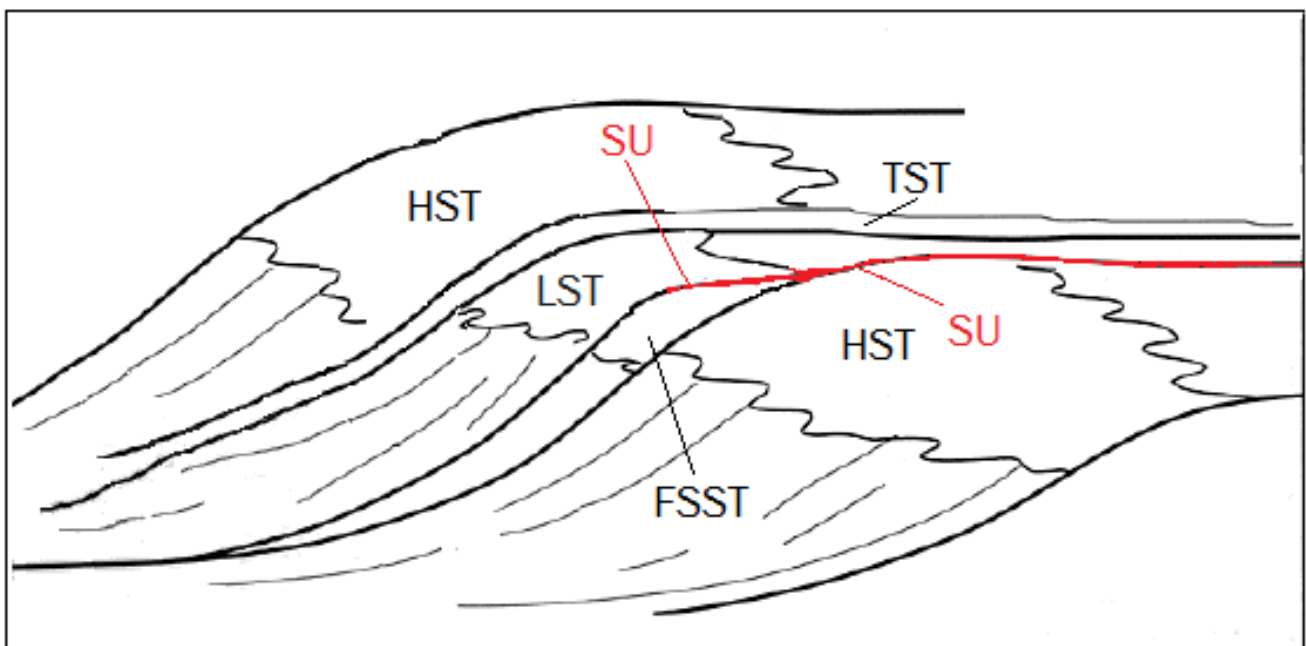
Κάτω από την επιφάνεια απαντώνται συνήθως ιζήματα ποτάμιας, παράκτιας και θαλάσσιας φύσης, τα οποία αποτέθηκαν κατά την διάρκεια του *Highstand System Tract* και του *Falling Stage System Tract*.

Αντιθέτως, πάνω από αυτήν απαντώνται πάντα ιζήματα που υποδηλώνουν χερσαίο περιβάλλον, συνήθως *fluvial* ιζήματα (Catuneanu, 2002 2006). Τα παραπάνω ιζήματα αποτίθενται κατά την διάρκεια του *Lowstand System Tract*. Η διατήρηση των χερσαίων ιζημάτων είναι μεγάλης σημασίας για την σίγουρη αναγνώριση της *Subaerial Unconformity*.

Ο τερματισμός της *Subaerial Unconformity* προς την κατεύθυνση της θάλασσας προσδιορίζει το επίπεδο της ακτογραμμής, κατά το τέλος της πτώσης του βασικού επιπέδου και της απόσυρσης της θάλασσας, *forced regression*. Η επέκταση της *Subareal Unconformity* προς την θάλασσα αποτελεί την Σχετική Σύμφωνη Επιφάνεια, *Correlative Conformity*.

Η διάγνωση της Subaerial Unconformity πραγματοποιείται με ορισμένα κριτήρια, όπως τα παρακάτω (Catuneanu, 2006, Figure 4.9. ; Embry et al, 2007, Figure 9. ; Coe et al, 2003, Table 4.1 ; Embry Catuneanu, 2002 ; Emery, Myers, 1996).

- Φύση επαφής: Ασύμφωνη
- Φύση αποθέσεων:
Πάνω από την επιφάνεια: Χερσαία
Κάτω από την επιφάνεια: Fluvial, ποτάμια, παράκτια, θαλάσσια
- System Tracts:
Πάνω από την επιφάνεια: αρχικά LST, στην συνέχεια TST
Κάτω από την επιφάνεια: HST, FSST
- Αλλαγή βασικού επιπέδου:
Πάνω από την επιφάνεια: αρχικά NR, στην συνέχεια T
Κάτω από την επιφάνεια: NR, FR
- Τερματισμοί στρωμάτων:
Άνω : Fluvial Onlap
Κάτω: Truncation, Toplap



Σχήμα 3.15. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται μια ακολουθία. Πάνω στα σεισμικά δεδομένα έχει πραγματοποιηθεί ερμηνεία με την βοήθεια των αρχών της Στρωματογραφίας Ιζηματογενών Ακολουθιών. Γίνεται αντιληπτό ότι: η ολοκλήρωση του Highstand System Tract, συμπεριφορά NR, οδηγεί στο Falling Stage System Tract, συμπεριφορά FR. Η πτώση του βασικού επιπέδου έχει ως αποτέλεσμα την αποσάθρωση των ιζημάτων. Κάτω από την SU, κόκκινη γραμμή, παρατηρούνται υλικά του HST - NR, και του FSST - FR. Πάνω από την επιφάνεια, παρατηρούνται υλικά LST - NR. Την ολοκλήρωση του LST, θα ακολουθήσει το TST με συμπεριφορά T. Κατά την διάρκεια της ερμηνείας η επιφάνεια τονίζεται πάντα με κόκκινο χρώμα και με τα γράμματα SU. Τροποποιημένο από (Emery Myers, 1996).

3.4.2. Σχετική Σύμφωνη Επιφάνεια - Correlative Conformity

Η Σχετική Σύμφωνη Επιφάνεια " σχηματίζεται εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος, κατά την παύση της πτώσης του βασικού επιπέδου λόγω της απόσυρσης της θάλασσας. Προσεγγίζει τον βυθό της θάλασσας, κατά το τέλος της Forced Regression και αποτελεί νοητή προέκταση της Subaerial Unconformity, προς την διεύθυνση της θάλασσας " (Catuneanu, 2002 2006 ; Hunt Tucker, 1992 ; Miall, 2010). Η ανίχνευση της Correlative Conformity είναι πολλές φορές προβληματική, έως αδύνατη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια διαχωρίζει δύο System Tracts, που την στιγμή του σχηματισμού της, αποθέτουν παρόμοια ιζήματα, σε παρόμοια αποθετικά περιβάλλοντα και με παρόμοιο τρόπο (Catuneanu, 2006 ; Embry et al, 2007). Συνεπώς, η Correlative Conformity αποκτά πολλές φορές καθαρά θεωρητικό χαρακτήρα κατά την διάρκεια της έρευνας και η σημασίας της είναι συνήθως περιορισμένη.

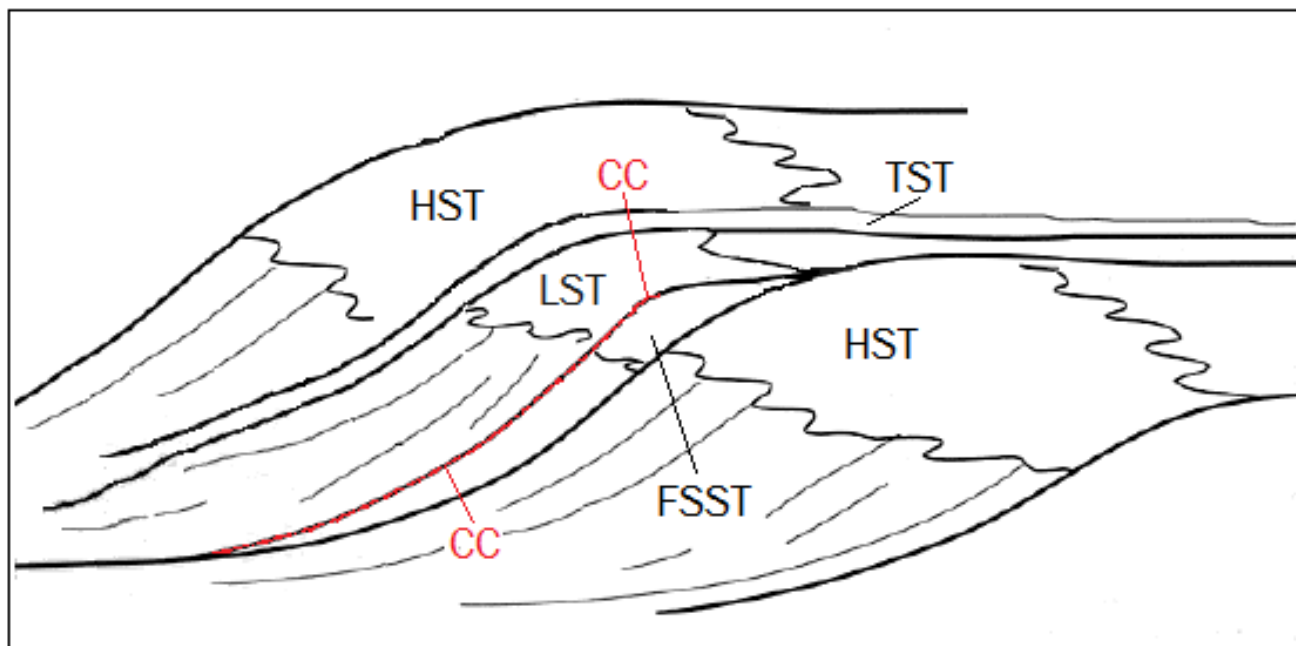
Κάτω από την Correlative Conformity απαντώνται τα ιζήματα που αποτέθηκαν κατά το Falling Stage System Tract, κατά την απότομη πτώση του βασικού επιπέδου που προηγήθηκε, με συμπεριφορά Forced Regression. Ο χαρακτήρας τους είναι παράκτιος και θαλάσσιος.

Στα στρώματα πάνω από την επιφάνεια απαντώνται οι αποθέσεις του Lowstand System Tract, που θα λάβει χώρα στην λεκάνη ιζηματοπόθεσης κατά την επερχόμενη στατικότητα - αύξηση με χαμηλό ρυθμό του βασικού επιπέδου. Ο χαρακτήρας των αποθέσεων είναι κυρίως fluvial, παράκτιος, και σε μεγάλα βάθη μεταπίπτει σε θαλάσσιο. Η επαφή της επιφάνειας με τα παραπάνω ιζήματα θα είναι σύμφωνη, καθώς δεν πραγματοποιείται διακοπή της ιζηματοπόθεσης.

Ακολούθως, η αργή αύξηση του βασικού επιπέδου θα οδηγήσει στην μέγιστη προώθηση της ακτογραμμής προς την κατεύθυνση της θάλασσας, συμπεριφορά progradation. Η προώθηση αυτή ορίζει την Επιφάνεια Μέγιστης Απόσυρσης, Maximum Regressive Surface.

Η διάγνωση της Correlative Conformity πραγματοποιείται με ορισμένα κριτήρια, όπως τα παρακάτω (Catuneanu, 2006, Figure 4.9. ; Embry et al, 2007, Figure 9. ; Coe et al, 2003, Table 4.1 ; Embry Catuneanu, 2002 ; Emery, Myers, 1996).

- Φύση επαφής: Σύμφωνη
- Φύση αποθέσεων:
Πάνω από την επιφάνεια: Παράκτια, θαλάσσια, σπανίως fluvial.
Κάτω από την επιφάνεια: Παράκτια, θαλάσσια
- System Tracts:
Πάνω από την επιφάνεια: LST
Κάτω από την επιφάνεια: FSST
- Αλλαγή βασικού επιπέδου:
Πάνω από την επιφάνεια: NR
Κάτω από την επιφάνεια: FR
- Τερματισμοί στρωμάτων:
Άνω : Downlap
Κάτω: N/A



Σχήμα 3.16. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η Correlative Conformity. Όπως φαίνεται στο σχήμα, αποτελεί προέκταση της Subaerial Unconformity προς την κατεύθυνση της θάλασσας, και προσεγγίζει το βασικό επίπεδο κατά την ολοκλήρωση της FR. Κάτω από την επιφάνεια παρατηρούνται ιζήματα του FSST, συμπεριφορά FR. Πάνω από την επιφάνεια παρατηρούνται ιζήματα του LST, συμπεριφορά NR. Κατά την διάρκεια της ερμηνείας, η επιφάνεια τονίζεται με τα γράμματα CC. Τροποποιημένο από (Emery Myers, 1996).

3.4.3. Βασική Επιφάνεια Υποχρεωτικής Απόσυρσης - Basal Surface of Forced Regression

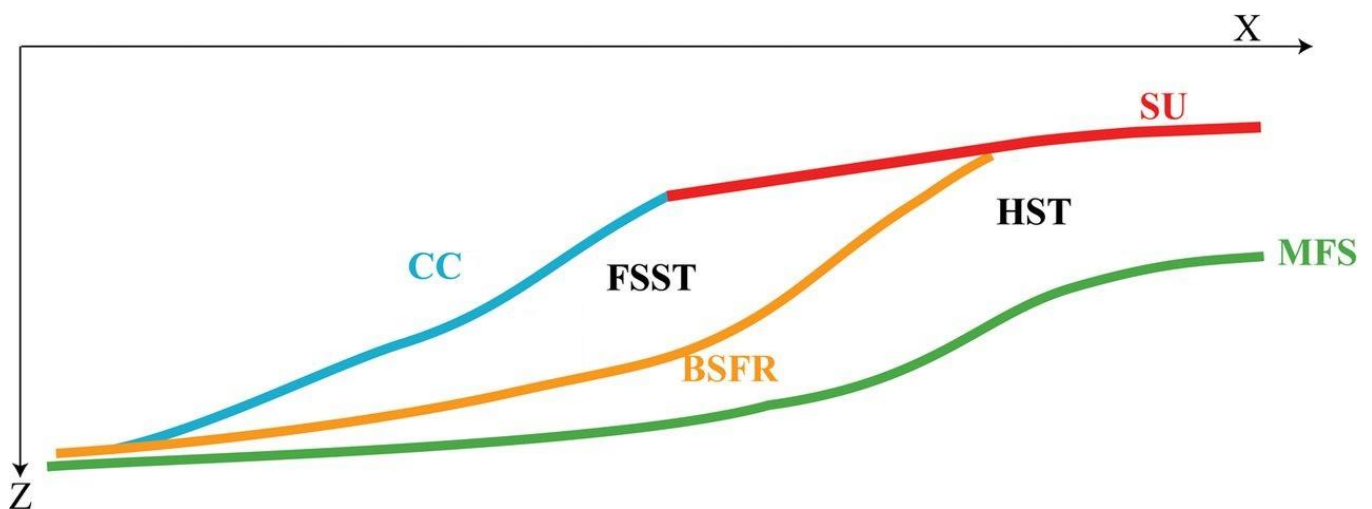
Η Βασική Επιφάνεια Υποχρεωτικής Απόσυρσης ορίζεται ως η επιφάνεια που " προσεγγίζει τον πυθμένα της θάλασσας, κατά την εκκίνηση της πτώσης του βασικού επιπέδου " (Catuneanu, 2006 ; Miall, 2010). Πρόκειται δηλαδή για την ανώτερη επιφάνεια του Highstand System Tract, κατά την περίοδο μετάπτωσης του στο Falling Stage System Tract. Λόγο της πτώσης του βασικού επιπέδου, η επιφάνεια υπόκειται την έντονη δράση των κυμάτων και των θαλάσσιων ρευμάτων. Στα σημεία που η επιφάνεια αποσαθρώνεται, μπορεί να οριστεί η Επιφάνεια Απόσυρσης της Θαλάσσιας Διάβρωσης, Regressive Surface of Marine Erosion. Επιπλέον, η επιφάνεια δύναται να εκτεθεί και σε χερσαία αποσάθρωση, και να ενσωματωθεί στην Subaerial Unconformity (Miall, 2010). Η Basal Surface of Forced Regression θεωρείται ως υψηλής θεωρητικής σημασίας. Στην πράξη αντιθέτως, η αξία της είναι πολύ μικρή (Embry et al, 2007), καθώς ο ακριβής προσδιορισμός της είναι σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις αδύνατος. Ο παραπάνω περιορισμός οφείλεται στην έντονη αποσάθρωση που επηρεάζει την επιφάνεια, στο γεγονός ότι η μεταβολή του βασικού επιπέδου δεν ταυτίζεται χρονικά με την κίνηση της ακτογραμμής, και στο γεγονός ότι βρίσκεται συνήθως σε συμφωνία με μεταγενέστερες αποθέσεις.

Κάτω από την Basal Surface of Forced Regression απαντώνται τα ιζήματα που αποτέθηκαν κατά το Highstand System Tract, την περίοδο σχετικής σταθερότητας του βασικού επιπέδου.

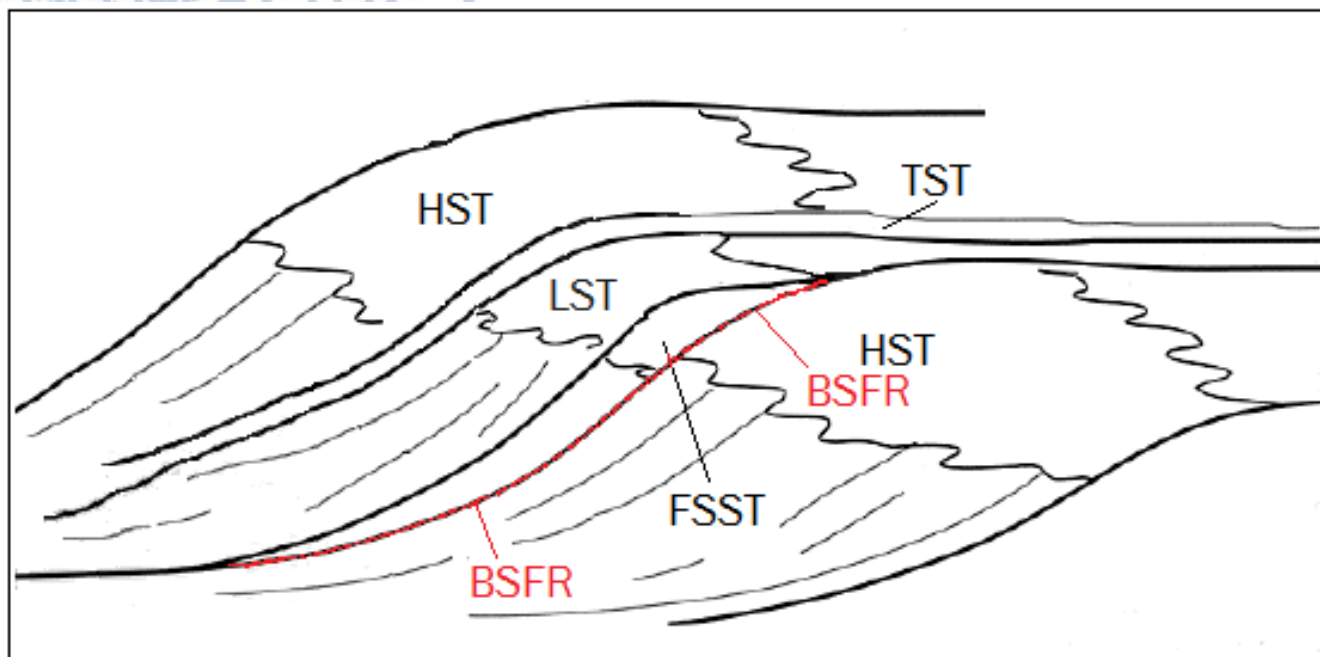
Πάνω από την επιφάνεια απαντώνται τα ιζήματα του Falling Stage System Tract, που συνδέεται με απότομη πτώση του βασικού επιπέδου. Ο χαρακτήρας των παραπάνω ιζημάτων είναι καθαρά θαλάσσιος.

Η διάγνωση της Basal Surface of Forced Regression πραγματοποιείται με ορισμένα κριτήρια, όπως τα παρακάτω (Catuneanu, 2006, Figure 4.9. ; Embry et al, 2007, Figure 9. ; Coe et al, 2003, Table 4.1 ; Embry Catuneanu, 2002 ; Emery, Myers, 1996).

- Φύση επαφής: Σύμφωνη / Ασύμφωνη
- Φύση αποθέσεων:
Πάνω από την επιφάνεια: Θαλάσσια
Κάτω από την επιφάνεια: Fluvial, ποτάμια, παράκτια, θαλάσσια
- System Tracts:
Πάνω από την επιφάνεια: FSST
Κάτω από την επιφάνεια: HST
- Αλλαγή βασικού επιπέδου:
Πάνω από την επιφάνεια: FR
Κάτω από την επιφάνεια: NR
- Τερματισμοί στρωμάτων:
Άνω : Downlap
Κάτω: N/A



Σχήμα 3.17. Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει την σχετική θέση των SU, CC, BSFR και MFS επιφανειών. Παράλληλα τονίζεται η θέση των Highstand και Falling Stage System Tracts. Η επιφάνεια CC αποτελεί προέκταση της SU προς την θάλασσα, και βρίσκεται στην κορυφή του FSST. Η επιφάνεια SU αντιπροσωπεύει την μέγιστη υποχώρηση της ακτογραμμής. Η επιφάνεια BSFR αναλογεί στην έναρξη πτώσης του βασικού επιπέδου. Η επιφάνεια MFS θα αναλυθεί στην συνέχεια, και αντιπροσωπεύει το μέγιστο επίπεδο που καλύφθηκε από νερό, κατά την επίκλυση του Transgressive System Tract. Το HST βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια MFS, καθώς ακολουθεί το TST (Qayyum et al, 2014).



Σχήμα 3.18. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η Basal Surface of Forced Regression. Όπως φαίνεται στην εικόνα, αποτελεί την ανώτερη επιφάνεια του HST, και ταυτίζεται με τον πυθμένα της θάλασσας κατά την ολοκλήρωση της NR και την έναρξη της FR. Κάτω από την επιφάνεια έχει αποτεθεί υλικό από την λειτουργία του HST. Πάνω από την επιφάνεια παρατηρούνται ιζήματα του FSST, συμπεριφορά FR. Κατά την διάρκεια της ερμηνείας, η επιφάνεια τονίζεται με τα γράμματα BSFR. Τροποποιημένο από (Emery Myers, 1996).

3.4.4. Επιφάνεια Απόσυρσης Θαλάσσιας Διάβρωσης - Regressive Surface of Marine Erosion

Η Επιφάνεια Απόσυρσης Θαλάσσιας Διάβρωσης σχηματίζεται εξαιτίας της απότομης πτώσης του βασικού επιπέδου, κατά την διάρκεια του Falling Stage System Tract. Αποτελεί αποτέλεσμα της διάβρωσης, λόγω της δράσης κυμάτων και θαλάσσιων ρευμάτων, της Basal Surface of Forced Regression. Η διάβρωση εντοπίζεται κυρίως στην κατωφέρεια του περιβάλλοντος ιζηματοπόθεσης, ενώ σε περιοχές κοντά στην ακτογραμμή, και σε μεγαλύτερα βάθη, πραγματοποιείται ιζηματοπόθεση με την μορφή προώθησης και πρόσχωσης αντίστοιχα (Catuneanu, 2006 ; Miall, 2010),

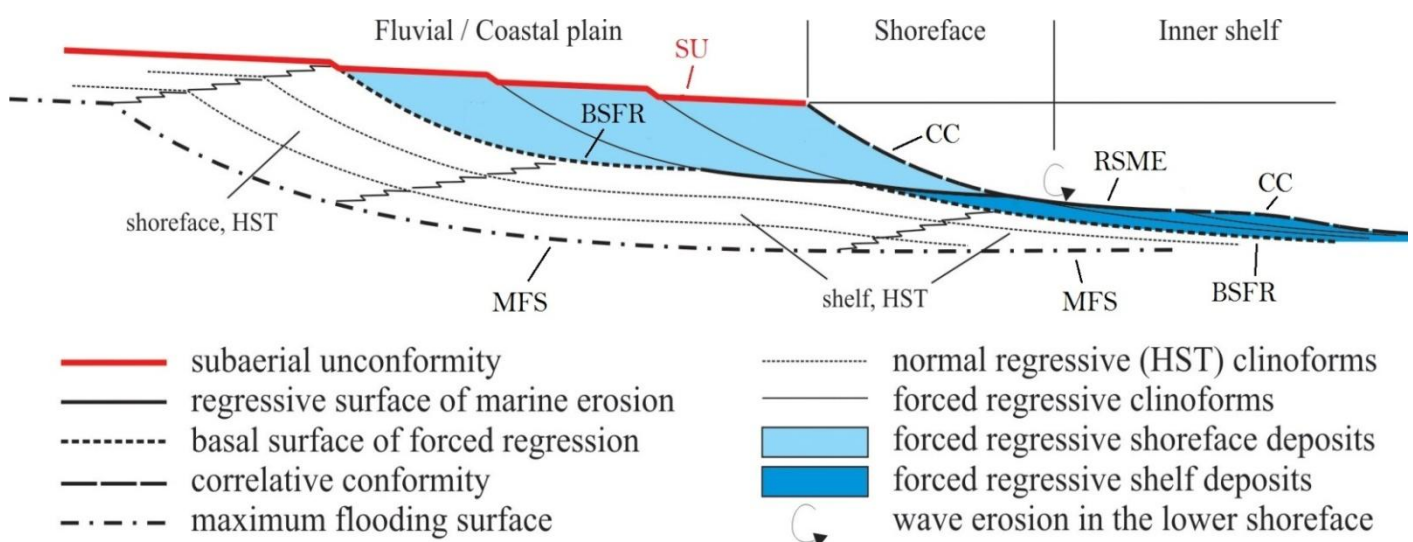
Η δράση της διάβρωσης συνεχίζεται καθ'όλη την πτώση του βασικού επιπέδου, με αποτέλεσμα η Regressive Surface of Marine Erosion να αποκτά σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντική έκταση. Η σταθεροποίηση του βασικού επιπέδου οδηγεί στο Lowstand System Tract, του οποίου οι αποθέσεις θα καλύψουν την επιφάνεια, αυξάνοντας τις πιθανότητες διατήρησης της.

Κάτω από την Regressive Surface of Marine Erosion απαντώνται τα θαλάσσια ιζήματα που αποτέθηκαν κατά το Highstand System Tract, την περίοδο σταθερότητας του βασικού επιπέδου που προηγήθηκε, με συμπεριφορά Normal Regression. Εάν η επιφάνεια αποκτήσει μεγάλη έκταση, τότε κάτω από αυτήν μπορεί να απαντώνται τα ιζήματα βαθιάς θάλασσας που αποτέθηκαν κατά την διάρκεια του Falling Stage System Tract, που λειτουργεί παράλληλα με τον σχηματισμό της επιφάνειας.

Στα στρώματα πάνω από την επιφάνεια απαντώνται οι παράκτιες αποθέσεις του Falling Stage System Tract, που θα λάβει χώρα κατά την απότομη πτώση του βασικού επιπέδου.

Η διάγνωση της Regressive Surface of Marine Erosion πραγματοποιείται με ορισμένα κριτήρια, όπως τα παρακάτω (Catuneanu, 2006, Figure 4.9. ; Embry et al, 2007, Figure 9. ; Coe et al, 2003, Table 4.1 ; Embry Catuneanu, 2002 ; Emery, Myers, 1996).

- Φύση επαφής: Ασύμφωνη
- Φύση αποθέσεων:
Πάνω από την επιφάνεια: Παράκτια, θαλάσσια
Κάτω από την επιφάνεια: Θαλάσσια
- System Tracts:
Πάνω από την επιφάνεια: FSST
Κάτω από την επιφάνεια: HST
- Αλλαγή βασικού επιπέδου:
Πάνω από την επιφάνεια: FR
Κάτω από την επιφάνεια: NR
- Τερματισμοί στρωμάτων:
Άνω : Marine Onlap
Κάτω: Truncation



Σχήμα 3.19. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ο συσχετισμός των SU, BSFR, CC, MFS, και RSME επιφανειών. Τροποποιημένο από (Catuneanu, 2006).

3.4.5. Μέγιστη Επιφάνεια Απόσυρσης - *Maximum Regressive Surface*

Η Μέγιστη Επιφάνεια Απόσυρσης ορίζεται ως η μέγιστη προώθηση της ακτογραμμής προς την κατεύθυνση της θάλασσας. Η παραπάνω κατάσταση πραγματοποιείται κατά την διάρκεια σταθεροποίηση και αύξησης με χαμηλό ρυθμό του βασικού επιπέδου. Συμπίπτει με την ολοκλήρωση του Lowstand System Tract και την μετάπτωση του σε Transgressive System Tract. Η παύση της λειτουργίας του LST, και κατά συνέπεια η οριοθέτηση της Maximum Regressive Surface, λαμβάνει χώρα όταν ο ρυθμός αύξησης του βασικού επιπέδου επιτρέψει την αύξηση του accommodation space, με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι καταλαμβάνεται από τα ιζήματα που αποτίθενται (Catuneanu, 2002 2006 ; Catuneanu et al, 2011 ; Coe et al, 2003 ; Emery Myers, 1996). Ως αποτέλεσμα της παραπάνω αλλαγής, η προώθηση της ακτογραμμής μεταπίπτει σε οπισθοδρόμηση, και λαμβάνει χώρα επίκλυση.

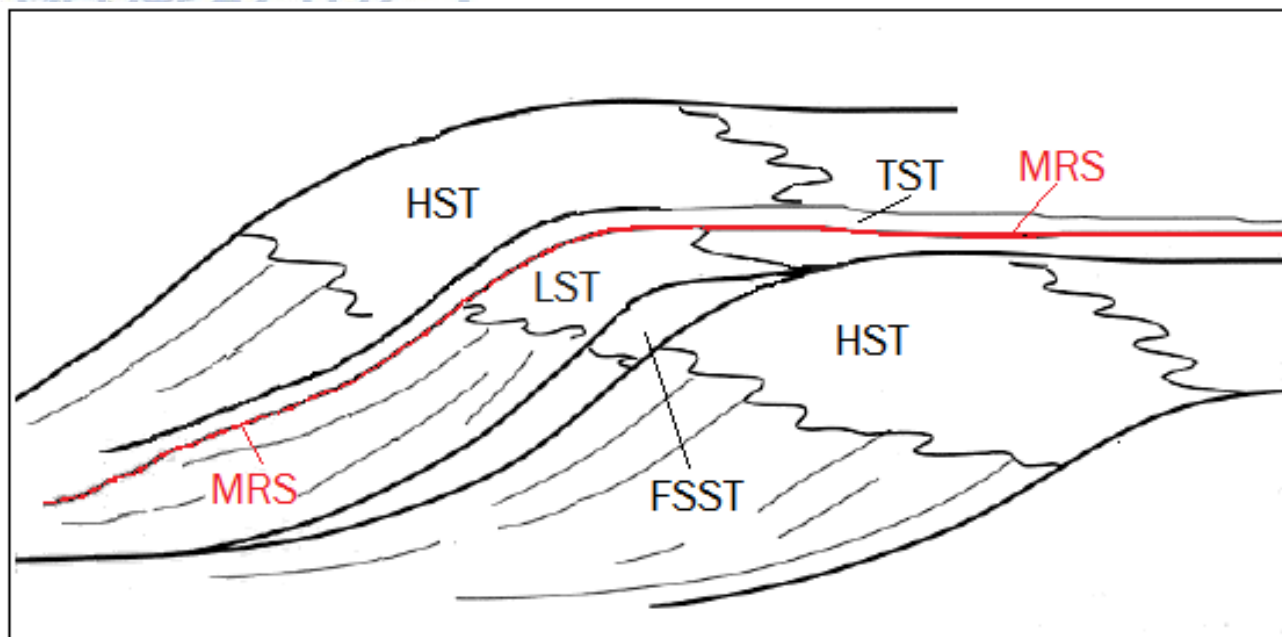
Η αναγνώριση της επιφάνειας είναι σχετικά δύσκολη σε αποθέσεις μεγάλου βάθους, λόγω της ομαλότητας των αποθέσεων. Αντιθέτως, σε αποθέσεις μικρού βάθους, η αναγνώριση της είναι πιο εύκολη. Η διατήρηση της είναι υψηλότερη σε μεγαλύτερα βάθη ενώ σε ρηχότερες συνθήκες μπορεί να πραγματοποιηθεί η διάβρωση της κατά την επερχόμενη αύξηση του βασικού επιπέδου (Catuneanu, 2002 2006),

Κάτω από την Maximum Regressive Surface απαντώνται τα ιζήματα που αποτέθηκαν κατά το Lowstand System Tract, κατά την περίοδο σταθερότητας και μικρής αύξησης του βασικού επιπέδου που προηγήθηκε, με συμπεριφορά Normal Regression. Ο χαρακτήρας των αποθέσεων είναι fluvial, παράκτιος και θαλάσσιος, δηλαδή το σύνολο των αποθέσεων του Lowstand System Tract.

Πάνω από την επιφάνεια απαντώνται οι αποθέσεις του Transgressive System Tract, που θα λάβει χώρα στην λεκάνη ιζηματοπόθεσης κατά την επερχόμενη αύξηση του βασικού επιπέδου με υψηλό ρυθμό. Ο χαρακτήρας των αποθέσεων είναι fluvial, παράκτιος, και θαλάσσιος.

Η διάγνωση της Maximum Regressive Surface πραγματοποιείται με ορισμένα κριτήρια, όπως τα παρακάτω (Catuneanu, 2006, Figure 4.9. ; Embry et al, 2007, Figure 9. ; Coe et al, 2003, Table 4.1 ; Embry Catuneanu, 2002 ; Emery, Myers, 1996).

- Φύση επαφής: Σύμφωνη
- Φύση αποθέσεων:
Πάνω από την επιφάνεια: Fluvial, παράκτια, θαλάσσια
Κάτω από την επιφάνεια: Fluvial, παράκτια, θαλάσσια
- System Tracts:
Πάνω από την επιφάνεια: TST
Κάτω από την επιφάνεια: LST
- Αλλαγή βασικού επιπέδου:
Πάνω από την επιφάνεια: T
Κάτω από την επιφάνεια: NR
- Τερματισμοί στρωμάτων:
Άνω : Marine Onlap
Κάτω: N/A



Σχήμα 3.20. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η Maximum Regressive Surface. Όπως φαίνεται στην εικόνα, αποτελεί την ανώτερη επιφάνεια του LST, και ταυτίζεται με τον πυθμένα της θάλασσας κατά την ολοκλήρωση της Normal Regression και την έναρξη της επίκλυσης. Κάτω από την επιφάνεια έχει αποθεθεί υλικό του Lowstand System Tract, και πάνω από την επιφάνεια παρατηρούνται ιζήματα του TS. Κατά την διάρκεια της ερμηνείας, η επιφάνεια τονίζεται με τα γράμματα MRS. Τροποποιημένο από (Emery Myers, 1996).

3.4.6. Μέγιστη Πλημμυρική Επιφάνεια - Maximum Flooding Surface

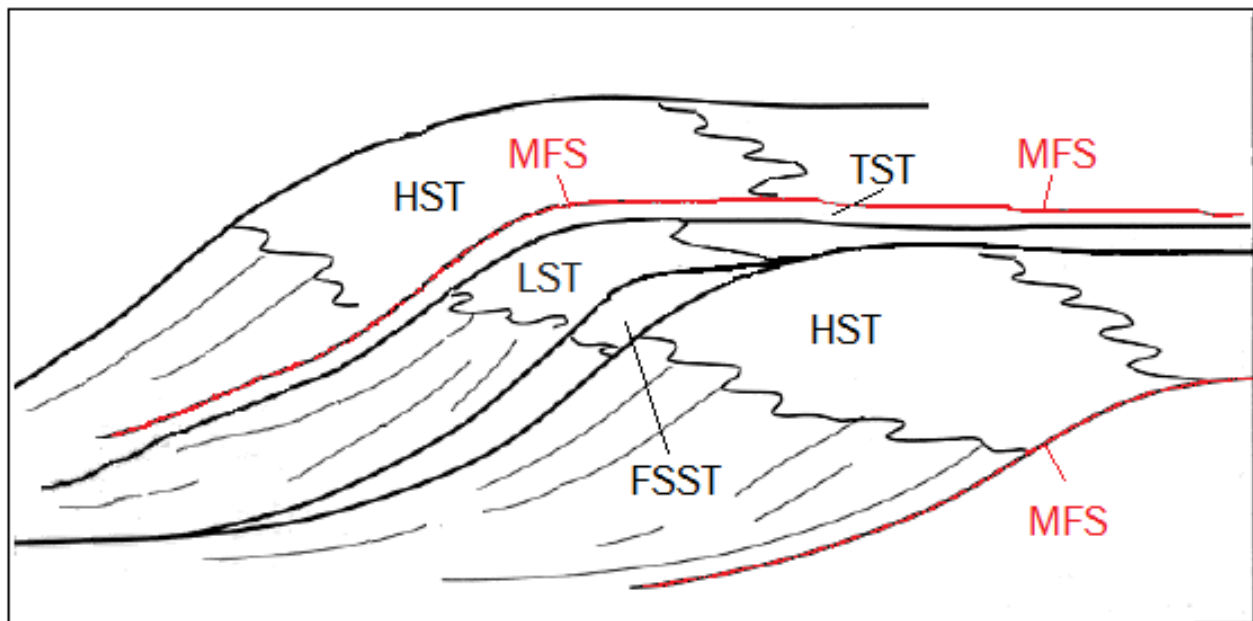
Η μετάπτωση από το Transgressive System Tract, στο Highstand System Tract, λαμβάνει χώρα όταν το βασικό επίπεδο αρχίζει να σταθεροποιείται. Η Maximum Flooding Surface ορίζεται την χρονική στιγμή που η αύξηση του βασικού επιπέδου δεν επαρκεί για την δημιουργία νέου accommodation space με υψηλό ρυθμό. Συνεπώς, τα ιζήματα που αποτίθενται στην λεκάνη πληρούν τον accommodation space πιο γρήγορα από ότι αυτός δημιουργείται. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η αλλαγή στην κίνηση της ακτογραμμής, από επίκλυση, σε normal regression. Η επικάλυψη των αποθέσεων του Transgressive System Tract με τις αποθέσεις του Highstand System Tract που ακολουθεί, αποτρέπει την διάβρωση, και αυξάνει τις πιθανότητες διατήρησής τους. Αυτό το χαρακτηριστικό, σε συνδυασμό με την μεγάλη της έκταση, τουλάχιστον σε συνθήκες παράκτιες και ρηχής θάλασσας, την καθιστά εύκολα αναγνωρίσιμη (Emery Myers, 1996). Ο σχηματισμός της MFS, ορίζεται συχνά ως το τελικό όριο μιας ολοκληρωμένης ακολουθίας. Στην συνέχεια θα λάβει χώρα εκ νέου η μεταβολή του βασικού επιπέδου, δηλαδή η σταδιακή πτώση, και η μετέπειτα αύξηση του, ορίζοντας νέα System Tracts, και μια νέα ακολουθία. (Catuneanu, 2002 2006).

Κάτω από την Maximum Flooding Surface απαντώνται τα ιζήματα που αποτέθηκαν κατά το Transgressive System Tract, κατά την περίοδο ταχείας αύξησης του βασικού επιπέδου. Ο χαρακτήρας των αποθέσεων είναι fluvial, παράκτιος και θαλάσσιος.

Πάνω από την επιφάνεια απαντώνται οι αποθέσεις του Highstand System Tract, που θα λάβει χώρα κατά την επερχόμενη σταθερότητα του βασικού επιπέδου, και της αύξησης του με χαμηλό ρυθμό. Ο χαρακτήρας των αποθέσεων είναι fluvial, παράκτιος, και θαλάσσιος.

Η διάγνωση της Maximum Flooding Surface πραγματοποιείται με ορισμένα κριτήρια, όπως τα παρακάτω (Catuneanu, 2006, Figure 4.9. ; Embry et al, 2007, Figure 9. ; Coe et al, 2003, Table 4.1 ; Embry Catuneanu, 2002 ; Emery, Myers, 1996).

- Φύση επαφής: Σύμφωνη
- Φύση αποθέσεων:
Πάνω από την επιφάνεια: Fluvial, παράκτια, θαλάσσια
Κάτω από την επιφάνεια: Fluvial, παράκτια, θαλάσσια
- System Tracts:
Πάνω από την επιφάνεια: HST
Κάτω από την επιφάνεια: TST
- Αλλαγή βασικού επιπέδου:
Πάνω από την επιφάνεια: NR
Κάτω από την επιφάνεια: T
- Τερματισμοί στρωμάτων:
Άνω : Downlap
Κάτω: N/A, Truncation



Σχήμα 3.20. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η Maximum Flooding Surface. Όπως φαίνεται στην εικόνα, αποτελεί την ανώτερη επιφάνεια του TST, και ταυτίζεται με τον πυθμένα της θάλασσας κατά την ολοκλήρωση της Transgression και την έναρξη της Normal Regression. Κατά την διάρκεια της ερμηνείας, η επιφάνεια τονίζεται με τα γράμματα MRS. Τροποποιημένο από (Emery Myers, 1996).

Μετά από τέσσερις δεκαετίες μελετών, ή Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών έχει πλέον ωριμάσει επιστημονικά, και αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο των γεωλόγων και των μηχανικών σε κάθε ερευνητικό πρόγραμμα. Δυστυχώς όμως, το εσωτερικό του κλάδου χαρακτηρίζεται από πολύ σημαντικά προβλήματα ορολογίας, προσέγγισης και μοντέλων. Ως αποτέλεσμα του παραπάνω γεγονότος, η Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών είναι σε σημαντικό βαθμό δυσπρόσιτη και δυσνόητη για άτομα που δεν γνωρίζουν σημαντικό αριθμό από έννοιες, διαγράμματα, και κυρίως συντομογραφίες και ορισμούς. Την τελευταία δεκαετία έχει ξεκινήσει μια προσπάθεια τυποποίησης της ορολογίας και των ορισμών, η οποία μέχρι στιγμής δεν έχει οδηγήσει σε ουσιαστική βελτίωση του ζητήματος (Catuneanu, 2006 ; Catuneanu et al, 2009 ; Embry 2009 ; Embry et al, 2007). Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η σωστή και έγκαιρη επικοινωνία μεταξύ των γεωλόγων του ερευνητικού προγράμματος, ώστε η ερμηνεία των δεδομένων να πραγματοποιηθεί με βάση ένα συγκεκριμένο μοντέλο. Η πιθανή ανικανότητα των μελετητών να λειτουργήσουν σε ένα περίπλοκο περιβάλλον όπως αυτό, θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε σοβαρά λάθη, παραλήψεις, και την αποτυχία του ερευνητικού προγράμματος.

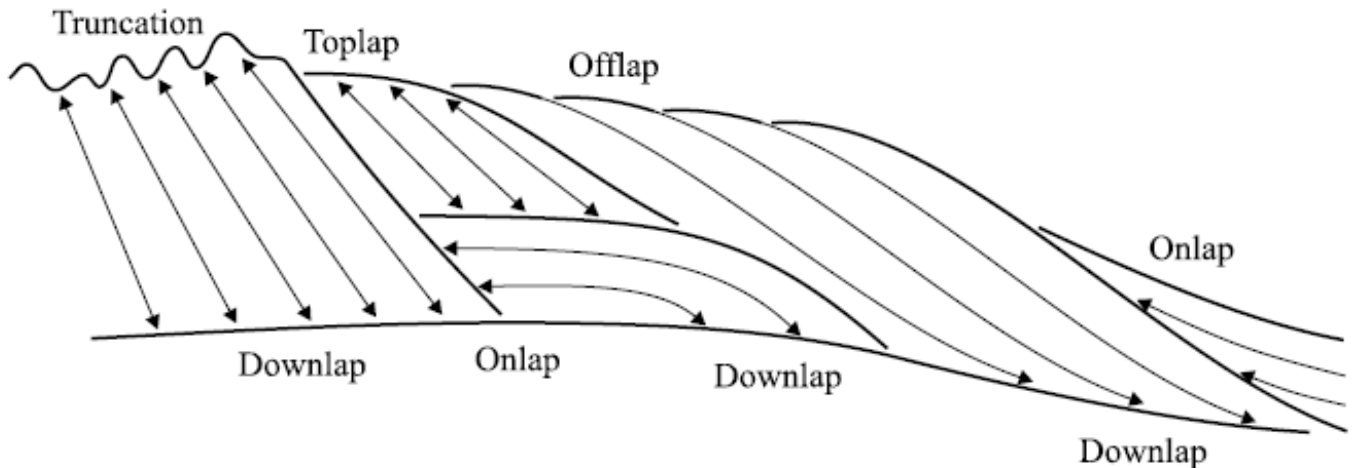
Approach	Material-Based		Time-Based		Interpreted Events
Sequence Model	Exxon 1988 All Models Van Wagoner et al., 1988	All Models Embry, 1993	All Models Helland-Hansen and Gjølberg, 1994	All Models Posamentier and Allen, 1999	
Systems Tracts	MFS HST	MFS RST	MFS HST	MFS HST	Start Regression
	TST	TST	TST	TST	Start Transgression
	LST	RST	LST	Late	Start Base Level Rise
	FACIES CHANGE		FRST (FSST)	Early	
	HST		BSFR	BSFR	Start Base Level Fall
	MFS TST	MFS TST	MFS HST	MFS HST	Start Regression
	LST	RST	LST	Late	Start Base Level Rise
	FACIES CHANGE	RST	FRST (FSST)	Early	
	HST		BSFR	BSFR	Start Base Level Fall

Πίνακας 3.23. Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζεται αριθμός μοντέλων της Στρωματογραφία Ιζηματογενών Ακολουθιών. Είναι προφανής ο διαφορετικός τρόπος τερματισμού των System Tracts και οι διαφορετικές θέσεις των στρατιγραφικών επιφανειών. Διαφορές παρατηρούνται επίσης και στην ορολογία, σχετικά με την ονομασία των System Tracts, και των στρατιγραφικών επιφανειών (Embry, 2009). Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι παρά τις διαφορές στην ορολογία, όλα τα μοντέλα ερμηνεύουν τα ίδια ακριβώς γεωλογικά γεγονότα, που παρουσιάζονται στην δεξιά στήλη.

3.5. Stratal Terminations

Τα ιζήματα εντός μιας λεκάνης δεν αποτίθενται με σταθερό τρόπο και ρυθμό. Αλλαγές στις παραπάνω μεταβλητές οδηγούν στην μεταβολή της γεωμετρίας των στρωμάτων και των μεταξύ τους επαφών. Με βάση την παραπάνω διαπίστωση μπορεί να διακριθεί ένα σύνολο από γεωμετρικές επιφάνειες, οι οποίες αντικατοπτρίζουν αρκετές φορές συγκεκριμένες μεταβολές στα χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως άνοδο ή πτώση του βασικού επιπέδου και αλλαγή της παροχής ιζημάτων (Catuneanu, 2006 ; Coe et al, 2003).

Αυτές οι επιφάνειες ονομάζονται stratal terminations, τερματισμοί στρωμάτων, και είναι πέντε στον αριθμό. Μια από αυτές μπορεί να ταυτιστεί με τον γεωλογικό όρο της ασυμφωνίας, ενώ οι υπόλοιπες αναφέρονται αποκλειστικά σε συγκεκριμένη γεωμετρία στον χώρο.



Σχήμα 3.24. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται οι stratal terminations. Κάθε επιφάνεια χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη γεωμετρία (Catuneanu, 2002).

1. Truncation: Truncation ονομάζεται ο τερματισμός στρωμάτων ενάντια σε μια επιφάνεια διάβρωσης. Η παραπάνω επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της γωνιώδους ασυμφωνίας.
2. Toplap: Toplap ονομάζεται ο τερματισμός στρωμάτων ενάντια μια υπερκείμενη επιφάνεια μικρότερης κλίσης.
3. Onlap: Onlap ονομάζεται ο τερματισμός στρωμάτων μικρής κλίσης ενάντια σε μια επιφάνεια μεγαλύτερης κλίσης.



4. Downlap: Downlap ονομάζεται ο τερματισμός στρωμάτων ενάντια μια υποκείμενη επιφάνεια μικρότερης κλίσης.

5. Offlap: Offlap ονομάζεται “ η σταδιακή μετακίνηση της ακτογραμμής προς την κατεύθυνση της θάλασσας, σε μια ομοιόμορφη ακολουθία, όπου το νεότερο τμήμα αφήνει εκτεθειμένο το προηγούμενο και παλαιότερο ” (Catuneanu, 2006).

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκαν με λεπτομέρεια ο τρόπος σχηματισμού των ιζηματογενών πετρωμάτων εντός μιας ιζηματογενούς λεκάνης, καθώς και ο τρόπος αναγνώρισης τους μέσω της μελέτης γεωλογικών τομών ή σεισμικών δεδομένων. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια συγκεκριμένες θέσεις και πετρώματα, εντός των ιζηματογενών ακολουθιών, που ταμιευτήρες υδρογονανθράκων εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα. Θα αναλυθεί η εσωτερική τους δομή, οι ιδιαιτερότητες τους, καθώς και ο καλύτερος τρόπος προσέγγισης τους κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης.

Η συμβατικοί ταμιευτήρες υδρογονανθράκων ομαδοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους ψαμμιτικούς (siliclastic) και ανθρακικούς (carbonate).

Οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες υποδιαιρούνται σε πέντε τύπους, ανάλογα με το περιβάλλον απόθεσης των ιζημάτων που τους αποτελούν (Slatt, 2013 ; Ringrose Bentley, 2015).

1. Ταμιευτήρες αιολικού περιβάλλοντος
2. Ταμιευτήρες ποτάμιου περιβάλλοντος
3. Ταμιευτήρες δελταϊκού περιβάλλοντος
4. Ταμιευτήρες ρηχού θαλάσσιου περιβάλλοντος
5. Ταμιευτήρες βαθύς θαλάσσιου περιβάλλοντος

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν σε ορισμένα σημεία οι έννοιες του object based modeling και του pixel based modeling και του οι οποίες αποτελούν τις βασικές μεθόδους προσομοίωσης ενός ταμιευτήρα.

Η εξέταση των παραπάνω μεθόδων προσομοίωσης θα λάβει χώρα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε ξεχωριστά κεφάλαια. Σε γενικές γραμμές όμως, η pixel based μεθοδολογία μπορεί να παρομοιαστεί με ένα πυκνό σύστημα τρισδιάστατων κελιών, που κάθε ένα χαρακτηρίζεται από μια τιμή, συνήθως πορώδους ή διαπερατότητας. Η μεθοδολογία object based προσπαθεί να προσεγγίσει τα τμήματα του ταμιευτήρα με χωρικό τρόπο, σαν αντικείμενα με συγκεκριμένες διαστάσεις.

Κεφάλαιο 4.1. Ταμιευτήρες Αιολικού Περιβάλλοντος

Οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες αιολικής προέλευσης μπορούν να αποτελέσουν πολύ καλής ποιότητας ταμιευτήρες λόγω της μεγάλης τους έκτασης. Πρόβλημα στην μελέτη και την αξιοποίηση της είναι η σχετικά περίπλοκη εσωτερικής τους δομής. Η δράση του ανέμου είναι ικανή να ταξινομήσει τους κόκκους άμμου με τρόπο ανάλογο της δράσης ενός ποταμού. Αποτέλεσμα της δράσης του ανέμου είναι η συγκέντρωση κόκκων όμοιας κοκκομετρίας σε συγκεκριμένες ζώνες, προσδίδοντας σε αυτές παρόμοια συμπεριφορά στην κίνηση διάφορων ρευστών στο εσωτερικό τους.

Ψαμμικά πετρώματα αιολικής προέλευσης δύναται να σχηματιστούν ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας παλαιών κοιτών αναστομωμένων και πλεξοειδών ποταμών, που επιτρέπουν τον σχηματισμό μικρών αμμωδών νήσων στο εσωτερικό τους. Πιθανή είναι η εμφάνιση τους σε παράκτιες περιοχές όπου η δράση του ανέμου συγκεντρώνει την θαλάσσια άμμο με την μορφή θινών, σε μικρή απόσταση από την ακτή.

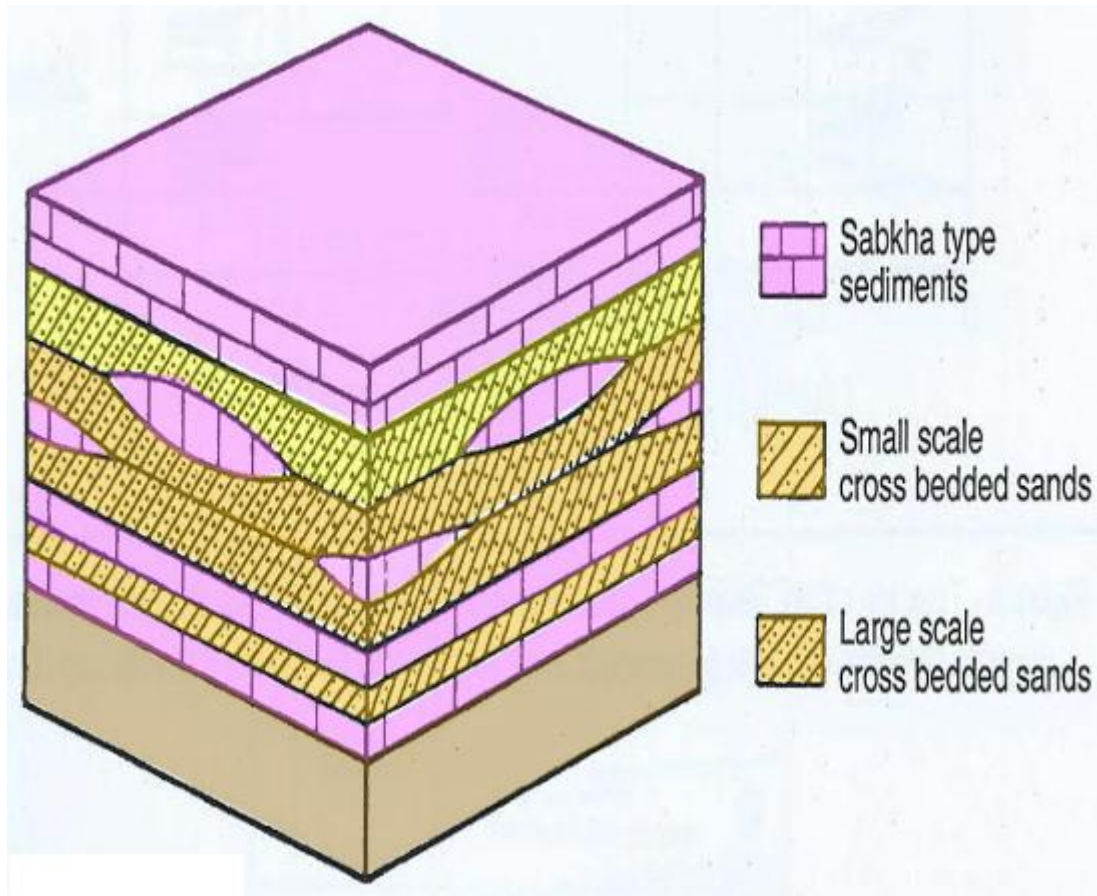
Για την διατήρηση των παραπάνω αποθέσεων είναι αναγκαία η ανάπτυξη φυτικής κάλυψης, ώστε οι παλαιές κοίτες των ποταμών να μην διαβρωθούν σε περίπτωση επαναλειτουργίας τους, και οι παράκτιες θίνες να μην μεταφερθούν λόγω πιθανής ισχυροποίησης της δράσης του ανέμου στην περιοχή (Catuneanu, 2006).

Χαρακτηριστικό της εσωτερικής δομής των ψαμμιτικών πετρωμάτων αιολικής προέλευσης είναι η διασταυρωτή στρώση, που σχηματίζεται λόγω της συνεχούς δράσης του ανέμου. Επίσης, οι διαφορές στην κοκκομετρία, τον βαθμό συμπαγοποίησης και της διαγένεσης είναι συχνές, ακόμα και εντός μικρών χωρικών αποστάσεων, δυσχεραίνοντας την μοντελοποίηση τους και την εκτίμηση του πορώδους και της διαπερατότητας. Ζήτημα κατά την μελέτη ταμιευτήρων αιολικής προέλευσης αποτελεί η συχνή ύπαρξη διαφορετικών πετρωμάτων, μικρής διαπερατότητας, ανάμεσα στα ψαμμικά στρώματα του ταμιευτήρα. Ως αποτέλεσμα, η πρόγνωση της συμπεριφοράς του κοιτάσματος, και η εκτίμηση της διαπερατότητας μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολη. (Catuneanu, 2006 ; Slatt, 2013).

Ψαμμίτες αιολικής προέλευσης σε παράκτιες συνθήκες σχηματίζονται συνεχώς μέσα στον γεωλογικό χρόνο, κυρίως όμως σε περιόδους που το επίπεδο της θάλασσας παραμένει σχετικά σταθερό. Αυτές οι περίοδοι ταυτίζονται με το Highstand System Tract και το Lowstand System Tract, που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι αποθέσεις που σχηματίζονται κατά την διάρκεια του Lowstand System Tract χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πιθανότητα διατήρησης, καθώς καλύπτονται άμεσα από τα λεπτόκοκκα θαλάσσια ιζήματα, που αποτίθενται κατά την διάρκεια του Transgressive System Tract (Catuneanu, 2006 ; Ringrose, Bentley, 2015 ; Σχήματα 3.11, 3.12 και 3.13-4 κεφαλαίου 3).

Η κάλυψη τους από λεπτόκοκκα ιζήματα επιτρέπει επίσης τον πιθανό σχηματισμό παγίδας, και την ανάπτυξη κοιτάσματος υδρογονανθράκων.

Κατά την μοντελοποίηση ενός ταμιευτήρα αιολικής προέλευσης, πρέπει να πραγματοποιηθεί λεπτομερής μελέτη της χωρικής μεταβολής του πορώδους και διαπερατότητας των σχηματισμών μέσω της πυκνής πυρηνοληψία, της μελέτης γεωλογικών τομών και την χρήση γεωστατιστικών μεθόδων (Slatt, 2013 ; Ringrose Bentley, 2015).



Εικόνα 4.1. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η συνύπαρξη αιολικών αποθέσεων, πετρώματα υψηλής περατότητας, με πετρώματα χαμηλής περατότητας, όπως τα sabkha. Τα πετρώματα χαμηλής περατότητας διακόπτουν τις αιολικές αποθέσεις, καθιστώντας προβληματική την πρόβλεψη των ιδιοτήτων ενός κοιτάσματος, και κατ' επέκταση την μελλοντική του εκμετάλλευση (Fryberger 2013).

Κεφάλαιο 4.2. Ταμιευτήρες Ποτάμιου Περιβάλλοντος

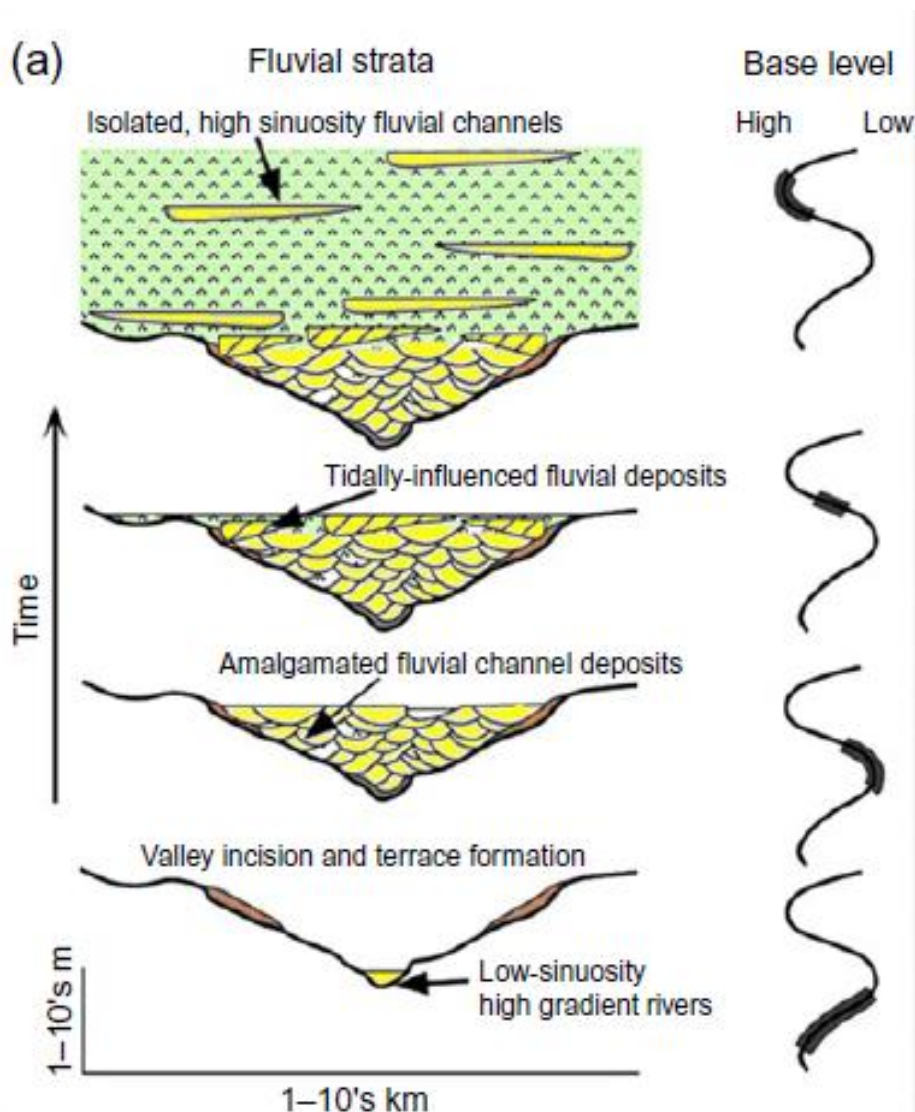
Οι ψαμμιτικοί ταμιευτήρες ποτάμιας προέλευσης μπορούν να διακριθούν σε υποκατηγορίες ανάλογα με το είδος του ποταμού που αποθέτει τα αρχικά ιζήματα (Slatt, 2013).

1. Πλεξοειδών και αναστομωμένων ποταμών
2. Μαιανδρικών ποταμών
3. Εγκιβωτισμένων μαιανδρικών ποταμών

Οι ταμιευτήρες της πρώτης κατηγορίας χαρακτηρίζονται από χονδρόκοκκη κοκκομετρία, με μικρά ποσοστά αργίλου, που εμφανίζεται κυρίως σε μικρές κατά τόπους στρώσεις. Έχουν μεγάλο πάχος και έκταση και παρουσιάζουν ομοιόμορφη διαπερατότητα και πορώδες (Slatt, 2013 ; Ringrose, Bentley, 2015).

Οι ταμιευτήρες που προέρχονται από την δράση μαιάνδρων χαρακτηρίζονται από πιο λεπτή κοκκομετρία, συγκριτικά με τους ταμιευτήρες της πρώτης ομάδας. Παράλληλα, η κοκκομετρία γίνεται ψιλότερη προς τα ανώτερα τμήματα των ψαμμιτών, με αποτέλεσμα ανάλογη μείωση της διαπερατότητας.

Τέλος, οι ταμιευτήρες λόγω της δράσης εγκιβωτισμένων μαιάνδρων είναι σπάνιοι, λόγω της μειωμένης απόθεσης ιζημάτων κατά τον εγκιβωτισμό ενός ποταμού (Ringrose Bentley, 2015).



Εικόνα 4.2. Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται η σταδιακή πλήρωση της κοίτης ενός ποταμού με ιζήματα. Στα δεξιά εμφανίζεται η μεταβολή του βασικού επιπέδου. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την αλλαγή του βασικού επιπέδου και την δράση των ποτάμιων συστημάτων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3 (Slatt, 2013),



Εικόνα 4.3. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται ένας μαίανδρος. Διακρίνεται η παλαιά θέση της κοίτης του ποταμού, και μικρός αριθμός υπολειμματικών λιμνών. Στο μέλλον, οι παλαιά κοίτη του ποταμού και οι λίμνες θα πληρωθούν με λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο δύναται να λειτουργήσει ως πέτρωμα παγίδα (Slatt, 2013).

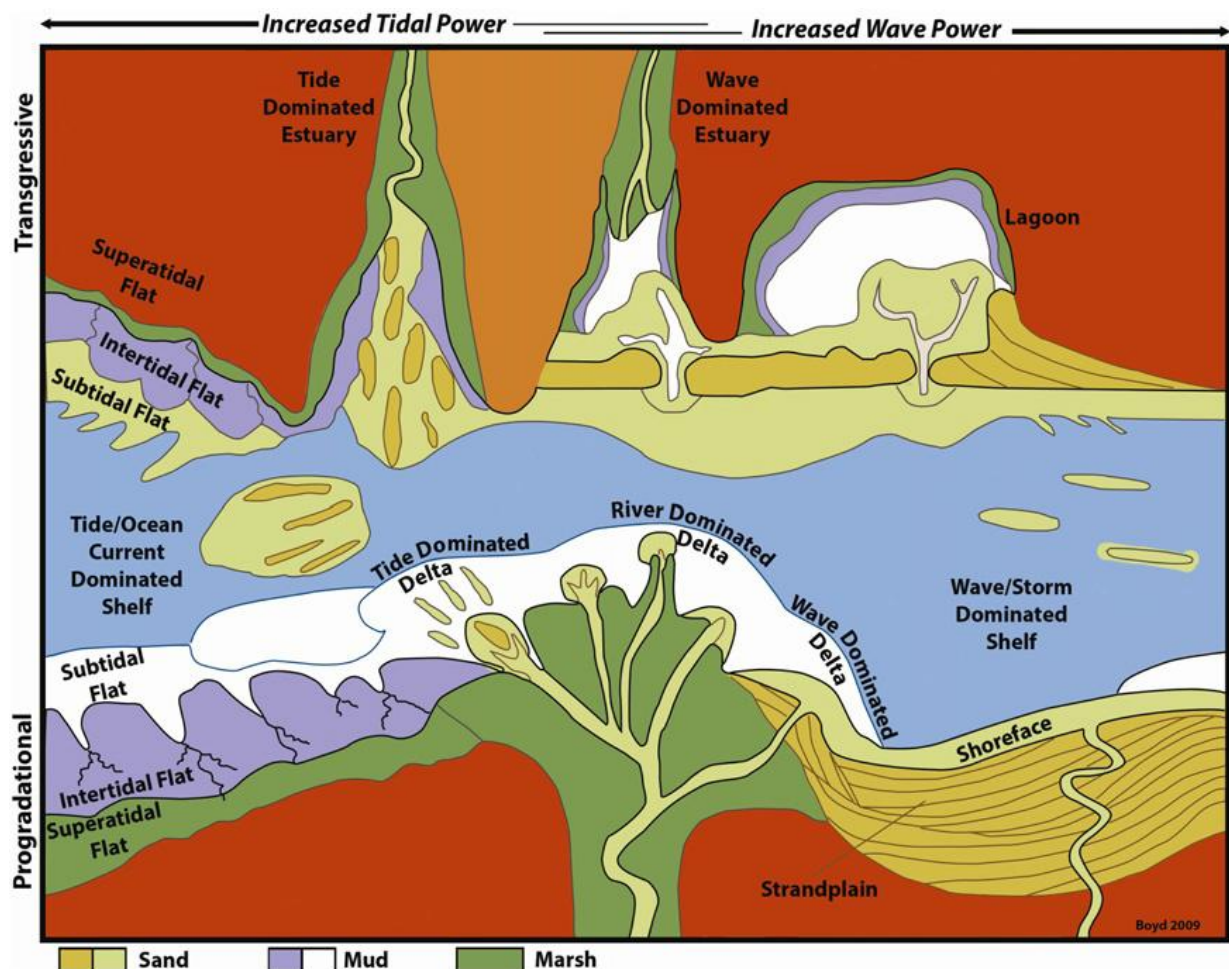
Για την μοντελοποίηση ταμειυτήρων που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος object based modeling. Στην παραπάνω μέθοδο, κάθε object αποτελείται από ένα πλήθος pixel, που χαρακτηρίζονται από μια τιμή πορώδους, διαπερατότητας, λιθολογίας, ή άλλες μεταβλητές. Αυτά τα objects παράγονται με την χρήση λογισμικών, που εφαρμόζουν αλγορίθμους γεωστατιστικής. Στόχος των παραπάνω αλγορίθμων είναι η κάλυψη των σημείων που οι πληροφορίες είναι λιγοστές, στον καλύτερο δυνατό βαθμό. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανικανότητα των αλγορίθμων να ικανοποιούν πλήρως τα διαθέσιμα δεδομένα, φαινόμενο που ονομάζεται funneling, και που εξετάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο επόμενο κεφάλαιο. Εναλλακτική λύση στην μοντελοποίηση ποτάμιων αποθέσεων είναι η χρήση λογισμικού που διαθέτει ενσωματωμένες πληροφορίες, σχετικά με την γεωλογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα περιβάλλον. Αποτέλεσμα των παραπάνω δεδομένων είναι η κατασκευή μοντέλων που διαθέτουν ακριβέστερο γεωλογικό χαρακτήρα, και βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματικότητα (Pýrcz Deutsch, 2014).

Κεφάλαιο 4.3. Ταμειυτήρες Δελταικού Περιβάλλοντος

Έχοντας αναλύσει τα αίτια που προκαλούν την αλλαγή της θέσης μιας ακτογραμμής μακροπρόθεσμα στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν να εξεταστούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα σημεία στα οποία τα ποτάμια επικοινωνούν με την θάλασσα, δηλαδή τα δέλτα (Εικόνα 3.3 και 3.4 κεφαλαίου 3). Τα δέλτα είναι από τις πιο σημαντικές περιοχές για την βιομηχανία υδρογονανθράκων καθώς αποτελούν θέσεις στις οποίες λαμβάνουν χώρα διεργασίες που ενθαρρύνουν την εμφάνιση και παγίδευση υδρογονανθράκων σε μεγάλες ποσότητες και με συνθήκες που ενθαρρύνουν την έρευνα και την μελλοντική απόληψη.

Τα δέλτα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον βαθμό που επηρεάζονται από την θάλασσα και την παλίρροια (Catuneanu, 2006 ; Slatt, 2013).

1. Δέλτα υπό ποτάμια επιρροή
2. Δέλτα υπό επιρροή κυμάτων
3. Δέλτα υπό παλιρροιακή επιρροή

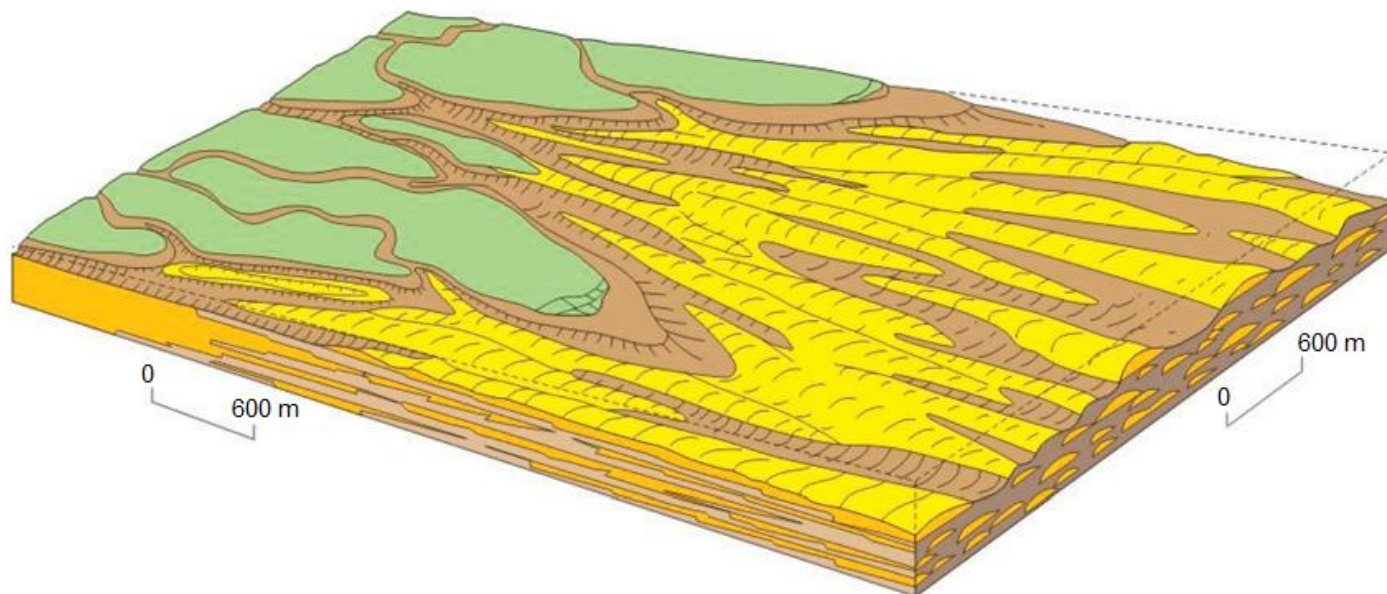


Εικόνα 4.4. Στο κέντρο της παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι τρεις βασικοί τύποι ποτάμιων δέλτα (Miall, 2010).

Τα δέλτα υπό ποτάμια επιρροή αναπτύσσονται σε περιοχές που η δράση της θάλασσας είναι περιορισμένη. Η παραπάνω συνθήκη μπορεί να οφείλεται στην χαμηλή ενέργεια των θαλάσσιων ρευμάτων, ή στην ύπαρξη μιας μορφής προστασίας για το δέλτα, όπως μια χερσαία μάζα, ή κάποιος ύφαλος, που απορροφά την ενέργεια της θάλασσας πριν επηρεάσει το δέλτα. Αποτέλεσμα της ηρεμίας που επικρατεί στην θέση του δέλτα, είναι η σταθερή προώθηση του προς την κατεύθυνση της θάλασσας, και η ανάπτυξη του σε μεγάλες διαστάσεις. Λόγο της σταθερότητας που χαρακτηρίζει την περιοχή, το στόμιο του ποταμού αλλάζει ανά χρονικά διαστήματα θέση, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγάλων αποθέσεων άμμου και λεπτών αποθέσεων αργίλου. Οι ψαμμιτικές αποθέσεις δύναται να αποτελέσουν μελλοντικούς ταμιευτήρες, με τα στρώματα των αργίλων να λειτουργούν ως αδιαπέραστα στρώματα. Παράλληλα, λόγω της σταθερότητας των αποθέσεων, η εφαρμογή των αρχών της στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων, τον διαγραφίων και της συνολικής γεωλογικής ιστορίας των πετρωμάτων, επιτρέποντας έτσι καλύτερη εκτίμηση του μεγέθους του ταμιευτήρα (Catuneanu, 2006 ; Miall, 2010 ; Ringrose Bentley, 2015 ; Slatt, 2013).

Τα δέλτα υπό επιρροή κυμάτων αναπτύσσονται σε περιοχές που η δράση της θάλασσας είναι σημαντική. Η συνεχής επιρροή των θαλάσσιων ρευμάτων στο δέλτα έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά ιζημάτων, και την απόθεση τους σε μεγαλύτερες αποστάσεις, συγκριτικά με τα δέλτα υπό ποτάμια επιρροή. Αποτέλεσμα είναι το σχήμα βεντάλιας, και έκταση μεγαλύτερη από τα δέλτα υπό ποτάμια επιρροή. Οι αποθέσεις είναι μεγάλου πάχους, με πολύ σημαντική οριζόντια έκταση. Στρωματογραφικά, η κοκκομετρία των ιζημάτων τείνει να αυξάνεται προς το πάνω, με την παρουσία υλικών οργανικής και φυτικής προέλευσης (Slatt, 2013). Αυτός ο τύπος δέλτα χαρακτηρίζεται από περιπλοκότερη εσωτερική δομή, συγκριτικά με τον τύπο υπό ποτάμια επιρροή, και απαιτεί λεπτομερέστερη μελέτη στρωματογραφίας ιζηματογενών ακολουθιών, πυκνότερα σεισμικά δεδομένα, και πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων. (Slatt, 2013 ; Miall, 2010).

Τα δέλτα υπό παλίρροιακή επιρροή αναπτύσσονται σε θέσεις που πραγματοποιείται επίκλυση και απόσυρση της θάλασσας ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με την μορφή της παλίρροιας. Ως αποτέλεσμα, τα παραπάνω περιβάλλοντα θεωρούνται υψηλής ενέργειας, και εμφανίζουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από τις δύο παραπάνω κατηγορίες. Αρχικά, εμφανίζουν έντονη διασταυρωτή στρώση, και έντονες επιμήκεις ή λοβοειδείς αμμώδης ράχες, με φορά κάθετη προς την διεύθυνση κίνησης της θάλασσας (Slatt, 2013). Η περιπλοκότητα των παραπάνω αποθέσεων είναι σημαντική, και το βασικό πρόβλημα κατά την μελέτη ταμιευτήρων αυτού του τύπου είναι η εκτίμηση της ετερογένειας, και η προσέγγιση των ορίων του ταμιευτήρα (Ringrose Bentley, 2015).



Εικόνα 4.5. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται ένα τυπικό δέλτα υπό παλιρροιακή επιρροή. Διακρίνεται η περίπλοκη εσωτερική του δομή, και οι λοβοειδείς αμώδης ράχες (Slatt, 2013).

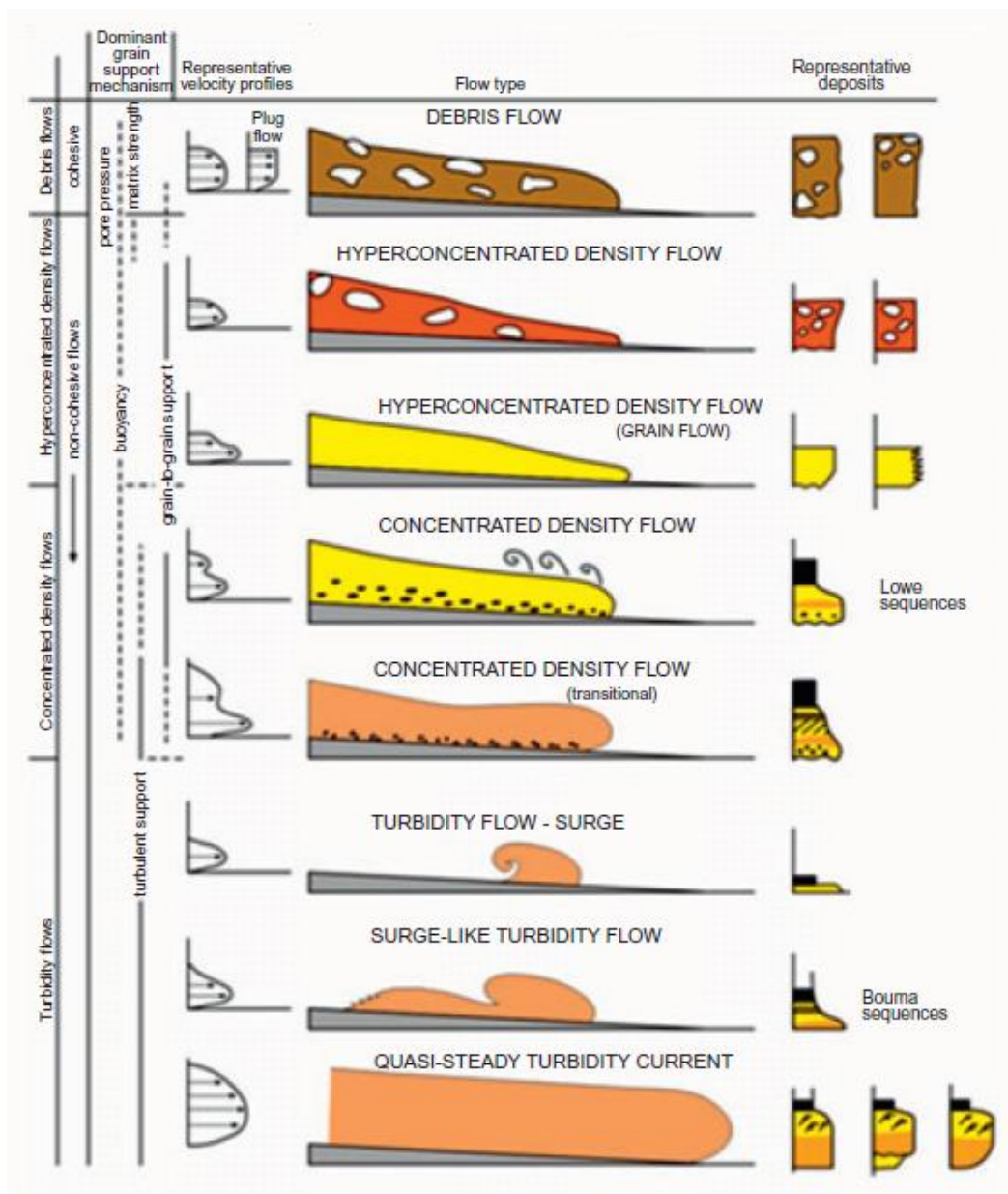
Κεφάλαιο 4.4. Ταμιευτήρες Ρηχού Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

Τα ιζήματα που θα αποτελέσουν μελλοντικούς ταμιευτήρες ρηχού θαλάσσιου περιβάλλοντος, προέρχονται συνήθως από ένα παρακείμενο δελταϊκό σύστημα. Μέσω της δράσης των θαλάσσιων ρευμάτων και της παλίρροιας το υλικό που αποτίθεται στο δέλτα, μεταφέρεται σε μεγαλύτερα βάθη, ή σε κοντινές παραλιακές θέσεις. Από άποψη στρωματογραφίας, η απόθεση τους πραγματοποιείται κατά την διάρκεια του Lowstand System Tract και Falling Stage System Tract. Η συχνή διατήρηση τους οφείλεται στην κάλυψη τους από τα λεπτόκοκκα ιζήματα του Transgressive System Tract, τα οποία δύναται να αποτελέσουν μελλοντικές παγίδες (Catuneanu, 2006 ; Slatt, 2013). Οι ταμιευτήρες ρηχού θαλάσσιου περιβάλλοντος λόγω της μεγάλης τους έκτασης, και του πολύ υψηλού ποσοστού αποληψιμότητας που συνήθως παρουσιάζουν, θεωρούνται ως οι καλύτεροι ταμιευτήρες για αξιοποίηση και οι ευκολότεροι στην μελέτη (Ringrose Bentley, 2015).

Πιθανό πρόβλημα κατά την εκμετάλλευση ενός ταμιευτήρα μπορεί να αποτελέσουν μικρού πάχους αργιλικά στρώματα, τα οποία αυξάνουν σημαντικά την περιπλοκότητα του ταμιευτήρα. Καθώς αποτελούν μη διαπερατά στρώματα, η ύπαρξη αργιλικών στρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του ταμιευτήρα σε επιμέρους τμήματα, δυσχεραίνοντας την μοντελοποίηση του κοιτάσματος (Ringrose Bentley, 2015).

Κεφάλαιο 4.5. Ταμιευτήρες Βαθέως Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

Ο σχηματισμός των πετρωμάτων βαθιάς θάλασσας, που δύναται να αποτελέσουν μελλοντικούς ταμιευτήρες, οφείλεται στην μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων υλικού από παράκτιες και δελταϊκές περιοχές, σε βαθύτερες με την μορφή υποθαλάσσιων ροών. Η μεταφορά των ιζημάτων πραγματοποιείται μέσω των θαλάσσιων ρευμάτων και της βαρύτητας. Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς, την κοκκομετρία του υλικού, την ταχύτητα της ροής και τα αίτια που την προκάλεσαν διακρίνονται αρκετές κατηγορίες ροών, με την πιο γνωστή να είναι η τουρβιδιτική ροή.

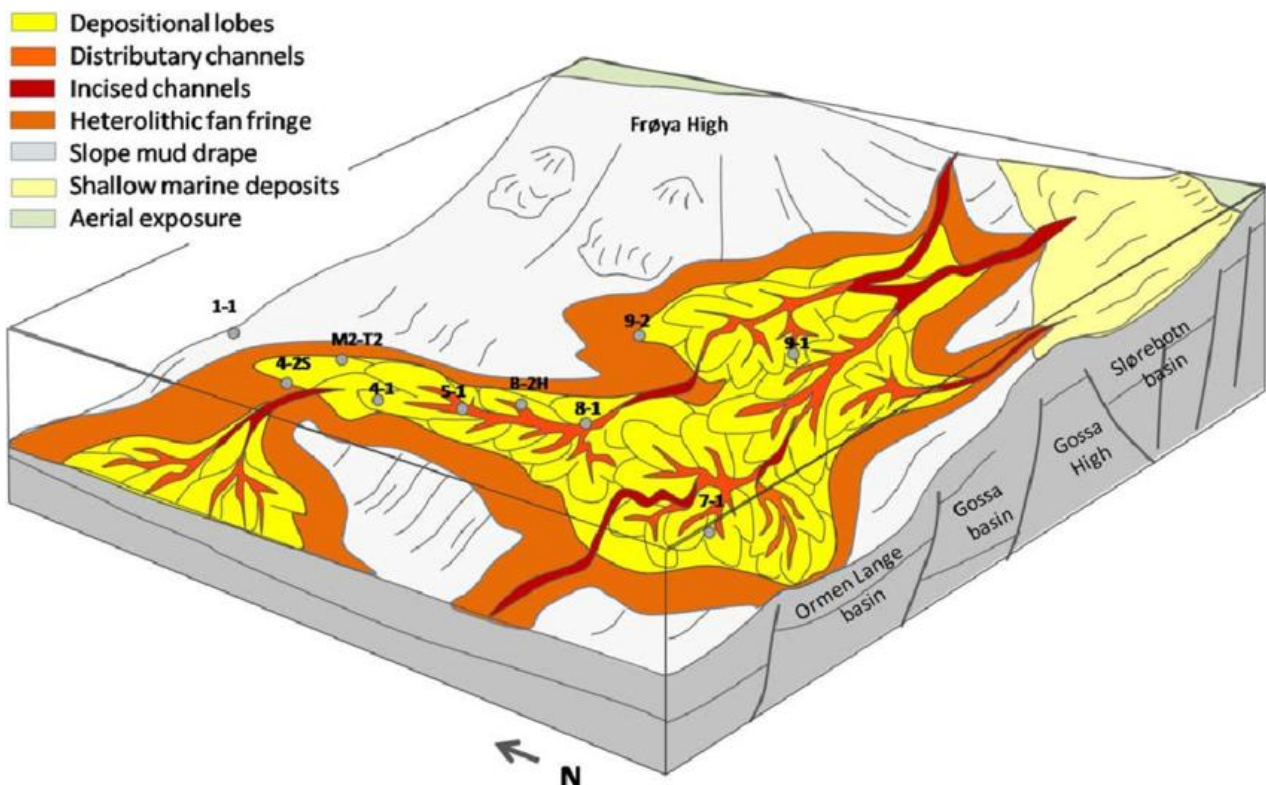


Εικόνα 4.6. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται ορισμένες μορφές βαρυτικών ροών, η δράση των οποίων αποθέτει ιζήματα που μπορεί να αποτελέσουν μελλοντικούς ταμιευτήρες (Slatt, 2013).

Οι παραπάνω ροές σχηματίζουν δομές που μπορούν να διαιρεθούν σε δύο γενικές κατηγορίες, τους λοβούς, και τις κοίτες.

Οι λοβοί (lobes) έχουν συνήθως μεγάλες διαστάσεις και πάχος. Χαρακτηρίζονται από αρκετά απλή εσωτερική γεωμετρία και μπορούν να μελετηθούν σχετικά εύκολα. Πιθανό πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστούν σε έναν λοβό, είναι η ύπαρξη λεπτών στρωμάτων αργίλων, που αποτίθενται ενδιάμεσα των στρωμάτων άμμου, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ασυνεχειών εντός του ταμιευτήρα και την διαίρεση του σε πλήθος μικρότερων και ανεξάρτητων τμημάτων.

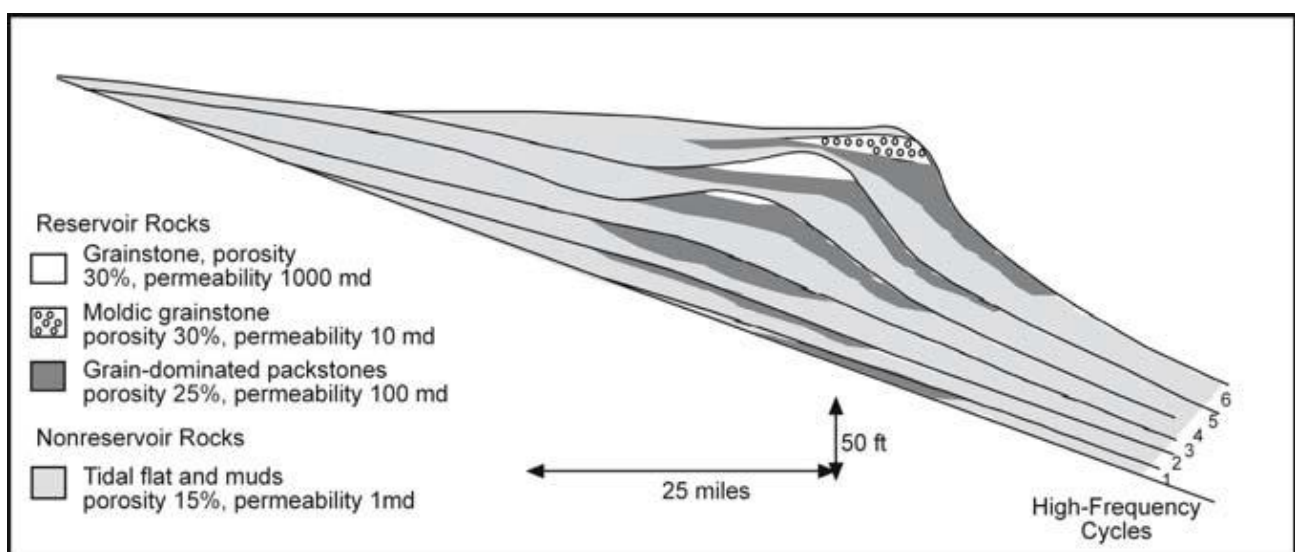
Οι κοίτες (channels) εμφανίζονται σε διάφορα σχήματα, όπως βεντάλιας ή είναι ευθύγραμμα. Η εσωτερική τους δομή μπορεί να είναι απλή, ενώ άλλες φορές παρουσιάζονται έντονες μεταβολές στην κοκκομετρία τους. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται προσεκτική μελέτη των σεισμικών δεδομένων, και των ερευνητικών γεωτρήσεων, καθώς η συμπεριφορά τους στην κίνηση των ρευστών μπορεί να είναι περίπλοκη (Ringrose Bentley, 2015 ; Miall, 2010 ; Slatt, 2013).



Εικόνα 4.6. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται μια γεωλογική προσομοίωση περιβάλλοντος βαθιάς θάλασσας. Διακρίνονται οι λοβοί, και οι κοίτες που μεταφέρουν ιζήματα σε μεγαλύτερα βάθη (Grecula et al, 2014).

Κεφάλαιο 4.6. Ανθρακικοί Ταμιευτήρες

Τα ανθρακικά πετρώματα σχηματίζονται μέσω της συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων ανθρακικού ασβεστίου σε συγκεκριμένες θαλάσσιες ζώνες. Δηλαδή, σε αντίθεση με τα κλαστικά πετρώματα, δεν απαιτείται η μεταφορά ιζημάτων χερσαίας προέλευσης στην θάλασσα για τον σχηματισμό τους. Αποτέλεσμα της έλλειψης επεξεργασίας των κόκκων από το νερό, είναι οι έντονες μεταβολές στην κοκκομετρία των ανθρακικών πετρωμάτων, σε βαθμό αρκετά εντονότερο από τα κλαστικά πετρώματα. Η παραπάνω ετερογένεια έχει ως συνέπεια έντονες μεταβολές στις τιμές του πορώδους και τις διαπερατότητας ενός ανθρακικού σχηματισμού. Επιπλέον, η μεταβολές των παραπάνω χαρακτηριστικών καθιστούν την μοντελοποίηση των ανθρακικών ταμιευτήρων περίπλοκη, καθώς αποτρέπουν την εκτίμηση του συνολικού και ενεργού πορώδους, την διαπερατότητα, και τον όγκο των υδρογονανθράκων. Δυσχεραίνεται επίσης η παρακολούθηση του ταμιευτήρα κατά την διάρκεια παραγωγής, και η πραγματοποίηση μελλοντικών ερευνών σχετικά με πιθανή εισπίεση νερού ή αερίων στο πλαίσιο δευτερογενούς και τριτογενούς παραγωγής. Χαρακτηριστικό των ανθρακικών πετρωμάτων είναι η παρουσία εγκοίλων, που έχουν σχηματιστεί λόγω της χημικής αποσάθρωσης και της διαγένεσης. Μεγάλες ποσότητες υδρογονανθράκων μπορούν να αποθηκευτούν σε αυτούς τους χώρους, αν και συνήθως η απόληψη τους δεν είναι δυνατή καθώς το ενεργό πορώδες των σχηματισμών είναι μικρό, και τα έγκοιλα δεν βρίσκονται σε επικοινωνία. Δεύτερο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ανθρακικών πετρωμάτων είναι η ύπαρξη ρωγμών, μικρής και μεγάλης κλίμακας. Η παρουσία των ρηγμάτων δημιουργεί ζώνες μεγάλης περατότητας, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την περιπλοκότητα των σχηματισμών (Lucia, 2007 ; Ringrose, Bentley, 2015).



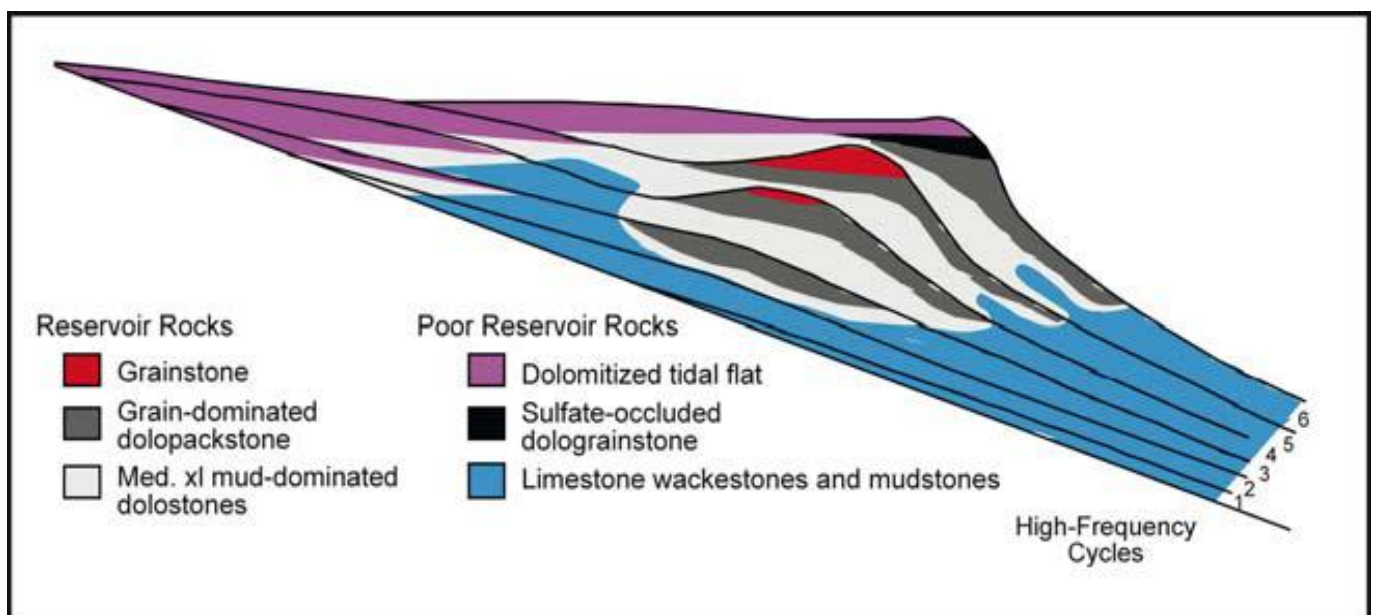
Εικόνα 4.7. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή και το πορώδες των ανθρακικών ταμιευτήρων, στο πλαίσιο της στρωματογραφίας ακολουθιών (Lucia, 2007).

Οργανικές αποθέσεις σε μικρά βάθη και σε υφάλους σχηματίζουν τους καλύτερους ανθρακικούς ταμιευτήρες. Η περατότητα και το πορώδες των παραπάνω σχηματισμών κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα, αυξάνοντας το ποσοστό απόληψης υδρογονανθράκων, και διευκολύνοντας την μοντελοποίηση τους. Οι αποθέσεις υφάλων μπορούν να αποκτήσουν μεγάλο πάχος και οριζόντια έκταση. Παράλληλα, η οργανική προέλευση των κόκκων που τους αποτελούν, επιτρέπει την εξέταση των πετρωμάτων για μικροαπολιθώματα. Η εφαρμογή μικροπαλαιοντολογικών μεθόδων βελτιώνει την γεωλογική ερμηνεία, και επιτρέπει ακριβέστερο στρωματογραφικό συσχετισμό.

Η σταδιακή μεταβολή του βασικού επιπέδου οδηγεί στην περιοδική διαφοροποίηση του βάθους της θάλασσας και των ιζηματογενών αποθέσεων σε μια περιοχή. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μεταβολών, τα ανθρακικά πετρώματα καλύπτονται από αργλικές ή εβαποριτικές αποθέσεις, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν μελλοντικά cap rock ενός κοιτάσματος (Lucia, 2007 ; Ringrose Bentley, 2015).

Κατά την διαγένεση των ανθρακικών πετρωμάτων, το μικρό ποσοστό του πορώδους μπορεί να αυξηθεί μέσω της διαδικασίας της δολομιτίωσης. Πρόσθετο αποτέλεσμα της δολομιτίωσης είναι η αύξηση της ομοιογένειας του πετρώματος, με συνέπεια την βελτίωση της συμπεριφοράς της κίνησης των ρευστών κατά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος (Ringrose Bentley, 2015).

Άλλες ανθρακικές αποθέσεις που έχουν την δυνατότητα να αποτελέσουν ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, είναι η αποθέσεις κιμωλίας, και οι ασβεστόλιθοι που έχουν υποστεί καρστική διάβρωση.



Εικόνα 4.8. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το σύνολο των πιθανών ανθρακικών ταμιευτήρων που μπορεί να σχηματιστούν σε μια ιζηματογενή λεκάνη (Lucia, 2007).

Ένα μοντέλο ταμειυτήρα δημιουργείται με βάση μια σειρά δεδομένων, όπως για παράδειγμα τα σεισμικά δεδομένα, τα δεδομένα από τις ερευνητικές γεωτρήσεις ή την βιβλιογραφία για την γεωλογία της περιοχής. Πρόβλημα για την ακρίβεια του μοντέλου αποτελεί το γεγονός ότι τα δεδομένα από τις παραπάνω πηγές δεν είναι σε καμία περίπτωση πλήρη και αντιπροσωπευτικά του συνόλου των δυνατών δεδομένων που θα μπορούσαν υποθετικά να ληφθούν (statistically insufficient data). Δημιουργείται λοιπόν το φαινόμενο του under-sampling. Με βάση την παραπάνω διαπίστωση, υπάρχουν διάφορες κατευθύνσεις, πάνω στις οποίες μπορεί να βασιστεί ένα μοντέλο. Κάποιες κλίνουν στον ντετερμινισμό. Άλλες περιλαμβάνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την έννοια της πιθανότητας και της αβεβαιότητας. Τέλος, υπάρχει και η μέση λύση στις δύο αυτές προσεγγίσεις, με μοντέλα που προσπαθούν να ισορροπήσουν σε αυτά τα άκρα. Στην πράξη, καθώς ένα μοντέλο γίνεται περιπλοκότερο, στοιχεία και των δύο προσεγγίσεων θα εισαχθούν σε αυτό και πολλαπλά υπό-μοντέλα θα παραχθούν (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015 ; Gluyas Swarbrick, 2004).

Το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων πρέπει να είναι ικανοποιητικού πλήθους, και να κατηγοριοποιηθεί (stationarity) , ώστε να μπορεί να γίνει η διαχείριση του. Η διαδικασία όμως πρέπει να γίνει με προσοχή, καθώς λανθασμένη ομαδοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε μελλοντικά προβλήματα (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

- Κακή ομαδοποίηση μπορεί να κρύψει σημαντικές τάσεις.
- Υπερβολική διαίρεση των δεδομένων οδηγεί σε αναξιοπιστία.
- Εάν ομαδοποιηθούν δεδομένα από διαφορετικές περιοχές, τότε υπερεκτιμάτε η αβεβαιότητα.
- Εάν τα δεδομένα είναι λίγα σε αριθμό, τότε υποεκτιμάτε η αβεβαιότητα.

Σε κάθε περίπτωση, με εξαίρεση την ύπαρξη άριστης ποιότητας σεισμικών, μεγάλου πλήθους ερευνητικών γεωτρήσεων, και άριστης γνώσης της περιοχής (*hard conditioning*), το μοντέλο πρέπει να κινηθεί πέρα από την γνωστή πληροφορία, με βάση την κατανόηση του γεωλόγου και του μηχανικού. Μόνο ορισμένα χαρακτηριστικά μπορούν να παραμείνουν αμετάβλητα καθ' όλη την διαδικασία, πχ τα γνωστά ρήγματα της περιοχής. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει ζητήματα στην ακρίβεια του μοντέλου εάν δεν γίνει σωστά. Ακόμα , ο εκάστοτε μηχανικός και γεωλόγος θα πρέπει πάντα να ασκεί αυτοκριτική , και να εξετάζει με προσοχή τις πιθανές αντενδείξεις που παρουσιάζονται στην πορεία (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

5.1. Γενικές Έννοιες Γεωστατιστικής

Η μεταβλητότητα, ή διακύμανση, (variance), σ^2 , αποτελεί μια μέτρηση της μέσης διαφοράς μεταξύ δύο τιμών, και του μέσου του συνόλου από το οποίο προέρχονται. Στον τύπο το x_i συμβολίζει την εκάστοτε τιμή, το N τον αριθμό των στοιχείων, και το μ το μέσο.

$$\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 / N$$

Τύπος 5.1.

Ο συντελεστής συσχετισμού (correlation coefficient), ρ , μετρά την ισχύ της συσχέτισης μεταξύ δύο παραμέτρων συγκρίνοντας πόσο ένα ζευγάρι αριθμών, (x, y) αποκλίνει από μια ευθεία γραμμή. Στον τύπο το γράμμα N συμβολίζει τον αριθμό των στοιχείων, τα x_i και y_i αποτελούν τις εκάστοτε τιμές, τα μ_x και μ_y το μέσο των δύο συνόλων και τα σ_x και σ_y τις τυπικές αποκλίσεις των δύο συνόλων.

$$\rho = \frac{1/N \sum_{n=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Τύπος 5.2.

Εάν το αποτέλεσμα είναι θετικό, τότε υψηλότερες τιμές x τείνουν να συνυπάρχουν με υψηλότερες τιμές y (θετική συσχέτιση). Εάν το αποτέλεσμα είναι ίσο με το ένα τότε το x και το y συσχετίζονται γραμμικά. Εάν το αποτέλεσμα είναι ίσο με το μηδέν τότε δεν υπάρχει καμία συσχέτιση. Εάν το αποτέλεσμα είναι αρνητικό τότε υψηλές τιμές x και y , συνδέονται με χαμηλότερες τιμές y και x αντίστοιχα.

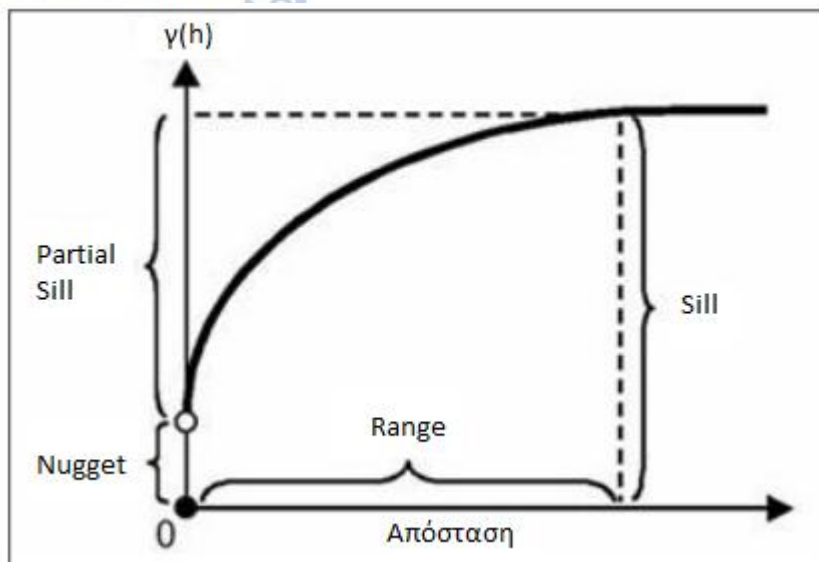
Το ημιβαριόγραμμα (semivariogram), 2γ , " είναι η γραφική παράσταση της ημιμεταβλητότητας $\gamma(h)$ ως προς την απόσταση h . Παρέχει, δηλαδή, πληροφορίες σχετικά με τη συσχέτιση μεταξύ των τιμών μιας τυχαίας συνάρτησης και των μεταξύ τους αποστάσεων στο χώρο " (Παπαδοπούλου, 2014).

$$2\gamma = (1/N) \sum (z_i - z_j)^2$$

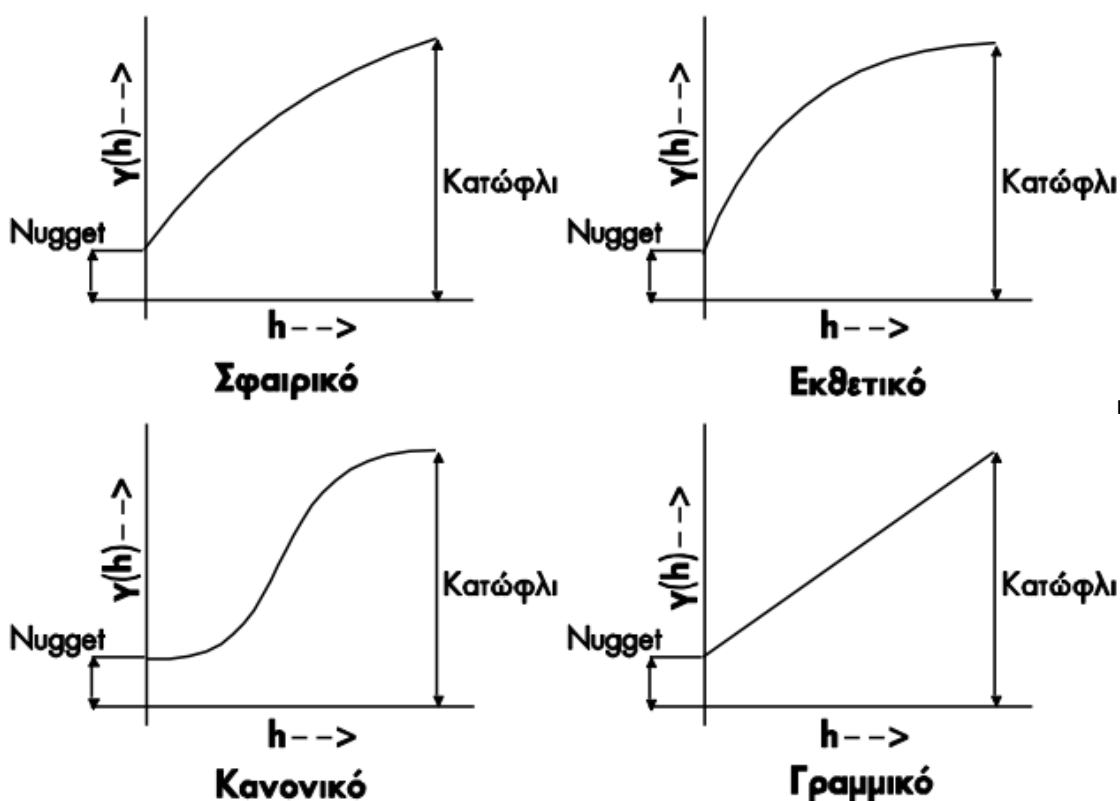
Τύπος 5.3.

Στον τύπο το γράμμα $Z(x)$ αντιπροσωπεύει την τιμή σε μία θέση στον χώρο x . Το γράμμα E αναφέρεται στην αναμενόμενη τιμή (expectation value). Το $Z(x+h)$ αντιστοιχεί την τιμή σε μια θέση $x+h$, και το γράμμα h αντιπροσωπεύει την απόσταση, lag. Η μέθοδος Kriging βασίζεται στα ημιβαριόγραμμα (Παπαδοπούλου, 2014).

Πηγή παραπάνω μαθηματικών τύπων, (Ringrose Bentley, 2015).



Διάγραμμα 5.4.
Τυπικό παράδειγμα
ενός
ημιβαριογράμματος
(Παπαδοπούλου,
2014).



Διάγραμμα 5.4. Στα
διαγράμματα
παρουσιάζονται
τέσσερις τύποι
ημιβαριογραμμάτων.

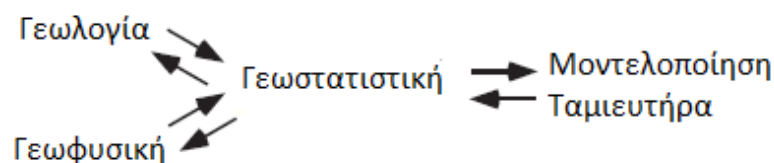
- Το Sill, κατώφλι, είναι μια σταθερή τιμή γ που μπορεί να προσεγγιστεί από απομακρυσμένα ζευγάρια τιμών. Είναι η ανώτερη τιμή που μπορεί να λάβει η ημιμεταβλητότητα $\gamma(h)$, με την παράλληλη αύξηση της τιμής της απόστασης, μεταβλητή h . Η αφαίρεση του Nugget από το Sill δίνει την τιμή του Partial Sill, μερικό κατώφλι.
- Το Range, εύρος, είναι η απόσταση που χρειάζεται για να δημιουργηθεί το sill. Είναι επίσης το κομμάτι του ημιβαριογράμματος που παρουσιάζει την αύξηση της ημιμεταβλητότητας, με την ταυτόχρονη αύξηση της απόστασης των θέσεων των τιμών.

- Η καμπύλη του ημιβαριογράμματος τέμνει τον άξονα πάνω από το μηδέν και ξεκινάει από μια θετική τιμή. Αυτή η τιμή ονομάζεται *Nugget*, *μικρομετατόπιση*, και είναι η εκτιμώμενη τιμή όταν η απόσταση μεταξύ των δύο στοιχείων είναι μηδενική.

Στατικότητα (stationarity) ονομάζεται " η νοητή απόφαση σχετικά με το ποιά δεδομένα πρέπει να ομαδοποιηθούν μαζί για μελλοντική στατιστική ανάλυση, και αναφορικά με ποιόν όγκο, του υπό εξέταση ταμιευτήρα, αυτή η στατιστική διαδικασία είναι αντιπροσωπευτική. Παράδειγμα εφαρμογής της έννοιας της στατικότητας είναι η μελέτη του πορώδους μια φάσης, ενός στρώματος, ενός σχηματισμού του ταμιευτήρα " (Pyrcz Deutsch, 2014).

Είναι προφανές ότι αν δεν λάβει χώρα κάποια ομαδοποίηση, δεν θα μπορούσαμε να μελετήσουμε έναν τόσο μεγάλο όγκο δεδομένων, πόσο μάλλον να τον χρησιμοποιήσουμε για έρευνα. Ο όγκος των δεδομένων θα πρέπει να κριθεί ικανοποιητικός, πριν προβούμε σε ομαδοποιήσεις. Η στατικότητα μπορεί να αλλάξει κατά την διάρκεια της έρευνας. Εάν για παράδειγμα συμπεράνουμε, μέσω στατιστικής, ότι τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί με μη ικανοποιητικό τρόπο, τότε οφείλουμε να προβούμε σε περεταίρω διαίρεση τους. Υπερβολική γενίκευση, και ελλιπής κατηγοριοποίηση, οδηγεί αναπόφευκτα στην απόκρυψη, συχνά σημαντικών τάσεων. Μεταβολές στην στατικότητα μπορεί να προκαλέσει και η αλλαγή του στόχου του μοντέλου. Η απόφαση της στατικότητας είναι υψηλής σημασίας για την καταλληλότητα και αξιοπιστία των γεωστατιστικών μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Υπερβολική γενίκευση καλύπτει την ετερογένεια, ενώ υπερβολική διαίρεση δημιουργεί άσκοπη αβεβαιότητα (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015 ; Gluyas, Swarbrick, 2004).

Ένα μοντέλο προσπαθεί να καταγράψει το επίπεδο της στρωματογραφικής ιεραρχίας που επηρεάζει την χωρική κατανομή της ανομοιογένειας στον χώρο. Η παραπάνω προσπάθεια αποτελεί την έννοια της Ιεραρχίας (Hierarchy) σε ένα μοντέλο. Τυπικό παράδειγμα της ιεραρχίας είναι η σταδιακή αλλαγή της λιθολογίας όσο το βάθος ελαττώνεται, δηλαδή, αλλαγή από ψαμμίτη σε άργιλο, και τέλος σε ασβεστόλιθο (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).



Διάγραμμα 5.5. Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης των γεωεπιστημών, της γεωστατιστικής και της μοντελοποίησης. Διάγραμμα τροποποιημένο από (Pyrcz, Deutsch, 2014).

Λόγω του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων δεδομένων, η δημιουργία ενός μοντέλου, που μπορεί να αντιπροσωπεύει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα αποτελεί δύσκολο εγχείρημα. Στο παρελθόν, η χρήση αλγορίθμων δημιουργούσε μοντέλα τα οποία πολλές φορές ήταν σε μεγάλο βαθμό μη ρεαλιστικά από γεωλογικής άποψης. Το παραπάνω ζήτημα αντιμετωπιζόταν με την βοήθεια γεωλόγων, οι οποίοι με βάση την γεωλογική τους γνώση, σκέψη και ένστικτο, αναλάμβαναν να διορθώσουν αυτές τις ατέλειες, και να δημιουργήσουν ένα πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα παρεμβαίνοντας άμεσα στο μοντέλο, εξομαλύνοντας έτσι την εικόνα του. (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015 ; Gluyas Swarbrick, 2004). Αυτή η πραγματικότητα, ώθησε ένα πλήθος μηχανικών, μαθηματικών και γεωλόγων στην έρευνα και ,κατασκευή καινούργιων αλγορίθμων, που δεν θα παρουσίαζαν τους περιορισμούς και τα σημαντικά γεωλογικά ελαττώματα των παλαιότερων. Από αυτήν την προσπάθεια γεννήθηκε σημαντικός αριθμός στατιστικών προσεγγίσεων χωρικής παρεμβολής. Η καλύτερη από αυτές δημιουργήθηκε από τον μαθηματικό Georges Matheron, βασισμένος στην έρευνα του μηχανικού Danie G. Krige, το 1960. Η προσέγγιση αυτή, που ονομάστηκε Kriging, προς τιμήν του Krige, προσφέρει την Βέλτιστη Δυνατή Γραμμική Ανεπηρέαστη Εκτίμηση των ενδιάμεσων (άγνωστων) τιμών, Best Linear Unbiased Prediction (Estimation), εξού και ο χαρακτηρισμός BLUE και BLUP . Πρακτικά αυτό σημαίνει, ότι καμία άλλη μέθοδος δεν παρουσιάζει μικρότερο στατιστικό λάθος από αυτήν. Για αυτό τον λόγο η χρήση της έχει πλέον καθιερωθεί στον χώρο των γεωεπιστημών. Ο έλεγχος του αποτελέσματος εξακολουθεί να υφίσταται, και διορθώσεις με βάση την γεωλογική σκέψη και ρεαλισμό μπορούν να λάβουν χώρα όπου κριθεί αναγκαίο. Συνοπτικά, η μέθοδος χρησιμοποιείται για την κάλλιστη εκτίμηση μιας τιμής, σε μία θέση που αυτή είναι άγνωστη. Οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο Kriging περιέχουν την έννοια της μέσης τιμής ή αλλιώς του γενικευμένου μέσου όρου (μ). Ο τρόπος χρήσης του γενικευμένου μέσου όρου στους μαθηματικούς τύπους, σε συνδυασμό με την έννοια της στατικότητας που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, χωρίζει την μέθοδο Kriging σε ορισμένες υποκατηγορίες, οι πιο γνωστές από τις οποίες είναι οι εξής : Simple Kriging, Ordinary Kriging, Kriging with External Drift και Indicator Kriging (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015 ; Gluyas Swarbrick, 2004).

Ο γενικός μαθηματικός τύπος με βάση τον οποίο λειτουργούν όλες οι παραλλαγές της μεθόδου Kriging είναι ο ακόλουθος (Παπαδοπούλου, 2014). Το γράμμα Z ορίζει την εξεταζόμενη μεταβλητή. Το γράμμα μ ορίζει τον γενικευμένο μέσο όρο, ο οποίος μπορεί να είναι σταθερός ή να αλλάζει κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Το γράμμα s δείχνει την τοποθεσία του σημείου της μέτρησης (Παπαδοπούλου, 2014)

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$$

Τύπος 5.6. γενικός μαθηματικός τύπος μεθόδων Kriging.

Simple Kriging, Απλό Kriging: Στην μέθοδο αυτή, ο γενικευμένος μέσος όρος θεωρείται γνωστός και διατηρείται σταθερός για όλη την περιοχή της παρέμβασης. Αυτή η επιλογή συνδέεται στενά με την έννοια της στατικότητας. Ο τύπος που περιγράφει την μέθοδο είναι ο ακόλουθος. Η εκτίμηση του Simple Kriging υπολογίζεται για θέση X χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από τις n θέσεις. Το $W_\alpha X_\alpha$ είναι το στατιστικό βάρος (Majani, 2007 ; Pyrcz Deutsch, 2014).

$$Z_{sk}(X) = \sum_{\alpha=1}^n W_\alpha(X_\alpha) + \left[1 - \sum_{\alpha=1}^n W_\alpha(X_\alpha) \right] m \quad \text{Τύπος 5.7.}$$

Ordinary Kriging, Σύνηθες Kriging: Ο μέσος όρος θεωρείται ότι διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, και επανεκτιμάμε με βάση τα κοντινότερα διαθέσιμα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται με την μαθηματική επεξεργασία του τμήματος μέσα στις παρενθέσεις του τύπου που παρουσιάστηκε παραπάνω και την δημιουργία ενός στατιστικού εκτιμητή στην θέση του. Ο αριστερός τύπος περιγράφει τον στατιστικό εκτιμητή. Ο τύπος αυτός λειτουργεί εντός κάποιων ορίων που θέτονται με την βοήθεια του τύπου στα δεξιά. Το σύνηθες Kriging δίνει πολύ καλά αποτελέσματα σε περιβάλλον με πυκνό και πλούσιο δίκτυο δεδομένων από γεωτρήσεις. Αντιθέτως η χρήση του αντενδείκνυται σε περιβάλλον με φτωχό δίκτυο γεωτρήσεων (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

$$Z^*_{ok}(X) = \sum_{\alpha=1}^n W_\alpha(X_\alpha) Z(X_\alpha) \quad \text{Τύπος 5.9.}$$

$$\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha(X_\alpha) = 1 \quad \text{Τύπος 5.8.}$$

Kriging with External Drift, Kriging με Τάση: Είναι γνωστό και ως Universal Kriging και αποτελεί παραλλαγή του Σύνηθους Kriging. Επιτρέπει την πρόβλεψη της μεταβλητής Z , για την οποία η πληροφορίες είναι περιορισμένες, με την βοήθεια μιας άλλης μεταβλητής s η οποία θεωρείται ντετερμινιστική σε φύση. Η πληροφορίες της δεύτερης μεταβλητής μπορεί να προέρχονται από σεισμικά δεδομένα, μετρήσεις μαγνητικών πεδίων, βαρυτικών πεδίων και άλλα. Θεωρούμε ότι οι δύο ποσότητες συνδέονται μεταξύ τους γραμμικά. Με την χρήση μαθηματικών οδηγούμεστε στους ακόλουθους τύπους. Το x αναφέρεται στην θέση του δείγματος, το w_j στο στατιστικό βάρος, το σ στην διακύμανση, το C στην συνδιακύμανση. Τα σύμβολα μ_1 και μ_2 αναφέρονται σε μεταβλητές Lagrange (Majani, 2007 ; Pyrcz Deutsch, 2014).

$$\sum_{j=1}^n w_j C(x_i - x_j) - \mu_1 - \mu_2 s(x_i) = C(x_i - x_0) \text{ for } i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

Τύπος 5.10.

$$\sum_{j=1}^n w_j s(x_j) = s(x_0)$$

$$\sigma_K^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n w_i C(x_i - x_0) + \mu_1 + \mu_2 s(x_0)$$

Πηγή παραπάνω μαθηματικών τύπων, (Majani, 2007).

Indicator Kriging: Αυτή η μορφή Kriging είναι μη-παραμετρική και αποτελεί την δυσκολότερη και πιο περίπλοκη μορφή Kriging. Αποτελεί πάντως, την πιο αποτελεσματική μη-παραμετρική μεθοδολογία που υπάρχει αυτή την στιγμή στην διάθεση της βιομηχανίας και των γεωεπιστημών. Η καρδιά της παραπάνω μεθοδολογίας βρίσκεται στον διωνυμικό τρόπο ταξινόμησης των διαθέσιμων τιμών, είτε σε 1, είτε σε 0, αναλόγως της σχέσης τους ως προς μια άλλη τιμή z_k όπως φαίνεται στον τύπο στα δεξιά.

$$\text{Τύπος 5.11.} \quad i(x, z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(x) \geq z_k \\ 0 & \text{if } z(x) < z_k \end{cases}$$

Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της επιρροής των πολύ υψηλών και πολύ χαμηλών τιμών. Ακόμα, αν εφαρμοστεί σε μεγάλη έκταση, μπορεί να διαχωρίσει με αποτελεσματικό τρόπο τα διαθέσιμα δεδομένα σε ομάδες, για παράδειγμα αυτά που είναι πάνω από ένα όριο, και αυτά που είναι κάτω από αυτό. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας οδηγεί σε μια εξαρτημένη συνάρτηση κατανομής η οποία εκφράζεται με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο, όπου u είναι η περιοχή, z_k η οριακή τιμή, F η κατανομή της αβεβαιότητας, και λ_α τα στατιστικά βάρη. Εάν οι οριακές τιμές είναι πολλές τότε η λύση της εξίσωσης θα επαναληφθεί (Glacken et al., 1998 ; Pyrcz Deutsch, 2014).

$$F_{IK}(u; z_k) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(z_k) [i(u_\alpha; z_k) - F(z_k)] + F(z_k) \quad \text{Τύπος 5.12.}$$

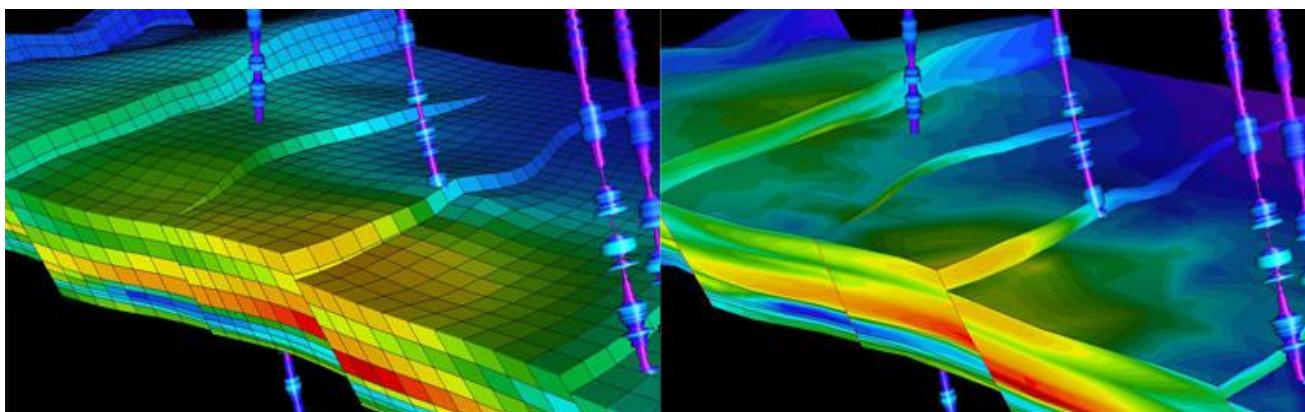
Cokriging, Συνδυασμένο Kriging: Οι μέθοδοι συμβατικού Kriging εξετάζουν δεδομένα μίας μοναδικής ιδιότητας. Για παράδειγμα η άγνωστη τιμή του πορώδους σε ένα σημείο, θα εκτιμηθεί με βάση τις γειτονικές τιμές. Αντιθέτως, η μέθοδος Cokriging επιτρέπει την συσχέτιση δεδομένων διαφορετικών ιδιοτήτων. Για παράδειγμα το πορώδες θα μπορούσε να εκτιμηθεί τόσο με βάση τις γειτονικές τιμές του πορώδους, αλλά και με δεδομένα από σεισμικές έρευνες. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη αν τα Hard δεδομένα είναι λίγα, αλλά τα συγγενικά Soft είναι πολλά σε αριθμό. Οι τέσσερις πιο κοινές υποκατηγορίες είναι οι Simple, Ordinary, Collocated και Indicator. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο μεταβλητές, μια κύρια και μια δευτερεύουσα, ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει τον στατιστικό εκτιμητή $Y(u)$ είναι ο εξής, όπου Y_2 είναι η δευτερεύουσα μεταβλητή, $\lambda_{\alpha 1}$ το στατιστικό βάρος των δειγμάτων $n_1 Y_1$, $\lambda'_{\alpha 2}$ το στατιστικό βάρος των δειγμάτων $n_2 Y_2$ (Pyrcz Deutsch, 2014).

$$Y_{COK}^*(u) = \sum_{\alpha_1=1}^{n_1} \lambda_{\alpha_1} Y(u_{\alpha_1}) + \sum_{\alpha_2=1}^{n_2} \lambda'_{\alpha_2} Y_2(u'_{\alpha_2}) \quad \text{Τύπος 5.13.}$$

Πηγή παραπάνω μαθηματικών τύπων, (Ringrose Bentley, 2015 ; Pyrcz Deutsch, 2014).

Sequential Gaussian Simulation: Η μέθοδος SGS αποτελεί μια απλή, εύκολη στην εφαρμογή, και αξιόπιστη μέθοδο μοντελοποίησης με βάση την Gaussian στατιστική. Οι μαθηματικοί τύποι της μεθόδου δημιουργούνται με την επεξεργασία των τύπων της μεθόδου Kriging. Πλεονέκτημα της αποτελεί η αποτελεσματική προσομοίωση του πορώδους και της διαπερατότητας των σχηματισμών (Pyrcz Deutsch, 2014).

Sequential Indicator Simulation: Η μέθοδος SIS επιτρέπει την ευκολότερη ενσωμάτωση δεδομένων, καθώς επίσης και μεγαλύτερη ευελιξία στον τρόπο αντιμετώπισης των ακραίων τιμών από τις μεθόδους Gaussian. Βασίζεται και αυτή στις μαθηματικούς τύπους των μεθόδων Kriging. Κατά την χρήση της πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ορισμένα ζητήματα που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την προσομοίωση. Επειδή τα δεδομένα δεν είναι σχεδόν ποτέ αντιπροσωπευτικά, πρέπει να επιλέγεται με προσοχή ο καταλληλότερος τύπος βαριογραμμάτων, στα οποία θα βασιστεί η μέθοδος. Ακόμα, καθώς η μέθοδος αυτή, όπως και η μέθοδος SGS, βασίζεται στην μέθοδο Kriging, η επιλογή της σωστής μορφής αυτής της μεθόδου, πχ Simple Kriging, είναι υψηλής σημασίας για την σωστή λειτουργία της SIS (Pyrcz, Deutsch 2014).

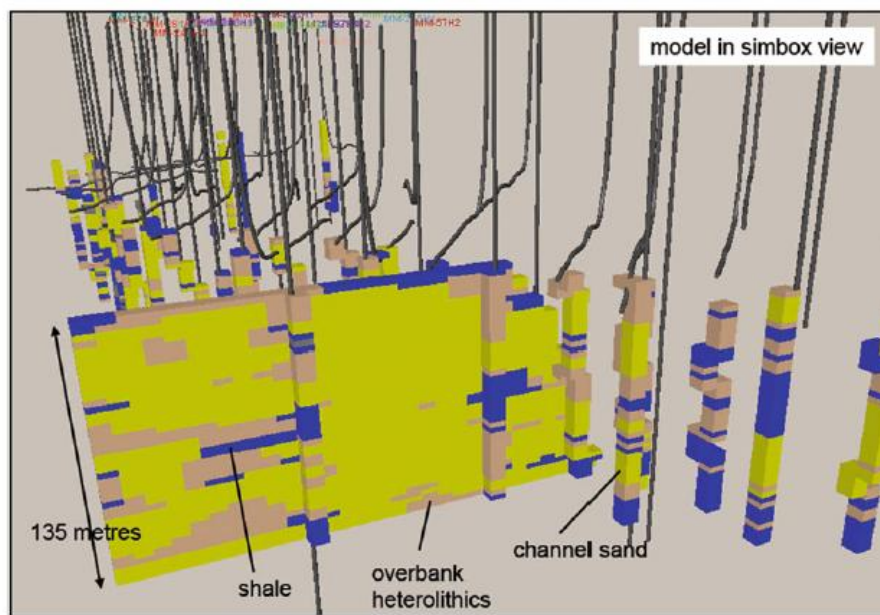


Σχήμα 5.14. Αποτύπωση των ιδιοτήτων ορισμένων σχηματισμών σε μια έντονα τεκτονισμένη περιοχή με την χρήση λογισμικού Cell Based Modeling. Εικόνα από το πρόγραμμα EarthVision της εταιρείας DYNAMIC GRAPHICS Inc.

Οι μέθοδοι Kriging, Sequential Gaussian-Indicator Simulation και άλλες, ανήκουν στην κατηγορία του Pixel (Cell) Based Modeling. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας, λειτουργούν χρησιμοποιώντας γεωστατιστικούς αλγόριθμους, και δίνοντας τιμές σε κελιά, τα οποία ανήκουν σε ένα τρισδιάστατο σύστημα. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των μεθόδων, είναι ότι αδυνατούν να προσδώσουν στα αποτελέσματα τους σωστή χωρική εικόνα. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα μπορεί να είναι στατιστικά σωστά, αλλά δεν μοιάζουν ορθά στην οπτική παρατήρηση. Όταν η γεωμετρική ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι σημαντική, τότε καλύτερη επιλογή αποτελούν οι μέθοδοι της κατηγορίας Object Based Modeling. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν αλγόριθμοι που λειτουργούν και με βάση την γεωμετρική ορθότητα των αποτελεσμάτων τους. Η γνώση της γεωμετρίας των σχηματισμών μπορεί να ενσωματωθεί στον αλγόριθμο που δημιουργεί την προσομοίωση (Pyrcz Deutsch, 2014).

5.3. Object Based Modeling

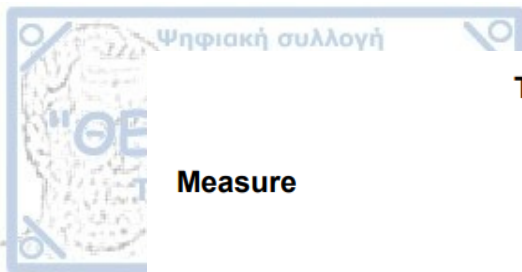
Σύμφωνα με τους Hassanpour και Deutsch (2010), η χρήση μεθόδων Object Based Modeling ενδείκνυται όταν " η γεωμετρία των σχηματισμών είναι σωστά κατανοητή και μπορεί να αποδοθεί με απλά σχήματα ". Η μαθηματική βάση αυτών των μεθόδων βρίσκεται στην ανάπτυξη της Boolean στατιστικής. Μέθοδοι Object Based χρησιμοποιούνται έντονα στην μοντελοποίηση ποτάμιων περιβαλλόντων (fluvial). Πρόβλημα που παρουσιάζουν είναι η αδυναμία τους να ικανοποιήσουν ταυτόχρονα μεγάλο αριθμό δεδομένων από πυρηνοληψίες, δηλαδή, ο αλγόριθμος δυσκολεύεται να γεμίζει τον χώρο μεταξύ των γεωτρήσεων με τρόπο ώστε να ικανοποιεί πλήρως τα αρχικά δεδομένα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Funnelling. Οι τεχνικές Pixel και Object Modeling λειτουργούν με τρόπο αλληλοσυμπλήρωσης. Δηλαδή σε μια προσομοίωση Object Based, το εσωτερικό των αντικειμένων θα γεμίζει με την βοήθεια Pixel Based αλγορίθμων (Hassanpour Deutsch, 2010 ; Deutsch Tran, ; Seifert Jensen, 2000).



Σχήμα 5.15.
Απεικόνιση του
φαινομένου του
Funnelling (Ringrose, Bentley,
2015).

5.4. Texture Based Modeling

Η Texture Based Modeling είναι μια μέθοδος που " αντί για ημιβαριογράμματα, χρησιμοποιεί μια εκπαιδευτική εικόνα (training image) που έχει δώσει ο χρήστης, για να υπολογίσει την υπό συνθήκη πιθανότητα σε μια θέση παρεμβολής, με βάση την παρατήρηση, και τα δεδομένα που έχουν ήδη υποστεί παρεμβολή " (Kessler et al). Βασίζεται στην στατιστική πολλαπλών σημείων, η οποία συγγενεύει με την Gaussian στατιστική. Η εκπαιδευτική εικόνα δημιουργείται με βάση ημιβαριογράμματα (He et al, 2014 ; Meerschman et al, 2012 ; Boisvert et al, 2006 ; Van den Boogaart, 2006).



Two-point statistics ↔ multiple-point statistics

Measure	statistical relation of two points $z(u)$ and $z(u+h)$	structures and patterns beyond 2-point correlation
Conditional probability	Variogram model	Training image
Parameterization	Sill, Range, Nugget Shape of Variogram	Proportions, Scale, Anisotropy

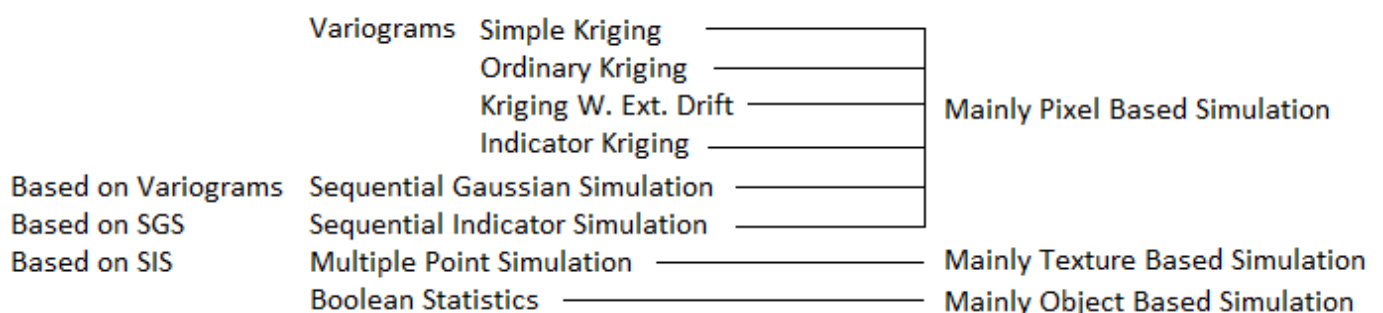
Πίνακας 5.16. Πίνακας που παρουσιάζει εν συντομία τις ιδιότητες των Multiple Point Statistics (Kessler et al.).

5.5. Σύνοψη Κεφαλαίου

Ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας, και η καλύτερη δυνατή αντιμετώπιση της αβεβαιότητας της οποίας αποτελεί αναπόσπαστη μεταβλητή. Αυτή η προσέγγιση επιτυγχάνεται με την βοήθεια αλγορίθμων, οι οποίοι βασίζονται στις έννοιες της γεωστατιστικής και επιτρέπουν την περίπλοκη επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων. Η γεωστατιστική αποτελεί έναν κλάδο των μαθηματικών, που προσφέρει πλήθος δυνατοτήτων, πάνω στις οποίες μπορεί να κτιστεί ένας αλγόριθμος. Το μεγαλύτερο μέρος των αλγορίθμων βασίζεται στην στατιστική έννοια των ημιβαριογραμμάτων, με σημαντικό αριθμό από αυτούς να αναπτύσσει τα βαριογράμματα σε μεγαλύτερο βαθμό, εισάγοντας μεταβλητές και περισσότερους τρόπους εξέτασης των δεδομένων. Ο τρόπος έκφρασης των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δεδομένων από τους αλγορίθμους μπορεί να χωριστεί γενικά σε τρεις κατηγορίες: Pixel, Object, Texture. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά την σχέση αλγορίθμων, μαθηματικών και τρόπου έκφρασης.

Το μαθηματικό
σκέλος
βασίζεται σε :

Διάγραμμα 5.17.



Η επιβεβαίωση της ύπαρξης υδρογονανθράκων, μέσω της ερμηνείας των σεισμικών δεδομένων και την μελέτη στατικών γεωλογικών μοντέλων, δίνει το έναυσμα για την κατασκευή μοντέλων ταμιευτήρων, για την κατασκευή των οποίων μπορούν να διακριθούν δύο κατεύθυνσης.

Η πρώτη προσέγγιση, προτείνει την κατασκευή ενός και μοναδικού μοντέλου, στο οποίο θα προστίθενται νέα δεδομένα, και με βάση το οποίο θα ερευνώνται τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Η δεύτερη προσέγγιση προτάσσει την κατασκευή πλήθους μοντέλων, τα οποία θα εξετάζουν συγκεκριμένα ζητήματα και όταν εκπληρώσουν τον στόχο τους, θα μπορούν να αρχειοθετούνται (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

Η επιλογή της πρώτης κατεύθυνσης παρουσιάζει προβλήματα στην διαχείριση του υλικού, και σε βάθος χρόνου το μοντέλο γίνεται δύσχρηστο στην ερμηνεία, την λειτουργία και την μεταβίβαση. Για αυτό τον λόγο η δημιουργία τέτοιων μοντέλων γενικά αποφεύγεται.

Η δεύτερη προσέγγιση οδηγεί στην κατασκευή πλήθους μοντέλων, κατασκευασμένα για να διερευνήσουν συγκεκριμένα ζητήματα. Τα μοντέλα αυτά είναι αναλώσιμα, ευκολότερα στην κατασκευή και την ερμηνεία, και όταν πλέον έχουν υπηρετήσει τον σκοπό τους, μπορούν να αποσυρθούν και να αρχειοθετηθούν για πιθανή μελλοντική χρήση. Τα μοντέλα αυτά, καθώς επίσης και τα αποτελέσματά τους μπορούν να μεταβιβαστούν εύκολα από ομάδα σε ομάδα δίχως παρερμηνείες. Τα μοντέλα αυτού του τύπου, παρά την στοχευμένη τους φύση, έχουν ως κοινή βάση βασικές γεωλογικές αρχές και την φύση του ταμιευτήρα προς εξέταση (Ringrose Bentley, 2015 ; Overeem, 2008).



- Fit-for-purpose modeling -

Ο στόχος ενός τέτοιου αναλώσιμου μοντέλου μπορεί να ποικίλει, αλλά πρέπει πάντα να είναι ξεκάθαρος. Ο στόχος θα επιβάλει και το αντίστοιχο επίπεδο ακρίβειας, προετοιμασίας των δεδομένων, προπαρασκευαστικής έρευνας κτλ. Παρακάτω δίνονται ορισμένα παραδείγματα πιθανών στόχων ενός μοντέλου (Ringrose Bentley, 2015).

6.1. Πιθανοί στόχοι ενός μοντέλου ταμιευτήρα

- *Η διαμόρφωση μιας γενικής εικόνας του ταμιευτήρα.* Η μεταφορά της γεωλογικής σκέψης σε πρόσωπα που μπορεί να μην έχουν γνώση στον τομέα αποτελεί σημαντικό ζήτημα, πχ οι μηχανικοί του προγράμματος ή το μετοχικό συμβούλιο της μελετητικής εταιρείας.
- *Η μέτρηση του όγκου των ρευστών και η χωρική τους κατανομή .* Σημαντική πληροφορία για το οικονομικό τμήμα της επένδυσης , καθώς επίσης και για την εκτίμηση του μεγέθους των μελλοντικών εγκαταστάσεων.
- *Η εύρεση της μέγιστης απολήψιμης ποσότητας υδρογονανθράκων.* Μοντέλα αυτού του τύπου, αν και περιορισμένα σε στόχο, είναι συνήθως ιδιαίτερα περίπλοκα.
- *Η εύρεση της καταλληλότερης θέσης για γεώτρηση.* Μοντέλα αυτού του τύπου επιτρέπουν την κάλλιστη εκτίμηση της αβεβαιότητας, και την επιλογή των καλύτερων δυνατών θέσεων, τόσο από άποψη οικονομικών, όσο και από άποψη πιθανοτήτων.
- *Η δημιουργία προσομοίωσης της κίνησης των ρευστών.* Αυτά τα μοντέλα είναι και τα περιπλοκότερα, και επιτρέπουν την μελέτη του βέλτιστου αριθμού γεωτρήσεων, αναλογικά με την παραγωγή, την κίνηση των ρευστών εντός του ταμιευτήρα χωρικά και χρονικά.
- *Ο συνδυασμός παρατηρήσεων από διαφορετικές πηγές.* Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν την δημιουργία εικόνας με τον συνδυασμό δεδομένων από τις ερευνητικές γεωτρήσεις, την γενική γεωλογία της περιοχής, από τα σεισμικά δεδομένα κτλ, σε ένα σύνολο.
- *Η δημιουργία μοντέλου πορώδους-περατότητας.* Η καλύτερη δυνατή κατανόηση αυτών των δύο βασικών ιδιοτήτων ενός ταμιευτήρα θα επιτρέψουν την καλύτερη δυνατή λήψη αποφάσεων από τους μηχανικούς και τους γεωλόγους του προγράμματος.
- *Η μελέτη της επάρκειας των υπάρχοντων δεδομένων.* Η συλλογή νέων δεδομένων μπορεί να είναι μια ιδιαίτερα ακριβή διαδικασία , αλλά η επένδυση ενός πρόσθετου χρηματικού ποσού είναι πολλές φορές προτιμότερη από την δημιουργία ενός αναξιόπιστου μοντέλου.
- *Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που παρουσιάζει το μοντέλο.* Μοντέλα αυτού του τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω μελέτη μικρότερων τμημάτων του ταμιευτήρα , ή για την λήψη αποφάσεων αναφορικά με την μελλοντική κατεύθυνση του ερευνητικού προγράμματος .

Μετά την κατασκευή του μοντέλου θα πραγματοποιηθεί η ερμηνεία των αποτελεσμάτων και η λήψη των ανάλογων αποφάσεων (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

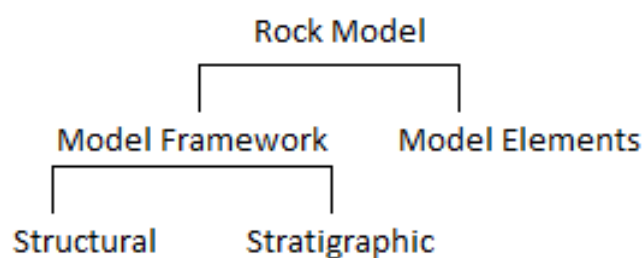
Γενικά, το rock model, ή lithofacies model, αποτελεί το επόμενο στάδιο στην δημιουργία ενός μοντέλου, μετά την επιλογή του στόχου. Η λειτουργία του rock model αφορά την σωστή τοποθέτηση των γεωλογικών φάσεων που αποτελούν τον προς εξέταση σχηματισμό. Η εξέταση των ιδιοτήτων του σχηματισμού που αφορούν την κίνηση των ρευστών, δηλαδή το πορώδες και η διαπερατότητα, θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης, στο property model. Η δημιουργία μιας ικανοποιητικής αναπαράστασης του υποβάθρου είναι σημαντική, ενώ αντίθετα, η αφιέρωση υπερβολικής ποσότητας χρόνου και έρευνας, με απώτερο στόχο την δημιουργία μιας απόλυτα αντιπροσωπευτικής εικόνας δεν ωφελεί.

Το rock model αποτελεί δηλαδή, το πρώτο βήμα, της κατασκευής του μοντέλου ταμιευτήρα. Η σημασία του και η έκταση του εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το είδος των σχηματισμών που εξετάζονται, η ακρίβεια που απαιτεί το ερευνητικό πρόγραμμα και άλλα. Εν γένει, αυτό το στάδιο, θέτει τα θεμέλια για την συνέχιση των μελετών, και την κατασκευή των επόμενων σταδίων δημιουργώντας έναν γεωλογικό σκελετό, πάνω στον οποίο μπορούν να γίνουν κάποιες βασικές ερμηνείες και προσθήκες.

Το rock model αποτελεί το πιο γεωλογικό στάδιο του μοντέλου. Όσο αυτό εξελίσσεται, το γεωλογικό κομμάτι του εξαλείφεται καθώς οι σχηματισμοί ομαδοποιούνται πλέον με βάση την συμπεριφορά τους στην κίνηση των ρευστών, όχι με βάση την λιθολογία τους (*model elements*).

- Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του rock model -

- Η κατανόηση της γεωλογίας του ταμιευτήρα στον χώρο (*model framework*).
- Η σωστή ομαδοποίηση των παρατηρούμενων σχηματισμών σε ενότητες (*model elements*).
- Η σωστή κατασκευή με τον βοήθεια των κατάλληλων αλγόριθμων.
- Η κατάλληλη κατανόηση και ισορροπία ανάμεσα στον ντετερμινισμό και την αβεβαιότητα.



Διάγραμμα 7.1. Η συνοπτική διαίρεση του Rock Model σε υποενότητες.

7.1. Model Framework και Model Elements

Συνολικά, στην μοντελοποίηση, είναι σημαντικό, ο γεωλόγος να έχει μια καθαρή εικόνα για τον ταμιευτήρα, και για την συνολική γεωλογία της περιοχής. Η προσθήκη πληροφοριών σε αυτήν την εικόνα θα οδηγήσει σε ένα μοντέλο που θα προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα. Αντιθέτως, αν οι πληροφορίες χρησιμοποιηθούν αυτόνομα, δίχως το κατάλληλο υπόβαθρο κατανόησης, το αποτέλεσμα δεν θα είναι θετικό.

Η συλλογή φωτογραφικού υλικού από ανάλογες γεωλογικές περιπτώσεις που λαμβάνουν χώρα σήμερα, πχ δελταϊκές αποθέσεις, μπορούν να βοηθήσουν τον γεωλόγο στον σχηματισμό αυτής της εικόνας. Η μελέτη και η σύγκριση μοντέλων ανάλογων περιπτώσεων μπορεί επίσης να βοηθήσει στην κατανόηση του ταμιευτήρα. Πάντως, η μελέτη εξωτερικού υλικού μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα, και αυτό γιατί οι γεωλογικές διαδικασίες επηρεάζουν τους σχηματισμούς σε βάθος χρόνου και με μεγάλη ισχύ με τις διαδικασίες της διαγένεσης και της τεκτονικής. Αυτό πρακτικά σημάνει ότι, δύο περιπτώσεις μπορεί να είναι συγγενικές ως προς τα αίτια δημιουργίας τους, αλλά στην πορεία να έχουν διαφοροποιηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθιστώντας την σύγκριση μεταξύ τους άσκοπη.

Πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι κάθε μοντέλο είναι διαφορετικό και μοναδικό, καθώς μελετά μια συγκεκριμένη και μοναδική περίπτωση.

Το model framework αποτελεί το δυσδιάστατο σκελετό (2D), τον οποίο εν συνεχεία θα γεμίσουν τα model elements και θα δώσουν την έννοια του χώρου. Μπορεί να διαχωριστεί σε δύο υποκατηγορίες, μία που αφορά τα *δομικά χαρακτηριστικά*, κυρίως τα ρήγματα της περιοχής, και μία που αφορά τα *στρωματογραφικά χαρακτηριστικά*, πχ αλλαγή φάσεων (Ringrose Bentley, 2015).

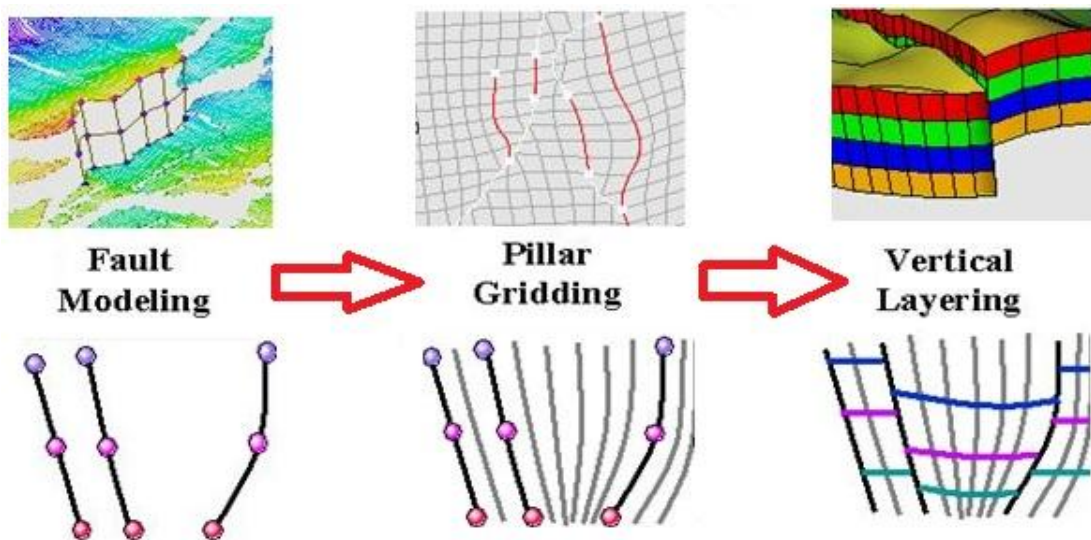
Τα model elements είναι τρισδιάστατες ενότητες (3D), οι οποίες διαφέρουν η μία από την άλλη στα πετροφυσικά και γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, πάντα με γνώμονα το είδος των ρευστών του ταμιευτήρα και *όχι με βάση την λιθολογία των πετρωμάτων που τις αποτελούν* (Ringrose Bentley, 2015).

Το στρωματογραφικό σκέλος του framework στοχεύει στην καλύτερη δυνατή χωρική κατανομή της ετερογένειας του υποβάθρου σχετικά με την κίνηση των ρευστών. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων που είναι διαθέσιμα. Καλής ποιότητας σεισμικά, δημιουργούν λιγότερη αβεβαιότητα (Hard Conditioning), ενώ αντίθετα, κακής ποιότητας σεισμικά, απαιτούν περισσότερη επεξεργασία και καθιστούν την ερμηνεία δυσκολότερη και πιο αβέβαιη (Soft Conditioning). Πάντα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο στόχος του μοντέλου, και το βασικό γεωλογικό σχέδιο το οποίο αποτελεί την βάση.

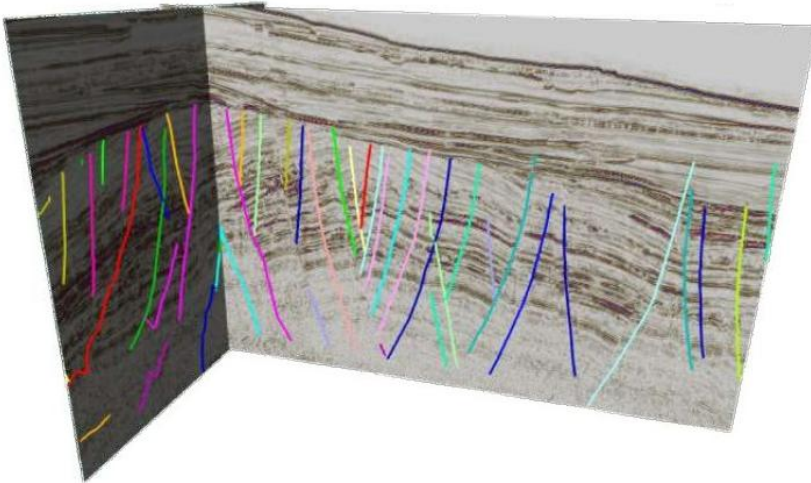
7.2. Δομικά Χαρακτηριστικά - Ρήγματα

Τα ρήγματα χωρίζονται σε ομάδες, ανάλογα με την μορφολογία τους, την κατεύθυνση της κίνησης των τεμαχίων τους και τον τρόπο γένεσής τους. Ορισμένες από αυτές είναι: κάθετα ρήγματα, ανάστροφα ρήγματα, γραμμικά ρήγματα, ληστρικά ρήγματα και καμπύλα ρήγματα. Η τοποθέτηση τους στο μοντέλο είναι μια περίπλοκη και επίπονη διαδικασία, ειδικά αν τα ρήγματα είναι ανάστροφα ή έχουν μικρή γωνία κλίσης. Τα ρήγματα μπορούν να αντιμετωπιστούν ως γραμμικά στοιχεία, ή ως χωρικές οντότητες. Μια προσέγγιση που καθιστά ευκολότερη την διαδικασία είναι η αντιμετώπιση των ρηγμάτων σαν καθαρά κάθετες γεωλογικές δομές. Η παραπάνω προσέγγιση δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα όταν τα ρήγματα έχουν μεγάλη γωνία κλίσης, πλησιάζουν δηλαδή το κατακόρυφο επίπεδο, και όταν έχουν μικρά άλματα μετατόπισης. Όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, ή τα ρήγματα δεν έχουν την κατάλληλη γεωμετρία ώστε να εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος, τότε πρέπει να γίνει ξεχωριστή γεωστατιστική ανάλυση για κάθε ένα από αυτά. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι συνήθως η ακόλουθη:

- Εντοπισμός της θέσης του κάθε ρήματος.
- Καθορισμός του σχήματος κάθε ρήματος (*Fault modeling*).
- Δημιουργία πλέγματος, με βάση τα ρήγματα που έχουν εισαχθεί (*Pillar gridding*).
- Δημιουργία οριζόντων σε τρεις διαστάσεις (*Layering*).
- Μελέτη των ιδιοτήτων των τεμαχίων του ρήματος : φάσεις, πορώδες, διαπερατότητα.

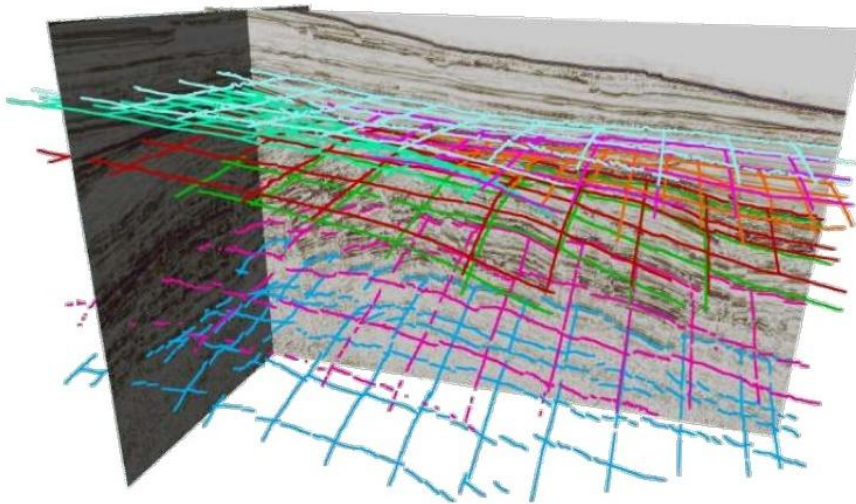


Εικόνα 7.2. Σχηματική απεικόνιση εισαγωγής ρηγμάτων από το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού Petrel της εταιρείας Schlumberger.



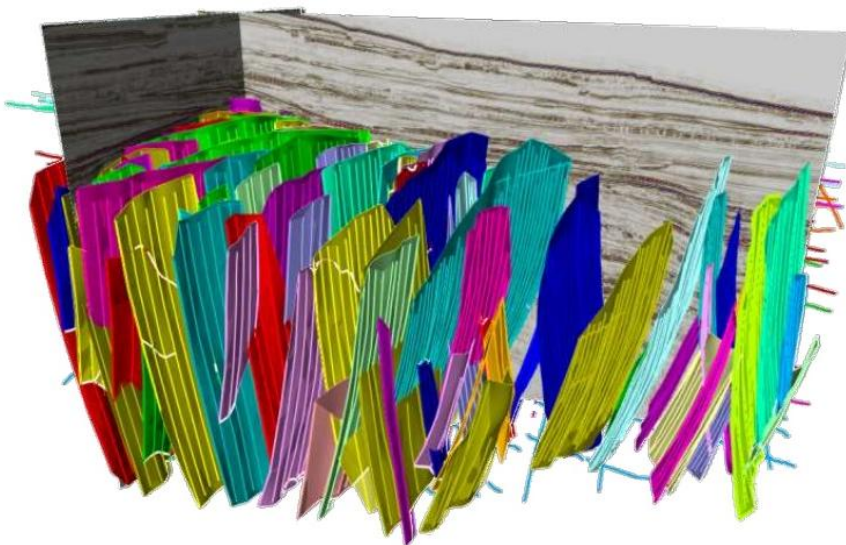
Βήμα 1° (Fault Modeling)

Εικόνα 7.3. Το πρώτο στάδιο της εισαγωγής ενός ρήγματος σε τρεις διαστάσεις είναι η μελέτη των σεισμικών δεδομένων , η εύρεση των ρηγμάτων, ο καθορισμός του σχήματος, της γωνίας κλίσης του, του άλματος και του βάθους.



Βήμα 2° (Pillar Gridding)

Εικόνα 7.4. Το επόμενο στάδιο αφορά την εισαγωγή ενός πλέγματος, με βάση το οποίο θα γίνει η τοποθέτηση των ρηγμάτων στον χώρο.



Βήμα 3° (Vertical Layering)

Εικόνα 7.5. Ο συνδυασμός των παραπάνω σταδίων οδηγεί στην τρισδιάστατη απεικόνιση του συστήματος των ρηγμάτων της περιοχής.

Πηγή : Construction of Structurally and Stratigraphically Consistent Structural Models using the Volume-Based Modeling Technology (IPTC-18216-MS).

7.3. Model Elements

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τα model elements είναι " τρισδιάστατες ενότητες, οι οποίες διαφέρουν ή μία από την άλλη στα πετροφυσικά και γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, πάντα με γνώμονα το είδος των ρευστών του ταμιευτήρα και όχι με βάση την λιθολογία των πετρωμάτων που τις αποτελούν " (Ringrose Bentley, 2015). Τα πετροφυσικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι για παράδειγμα το πορώδες και η διαπερατότητα. Συγκριτικά με τον τύπο υδρογονανθράκων που εμφανίζονται, εξετάζεται η σημαντικότητα στην διαφορά των τιμών. Δηλαδή, σε δύο περιπτώσεις, που αποτελούνται από τα ίδια ακριβώς πετρώματα, η ύπαρξη πετρελαίου μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική κατηγοριοποίηση των model elements, από ότι η ύπαρξη φυσικού αερίου, παρότι τα πετρώματα είναι ακριβώς ίδια από άποψη λιθολογίας. Διαφορές θα υπάρξουν ανάλογα και με τον τύπο του πετρελαίου, ελαφρύ ή βαρύ. Αυτό το γεγονός οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε αρκετές περιπτώσεις, η ύπαρξη περίπλοκου μοντέλου πρόβλεψης της κίνησης των ρευστών δεν είναι αναγκαία. Για παράδειγμα, το ξηρό φυσικό αέριο απαιτεί τα πιο απλά μοντέλα. Ακολουθεί το υγρό φυσικό αέριο, το ελαφρύ πετρέλαιο, και τέλος το βαρύ πετρέλαιο που απαιτεί την κατασκευή των πιο περίπλοκων μοντέλων (Pyrcz Deutsch, 2014 ; Ringrose Bentley, 2015).

Πρέπει να τονιστεί ότι τα μοντέλα που κατασκευάζονται για την προσομοίωση δεν είναι γεωλογικά. Δεν αντικατοπτρίζουν δηλαδή τους γεωλογικούς σχηματισμούς του υποβάθρου. Αντίθετα αντικατοπτρίζουν τα πετρώματα, με βάση τις ιδιότητες τους στην κίνηση των ρευστών.

Τα model elements μπορούν να διαιρεθούν συνοπτικά στους παρακάτω τύπους (Ringrose Bentley, 2015).

Λιθοφασικός Τύπος : Αυτός ο τύπος κατασκευάζεται με βάση ιζηματολογικά δεδομένα, που συνήθως προέρχονται από την ανάλυση των θρυμμάτων και την εξέταση των πυρήνων.

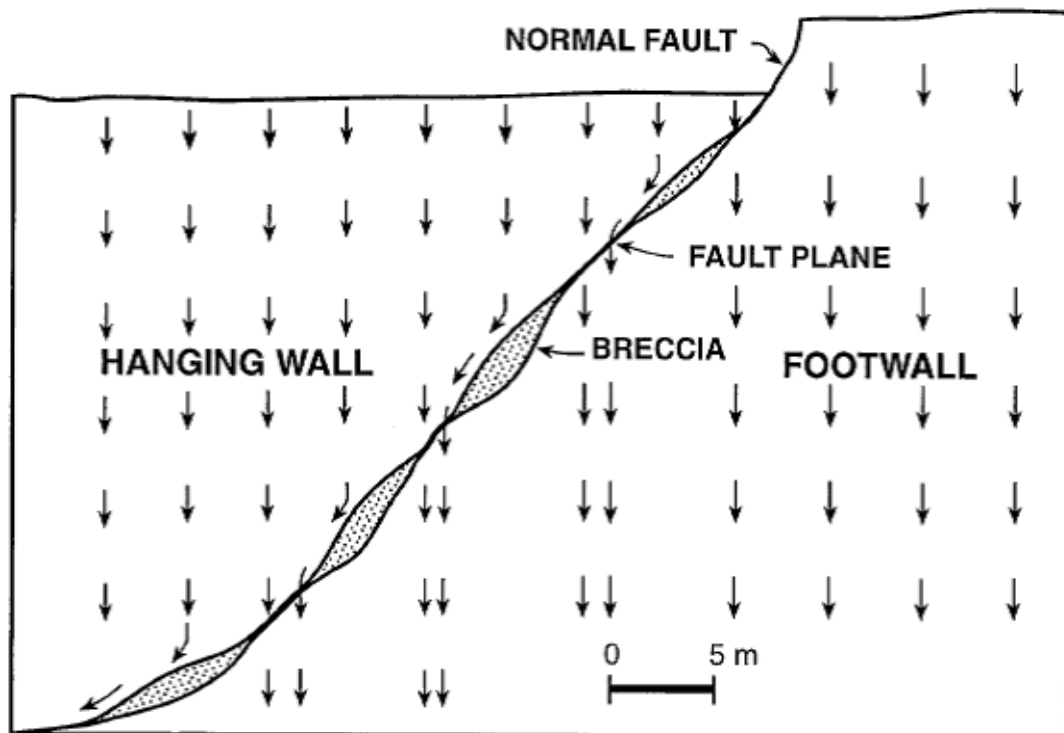
Γενετικός Τύπος : Αυτός ο τύπος δημιουργείται με βάση τις πληροφορίες που αντλούνται με την επεξεργασία δεδομένων που αφορούν τον τρόπο και τον τόπο απόθεσης των υλικών, που με την διαδικασία της διαγένεσης μετατράπηκαν στα υπό εξέταση πετρώματα. Παράδειγμα αποτελεί ή απόθεση ιζημάτων στην κοίτη ενός ποταμού, ή οι τουρβιδιτικές αποθέσεις υλικών που αποτέθηκαν σε περιβάλλον ηπειρωτικής κατωφέρειας.

Στρατιγραφικός Τύπος : Αυτός ο τύπος δημιουργείται με βάση δεδομένα στρωματογραφικά δεδομένα, όπως οι στρωματογραφικές ασυμφωνίες εντός των σχηματισμών.

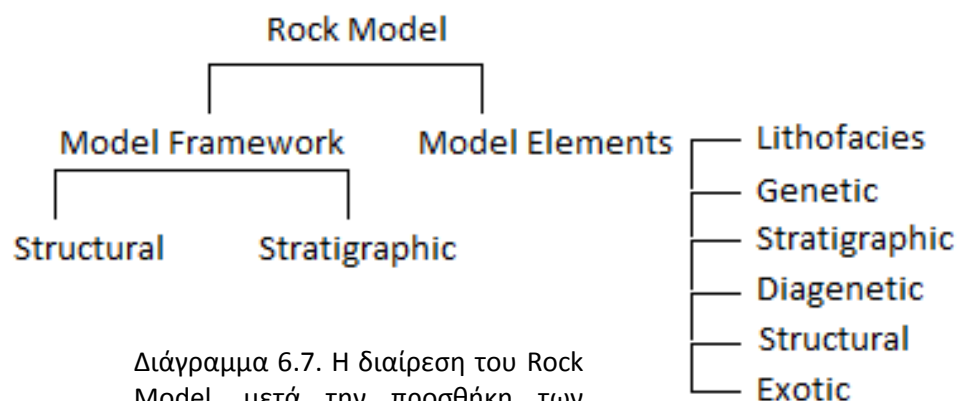
Διαγενετικός Τύπος : Ο τύπος αυτός αφορά τον τρόπο και την φάση διαγένεσης που μεταμόρφωσε τα ιζήματα. Υλικά τα οποία ίσως να έχουν διαφορετική γενετική προέλευση, μπορεί να επηρεάστηκαν από ένα κοινό μεταμορφικό-τεκτονικό-διαγενετικό γεγονός.

Δομικός Τύπος : Ο τύπος αυτός αφορά περιοχές που χαρακτηρίζονται κυρίως από σημαντικές δομικές αλλαγές, όπως για παράδειγμα περιοχές με σημαντική τεκτονική καταπόνηση. Η ύπαρξη τεκτονικού λατυποπαγούς ανάμεσα στα δύο τεμάχια ενός ρήγματος, δημιουργεί μια ζώνη με διαφορετικές ιδιότητες από το γειτονικό περιβάλλον.

Εξωτικός Τύπος : Η ομάδα αυτή περιγράφει πετρώματα τα οποία εμφανίζονται σπάνια στα περιβάλλοντα με τα οποία ασχολείται η βιομηχανία υδρογονανθράκων, παραδείγματος χάριν εμφανίσεις ηφαιστειακών υλικών ή πλουτωνικά πετρώματα.



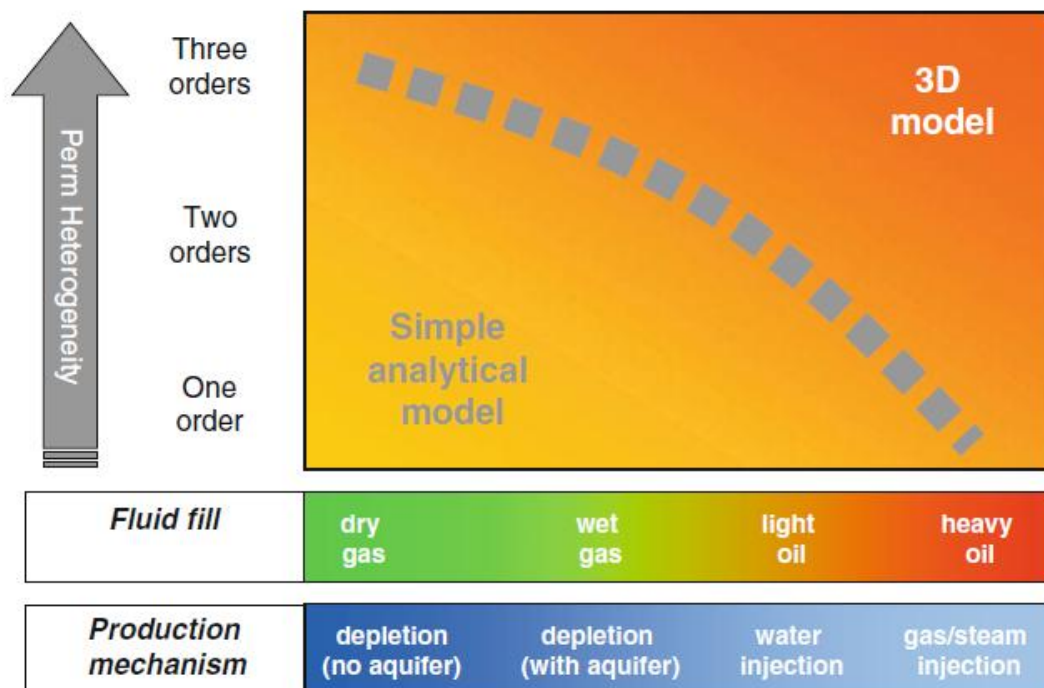
Εικόνα 7.6. Σχηματική απεικόνιση ενός κανονικού ρήγματος. Ανάμεσα στα δύο τεμάχια δημιουργείται λόγω τριβής ένα τεκτονικό λατυποπαγές (Breccia) URL: structuredatabase.wordpress.com



Διάγραμμα 6.7. Η διαίρεση του Rock Model, μετά την προσθήκη των χαρακτηρισμών των Model Elements.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο βαθμός της πολυπλοκότητας του μοντέλου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον τύπο υδρογονανθράκων. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την πολυπλοκότητα είναι ο τρόπος εξόρυξης, η θέση των εγκαταστάσεων και άλλες παράμετροι. Στην περίπτωση που το μοντέλο είναι απλό, ο διαχωρισμός των δεδομένων θα είναι πιο γενικός, και κατά συνέπεια τα model elements θα είναι λιγότερα σε αριθμό. Αντιθέτως, η δημιουργία περίπλοκων μοντέλων απαιτεί μεγάλη ακρίβεια, και συνεπώς πιο αναλυτική ταξινόμηση των δεδομένων. Αυτό με την σειρά του δημιουργεί περισσότερα model elements.

Με την χρήση μαθηματικών, οδηγούμαστε στον ακόλουθο πίνακα, που παρουσιάζει την επίδραση της ετερογένειας της διαπερατότητας, σε συνδυασμό με τον τύπο των υδρογονανθράκων, στην πολυπλοκότητα του μοντέλου.



Εικόνα 7.8. Η περιπλοκότητα ενός μοντέλου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το είδος των υδρογονανθράκων εντός του ταμιευτήρα (Ringrose Bentley, 2015).

Τέλος, αφότου έχει αποφασιστεί ο στόχος του μοντέλου, έχει κατασκευαστεί ο δυσδιάστατος σκελετός του μοντέλου, model framework, και έχει αποφασιστεί ότι θα γεμίσει με χωρικές οντότητες, model elements, πρέπει να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα model elements θα ομαδοποιηθούν. Δηλαδή ποιές πετροφυσικές ιδιότητες θα εξετάζουν. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι το πορώδες και η διαπερατότητα. Η διαδικασία της εξέτασης των ιδιοτήτων των σχηματισμών ορίζει το επόμενο βήμα της μοντελοποίησης, το Property Model, ή Petrophysics Model.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν οι έννοιες του πορώδους και τις διαπερατότητας οι οποίες αποτελούν τις βασικές παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται η ποιότητα ενός ταμιευτήρα.

8.1. Πορώδες

Ως πορώδες ορίζεται το πηλίκο του όγκου των πόρων που υπάρχουν σε έναν σχηματισμό , προς τον συνολικό όγκο του σχηματισμού, και συμβολίζεται με το γράμμα ϕ . Ο τύπος υπολογισμού του πορώδους είναι ο ακόλουθος: Το σύμβολο V_p αναφέρεται στον όγκο των πόρων, και το σύμβολο V_b αναφέρεται στον όγκο του πετρώματος.

$$\phi = \frac{V_p}{V_b}$$

Μαθηματικός Τύπος 8.1.

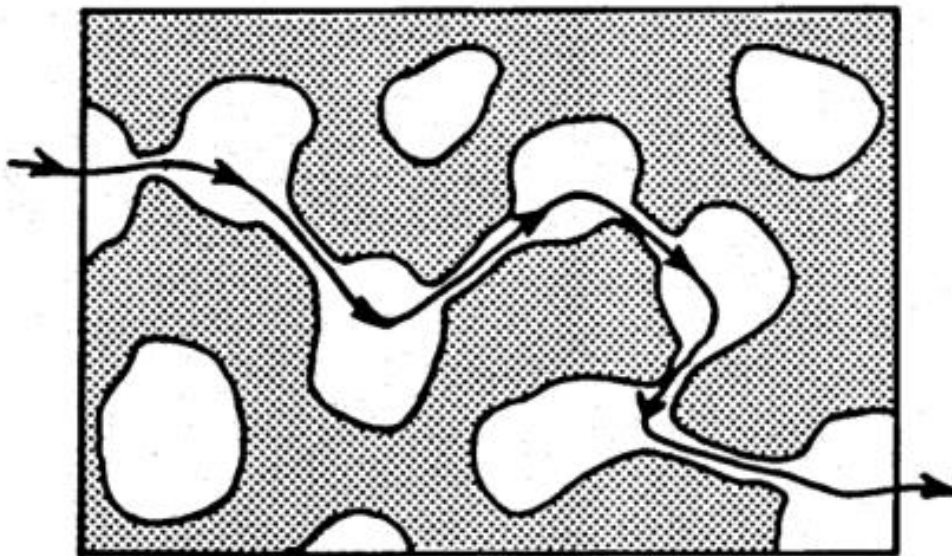
URL: infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/PET524-1a-porosity.pdf

Η μέτρηση του πορώδους μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους που θα αναφερθούν στην συνέχεια. Μέσα στους πόρους του πετρώματος-ταμιευτήρα βρίσκεται παγιδευμένο το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η εκτίμηση λοιπόν του μεγέθους της ιδιότητας του πορώδους είναι σημαντική ώστε να σχηματιστεί μια εικόνα αναφορικά με την ποσότητα των υδρογονανθράκων που μπορεί να βρίσκονται στο υπέδαφος.

Το μέγεθος της τιμής του πορώδους επηρεάζεται από ορισμένους παράγοντες, όπως η ταξινόμηση των κόκκων του πετρώματος. όσο καλύτερη είναι η ταξινόμηση, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του πορώδους του σχηματισμού. Η παρουσία κόκκων διαφορετικών μεγεθών, δρα αρνητικά στο πορώδες, καθώς οι μικρότεροι κόκκοι λειτουργούν αποφρακτικά, συσσωρευόμενοι στους κενούς χώρους μεταξύ των μεγαλύτερων σε διάμετρο κόκκων, και λειτουργώντας σαν υλικό πλήρωσης.

Η τιμή του πορώδους μπορεί να ποικίλει αρκετά από ταμειυτήρα σε ταμειυτήρα. Γενικά στους ασβεστολιθικούς ταμειυτήρες η τιμή κυμαίνεται από 5% έως 25%. Στους ψαμμιτικούς τα όρια της τιμής είναι ανάμεσα στο 10% και 40%. Τα πορώδες στους ασβεστολιθικούς ταμειυτήρες δημιουργείται σε μεγάλο βαθμό από την διαδικασία της δολομιτίωσης, της αντικατάστασης δηλαδή του Ca με Mg, με παράλληλη ελάττωση του όγκου. Το πορώδες των ψαμμιτικών ταμειυτήρων εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό συμπαγοποίησης των κόκκων, και αν τα κενά ανάμεσα τους έχουν πληρωθεί με υλικό. Το πορώδες δεν είναι σταθερό σε όλο τον όγκο των πετρωμάτων, τόσο των ψαμμιτικών όσο και των ασβεστολιθικών, και για αυτό θα πρέπει να εκτιμάτε ανά τακτά χωρικά διαστήματα, ή αν το πλήθος των γεωτρήσεων είναι μεγάλο, να γίνονται εργαστηριακές δοκιμές σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων.

Το πορώδες μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το συνολικό ποσοστό των πόρων του πετρώματος που βρίσκονται σε επαφή ή όχι. Αν οι πόροι βρίσκονται σε επαφή τότε καθιστούν δυνατή την κυκλοφορία των υδρογονανθράκων και άρα δημιουργούν συνθήκες κατάλληλες για παραγωγή. Ως ολικό (total) πορώδες, ορίζεται το πηλίκο του συνολικού όγκου των πόρων, προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος. Ως ενεργό (effective) πορώδες, ορίζεται το πηλίκο του συνολικού όγκου των πόρων που βρίσκονται σε επαφή, προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος.

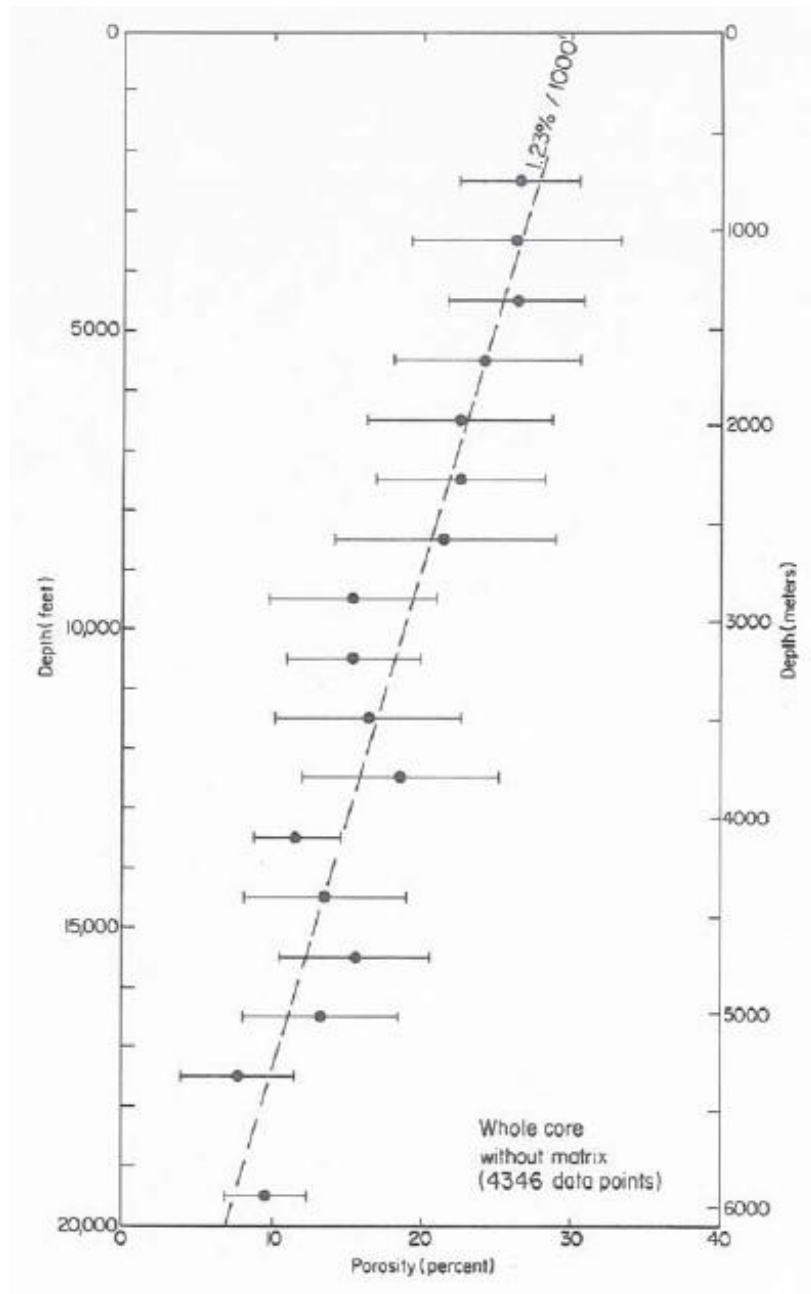


Εικόνα 8.2. Στο σχήμα παρουσιάζεται η ικανότητα ροής που δημιουργείται από τους πόρους που βρίσκονται σε επαφή. Αντίθετα οι ανεξάρτητοι πόροι δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον αναφορικά με την κυκλοφορία των ρευστών.

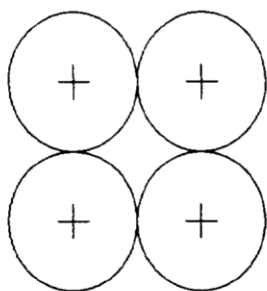
Εκτός από τον διαχωρισμό σε ολικό και ενεργό, το πορώδες μπορεί να διαχωριστεί σε δύο ακόμα κατηγορίες με βάση τις διαδικασίες που το δημιούργησαν. Αυτές οι κατηγορίες είναι το πρωτογενές, και το δευτερογενές πορώδες. Συνήθης περίπτωση δευτερογενούς πορώδους αποτελούν οι διακλάσεις, που είναι πολύ κοινές στα ανθρακικά πετρώματα. Το πρωτογενές

πορώδες δημιουργείται κατά την διαδικασία της απόθεσης των υλικών, ενώ το δευτερογενές δημιουργείται κατά την διαδικασία της διαγένεσης.

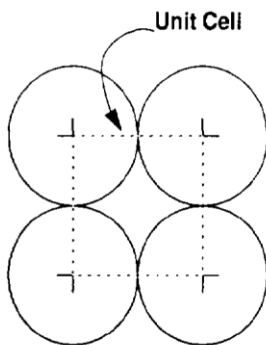
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα το πορώδες επηρεάζεται κυρίως από την ταξινόμηση των κόκκων και την διαδικασία της δολομιτώσης. Υπάρχουν όμως ορισμένοι πρόσθετοι παράγοντες που επιδρούν σε αυτό όπως, το βάθος, το περιβάλλον απόθεσης, η πίεση και η γεωμετρική τοποθέτηση των κόκκων. Σε μεγάλα βάθη και αυξημένες πιέσεις το πορώδες των σχηματισμών μειώνεται λόγω της συμπίεσης των κόκκων.



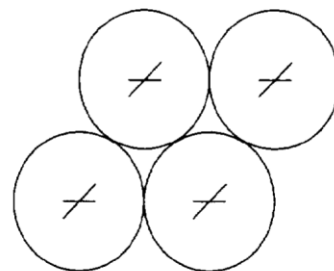
Διάγραμμα 8.3. Διάγραμμα που παρουσιάζει την σταδιακή μείωση του πορώδους των πετρωμάτων-ταμιευτήρων, με την ταυτόχρονη αύξηση του βάθους. Οι σχηματισμοί που εξετάστηκαν ήταν ψαμμίτες τριτογενούς ηλικίας, στον Κόλπο του Τέξας (Loucks et al, 1986).



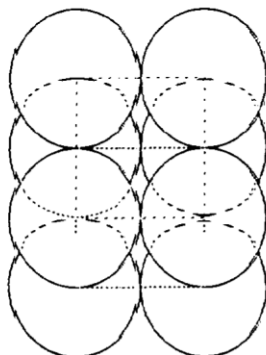
Single Square Layer



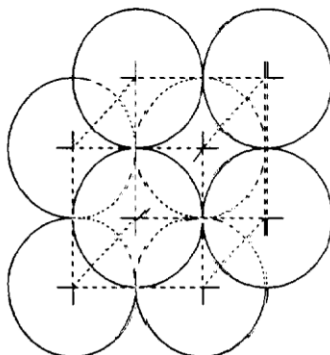
**Cubic-Double
Square Layers**
 $\phi = 47.6\%$



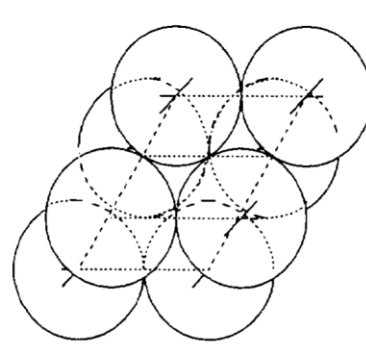
Single Rhombic Layer



Orthorhombic
 $\phi = 39.5\%$



Rhombohedral
 $\phi = 26\%$

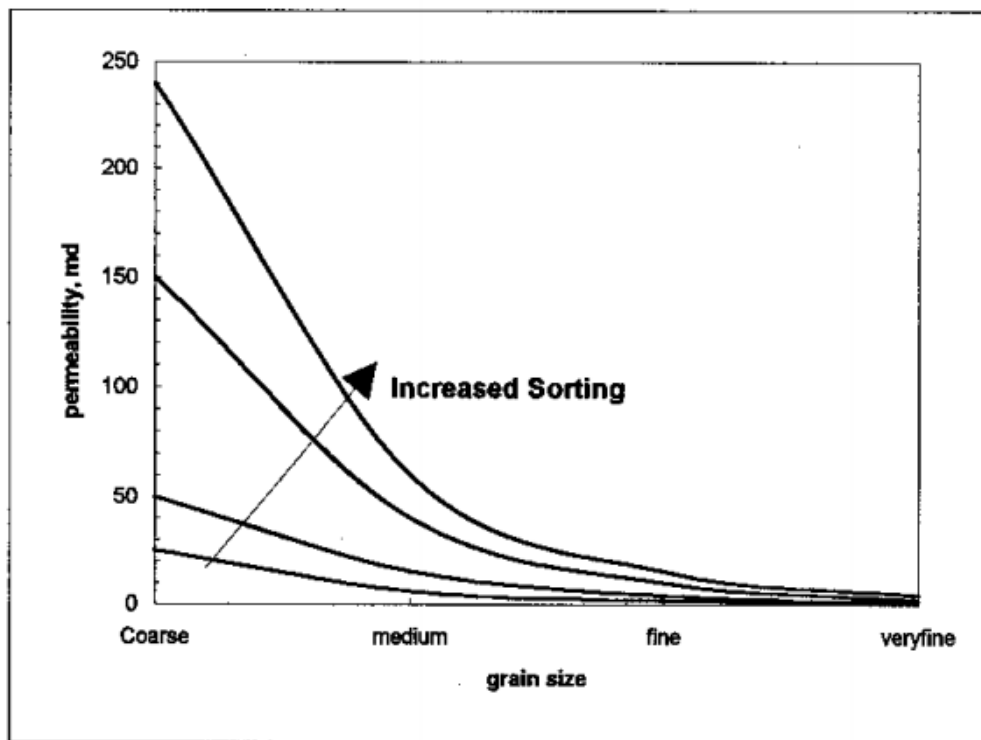


Tetragonal
 $\phi = 30.2\%$

Εικόνες 8.4. Εικόνες που παρουσιάζουν την διαφορά στο πορώδες , ανάλογα με την γεωμετρική τοποθέτηση των κόκκων. Το μέγιστο πορώδες ενός σχηματισμού επιτυγχάνεται όταν οι κόκκοι τοποθετηθούν σε ορθογωνική συμμετρία. URL: wiki.aapg.org/Porosity

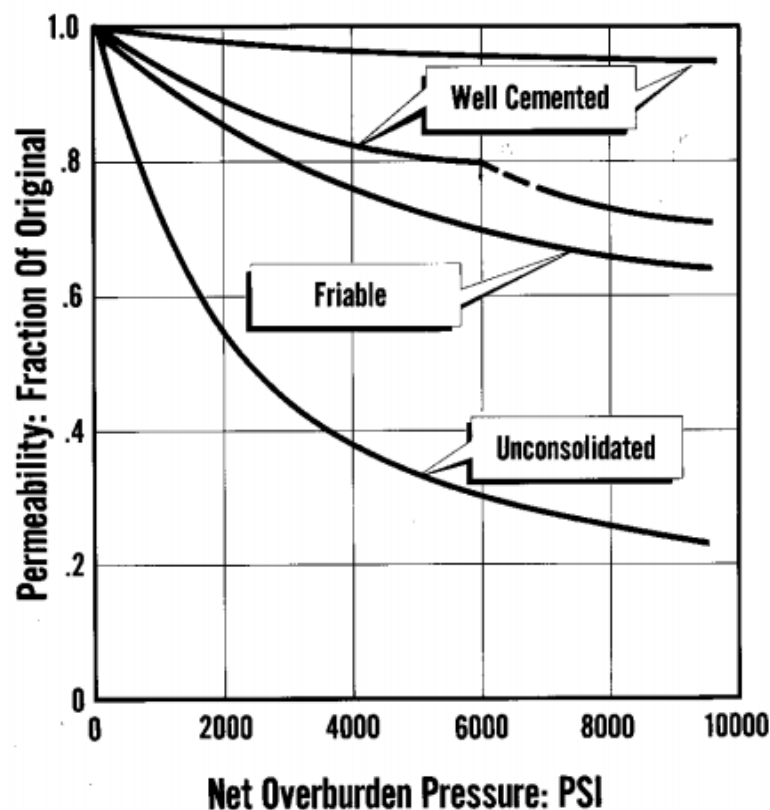
8.2. Διαπερατότητα

Το ποσοστό των κενών χώρων ενός σχηματισμού αναφέρεται στην ιδιότητα του πορώδους . Η ιδιότητα της διαπερατότητας εκφράζει την δυνατότητα ενός ρευστού να κινείται μέσα από τους πόρους του μέσου. Συμβολίζεται με το γράμμα k . Ο μαθηματικός υπολογισμός της διαπερατότητας γίνεται με την βοήθεια του Νόμου του Darcy, όπως αυτός είναι γνωστός από τον τομέα της Υδρογεωλογίας. Η μονάδα μέτρησης της διαπερατότητας είναι το Darcy, αν και στην πράξη το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι το milliDarcy. Η διαπερατότητα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των κόκκων του πετρώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η κοκκομετρία, τόσο υψηλότερες είναι οι τιμές της διαπερατότητας. Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην διαπερατότητα είναι η ταξινόμηση των κόκκων, η πίεση, η γεωμετρική τοποθέτηση, το βάθος και η ύπαρξη αδιαπέραστων από ρευστά στρωμάτων.



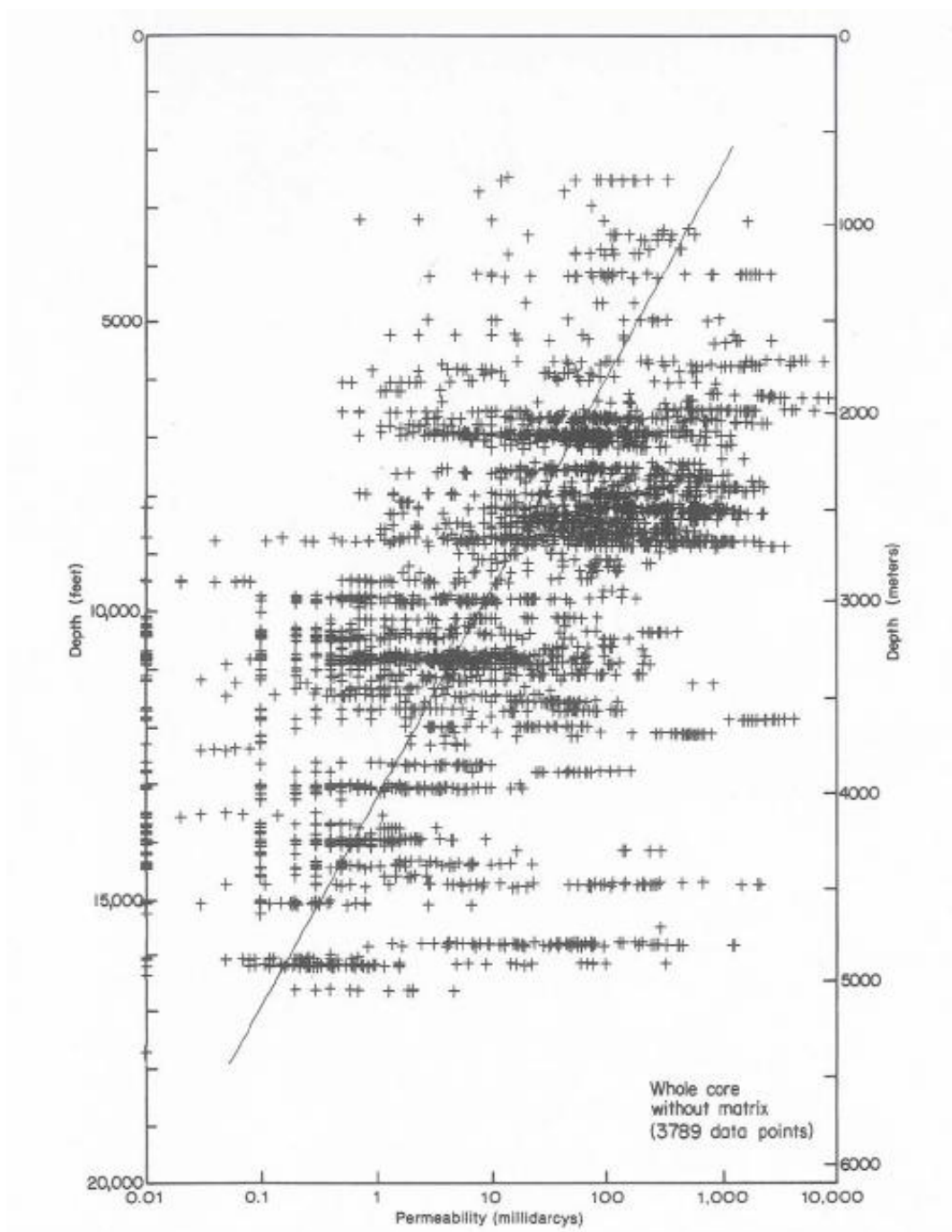
Διάγραμμα 8.5. Απεικόνιση της σχέσης της διαπερατότητας, με το μέγεθος των κόκκων ενός πετρώματος. URL: infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/PET524-2a-permeability.pdf

Η διαπερατότητα όπως αναφέρθηκε μειώνεται με την αύξηση της λιθοστατικής πίεσης. Εάν ένα πέτρωμα είναι ήδη συμπαγοποιημένο, τότε θα υποστεί μικρότερη ελάττωση της διαπερατότητας του, συγκριτικά με ένα υλικό, όμοιας κοκκομετρίας και σύστασης, με χαμηλότερο ποσοστό συμπαγοποίησης.



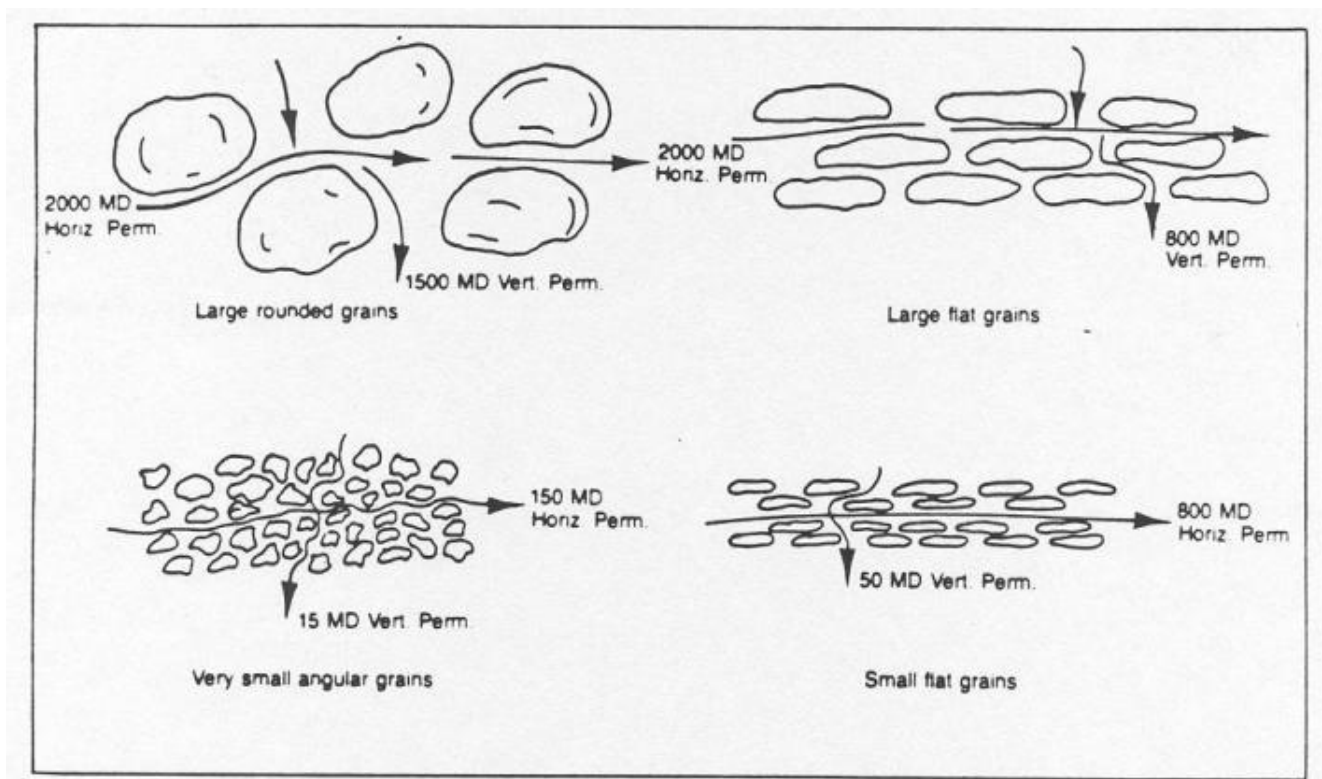
Διάγραμμα 8.6. Απεικόνιση της σχέσης της διαπερατότητας, με την αύξηση της λιθοστατικής πίεσης. URL: infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/PET524-2a-permeability.pdf

Η διαπερατότητα διαφέρει από το πορώδες στο γεγονός ότι δεν είναι μια στατική ιδιότητα. Δηλαδή η τιμή της δεν είναι σταθερή για έναν συγκεκριμένο όγκο, όπως το πορώδες, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την κατεύθυνση της μέτρησης. Τυπικό παράδειγμα αυτού του φαινομένου αποτελεί ένα πέτρωμα πλούσιο σε φυλλώδη ορυκτά. Αυτά τα ορυκτά, αν έχουν τοποθετηθεί με την πλατύτερη τους επιφάνεια παράλληλα στην στρώση του πετρώματος, θα δημιουργούν ένα υδατοστεγανό στρώμα κάθετα σε αυτήν. Αντιθέτως, η ροή παραμένει ανεπηρέαστη παράλληλα στην στρώση.



Διάγραμμα 8.7. Διάγραμμα που παρουσιάζει την σταδιακή μείωση της διαπερατότητας των πετρωμάτων-ταμιευτήρων, με την ταυτόχρονη αύξηση του βάθους. Οι σχηματισμοί που εξετάστηκαν ήταν ψαμμίτες τριτογενούς ηλικίας, στον Κόλπο του Τέξας (Loucks et al, 1986).

Η τοποθέτηση δηλαδή των ορυκτών μπορεί να μειώνει την διαπερατότητα σε μια κατεύθυνση, και να την αυξάνει σε μία άλλη. Και στις δύο περιπτώσεις όμως ο όγκος των πόρων (το πορώδες) είναι ο ίδιος.



Εικόνα 8.8. Σχηματική απεικόνιση της διαφοράς της διαπερατότητας, ανάλογα με την κατεύθυνση κίνησης των ρευστών. URL: infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/PET524-2a-permeability.pdf

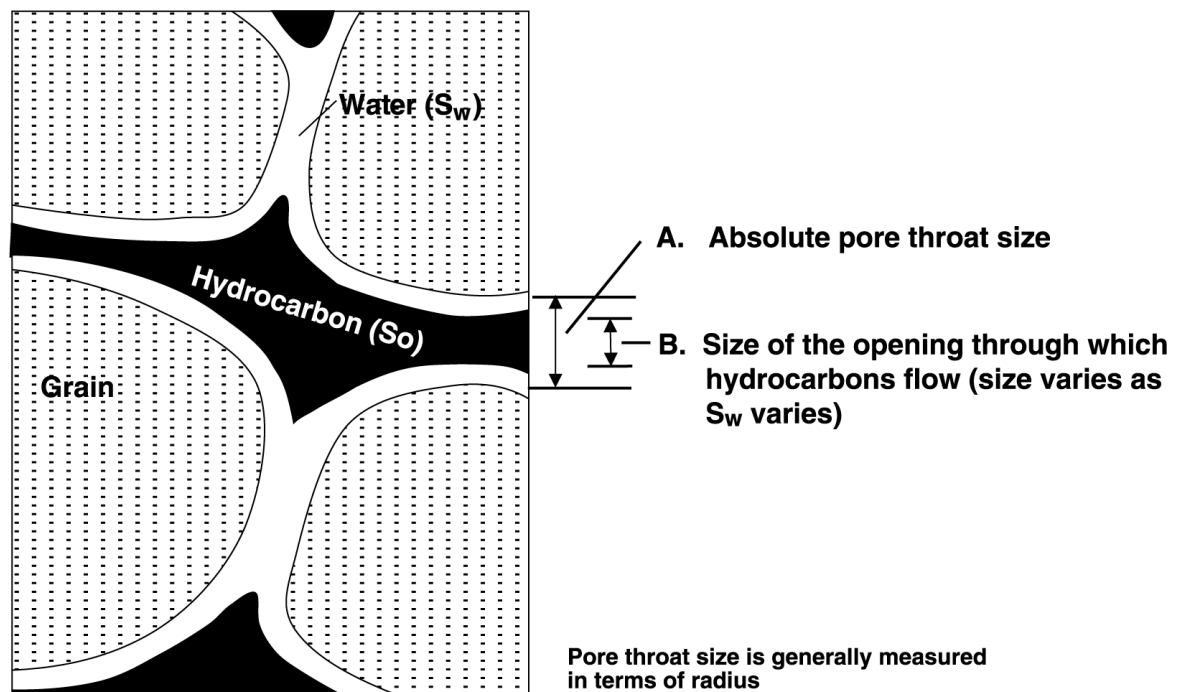
Εάν συνυπάρχουν διαφορετικές ρευστές φάσεις σε ένα ταμιευτήρα, και αυτές κινούνται ταυτόχρονα στην ίδια κατεύθυνση, τότε επηρεάζουν η μια την ροή της άλλης. Με βάση αυτή τη διαπίστωση η διαπερατότητα μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες. Οι παρακάτω ορισμοί προέρχονται από το λεξικό γεωλογικών-κοιτασματολογικών όρων της εταιρείας Schlumberger, glossary.oilfield.slb.com

Απόλυτη Διαπερατότητα (Absolute Permeability): " Η μέτρηση της διαπερατότητας, ή της ικανότητας μεταφοράς ρευστών μέσα σε ένα πέτρωμα, όταν είναι παρούσα μόνο μια ρευστή φάση. Το σύμβολο της απόλυτης διαπερατότητας είναι το γράμμα k , και η μονάδα μέτρησης τα Darcy. "

Ενεργή Διαπερατότητα (Effective Permeability): " Η ικανότητα, της κατά προτίμησης κυκλοφορίας ενός συγκεκριμένου ρευστού, όταν άλλες ξεχωριστές ρευστές φάσεις είναι παρούσες στον ταμιευτήρα. Για παράδειγμα η ενεργή διαπερατότητα του φυσικού αερίου, σε έναν ταμιευτήρα φυσικού αερίου-νερού. Η ενεργή διαπερατότητα εξαρτάται από τις αναλογίες των ρευστών, και από την γεωλογική φύση του πετρώματος. "

Σχετική Διαπερατότητα (Relative Permeability): " Μια αδιάστατη έννοια, που δημιουργήθηκε για να προσαρμοστεί η εξίσωση Darcy σε συνθήκες πολυφασικής κυκλοφορίας ρευστών. Η σχετική διαπερατότητα ορίζεται ως ο λόγος της ενεργής διαπερατότητας μιας συγκεκριμένης φάσης, σε συγκεκριμένη αναλογία, προς την απόλυτη διαπερατότητα της φάσης. Ο υπολογισμός της σχετικής διαπερατότητας επιτρέπει την σύγκριση της συμπεριφοράς των ρευστών με την ταυτόχρονη παρουσία άλλων φάσεων. " Εάν μόνο μια φάση είναι παρούσα, τότε η σχετική διαπερατότητα ισούται με 1,0, γιατί η ενεργή διαπερατότητα ταυτίζεται με την απόλυτη. Σε κάθε άλλη περίπτωση η τιμή της είναι μικρότερη του 1,0 και μεγαλύτερη του 0.

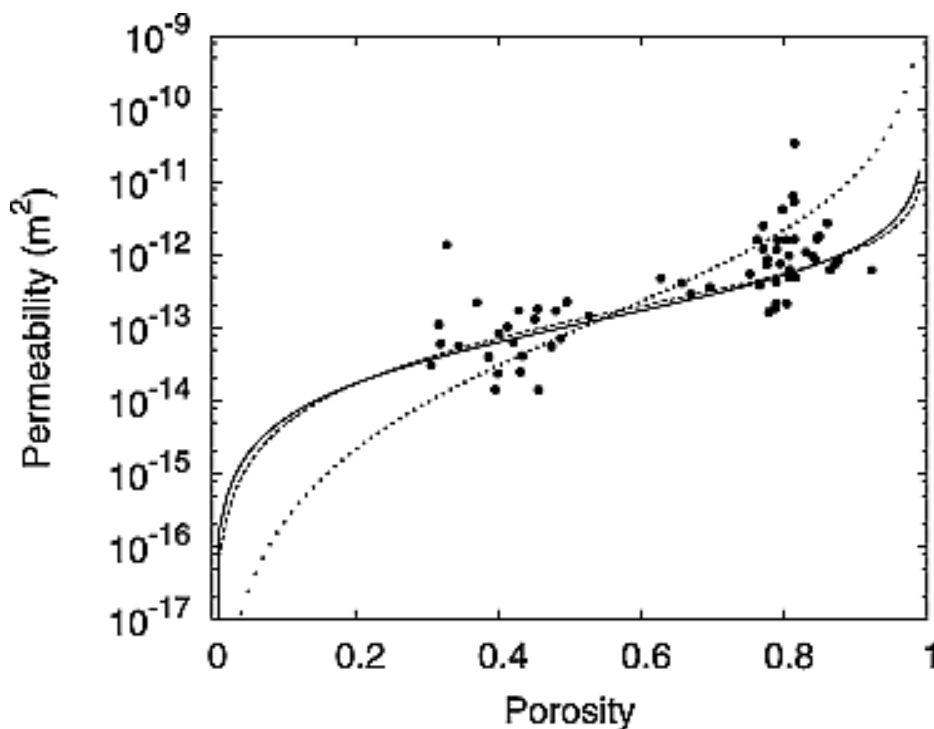
Την σχετική διαπερατότητα επηρεάζει η πίεση και η διαβρεξιμότητα (wettability) των κόκκων. Οι κόκκοι του ταμιευτήρα μπορούν να είναι water-wet, oil-wet ή μια ενδιάμεση κατάσταση ανάλογα με τη ρευστή φάση που τους επικαλύπτει.



Εικόνα 8.9. Σκίτσο που παρουσιάζει κόκκους, οι οποίοι είναι επικαλυμμένοι με νερό, να μειώνουν την δυνατότητα παροχής σε υδρογοναθρακες. URL: wiki.aapg.org/Relative_permeability

8.3. Σχέση Διαπερατότητας - Πορώδους

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαπερατότητα αποτελεί μια δυναμική ιδιότητα, ενώ το πορώδες μια στατική. Και οι δύο όμως αφορούν τον ίδιο χώρο και πόρους. Συνεπώς η μια ιδιότητα βρίσκεται σε κάποια συγγένεια με την άλλη, σε μικρότερο η μεγαλύτερο βαθμό. Με την βοήθεια μαθηματικών οι Kozeny και Carmer οδηγήθηκαν σε μια συνάρτηση, η οποία με την χρήση μεταβλητών και σταθερών, συνδέει ικανοποιητικά τις δύο ιδιότητες, επιτρέποντας σε έναν βαθμό την εκτίμησή τους. Η προσέγγισή τους ονομάζεται Kozeny-Carmen Relationship. Παρόμοιες μέθοδοι, ή βελτιώσεις της συνάρτησης Kozeny-Carmen αναπτύχθηκαν από άλλους μαθηματικούς, μηχανικούς και γεωλόγους οι οποίοι εισήγαγαν νέες μεταβλητές και πλήθος εμπειρικών σταθερών (Nelson, 1994).



Διάγραμμα 8.10. Διάγραμμα που παρουσιάζει την διαπερατότητα σε συνάρτηση με το πορώδες σε σχηματισμούς κίσσηρης. Η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε διαφορετική προσεγγιστική συνάρτηση, (Costa, 2006).



Κεφάλαιο 9. Βιβλιογραφία

Αναφορές Κεφαλαίου 1, Εισαγωγικό Κείμενο

Βιβλία

Pyrzcz, M. J., Deutsch, C. V. (2014). Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, Oxford, England, United Kingdom.

Ringrose, P. Bentley, M. (2015). Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide 2015 Edition, Springer Science+Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany.

Slatt, R. M. (2007). Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists and Engineers, Handbook of Petroleum Exploration and Production, Volume 6, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

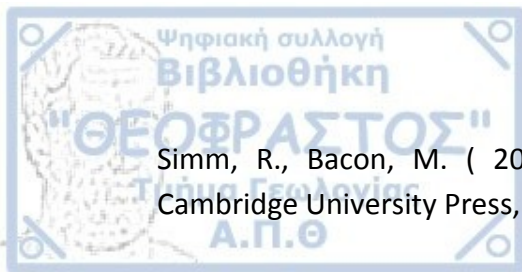
Slatt, R. M. (2013). Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers, Origin, Recognition, Initiation, and Reservoir Quality, Volume 61, 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Εργασίες – Δημοσιεύσεις

Overeem, I. (2008). Geological Modeling: Deterministic and Stochastic Models, University of Colorado at Boulder.

Αναφορές Κεφαλαίου 2, Σεισμικά Δεδομένα

Catuneanu, O. (2006). Principles of Sequence Stratigraphy, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.



Simm, R., Bacon, M. (2014). Seismic Amplitude, An Interpreter's Handbook, Cambridge University Press, New York.

Slatt, R. M. (2006). Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers, 1st Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Εργασίες - Δημοσιεύσεις

Brown, A. R. Interpretation of Three – Dimensional Seismic Data, 6th Edition, *American Association of Petroleum Geologists Memoir 42, SEG investigations in Geophysics*, No. 9

Brown, A. R., Abriel, W., L., (2014), Detection of hydrocarbons using non-bright-spot seismic techniques, *Interpretation*, Vol. 2, No. 4, SP41–SP44

Singh, D., Kumar, P. C., Sain, K., (2016). Interpretation of gas chimney from seismic data using artificial neural network: A study from Maari 3D prospect in the Taranaki basin, New Zealand, *Elsevier Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 36, Part A, pp. 339 – 357.

Αναφορές Κεφαλαίου 3, Sequence Stratigraphy

Βιβλία

Bates, R. L., Jackson, J. A. (Eds.), (1987). *Glossary of Geology*, 3rd Ed., American Geological Institute, Alexandria, Virginia, p. 788.

Catuneanu, O. (2006). Principles of Sequence Stratigraphy, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Coe, A. L., (2003). The Sedimentary Record of Sea-Level Change. Cambridge University Press, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom.

Emery, D., Myers, K., (1996). Sequence Stratigraphy, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.



Miall, D. A., (2010). The Geology of Stratigraphic Surfaces, 2nd Ed., Springer Science + Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany.

Slatt, R. M., (2006). Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers, 1st Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Εργασίες – Δημοσιεύσεις

Brown, L. F. Jr., Fisher, W. L. (1977). Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull apart basins. In Seismic Stratigraphy–Applications to Hydrocarbon Exploration (C. E. Payton, Ed.), pp. 213–248. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* **26**.

Catuneanu, O. (2002). Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls. *Geological Society of Africa Presidential Review*, No. **1**, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, 1-26 Earth Sciences Building, Edmonton, Alta., Canada T6G 2E3.

Catuneanu O., Abreu V., Bhattacharya J.P., Blum M.D., Dalrymple R.W., Eriksson P.G., Fielding C.R., Fisher W.L., Galloway W.E., Gibling M.R., Giles K.A., Holbrook J.M., Jordan R., Kendall C.G.St.C., Macurda B., Martinsen O.J., Miall A.D., Neal J.E., Nummedal D., Pomar L., Posamentier H.W., Pratt B.R., Sarg J.F., Shanley K.W., Steel R.J., Strasser A., Tucker M.E., Winker C. (2009). Towards the standardization of sequence Stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, Vol. **92**, pp1-33.

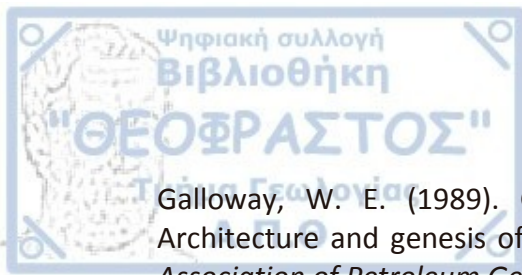
Catuneanu, O., Galloway, W. E., Kendall, C. G. St. C., Miall, A. D., Posamentier H. W., Strasser, A., Tucker M. E. (2011). *Newsletters on Stratigraphy*, Vol. **44/3**, pp. 173–245 Article, Stuttgart, November 2011.

Cross, T. A. (1991). High-resolution stratigraphic correlation from the perspectives of base-level cycles and sediment accommodation. In Unconformity Related Hydrocarbon Exploration and Accumulation in Clastic and Carbonate Settings (J. Dolson, Ed.), pp. 28–41. *Rocky Mountain Association of Geologists, Short Course Notes*.

Embry, A. F., Catuneanu, O. (2002). Practical Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications. *Canadian Society of Petroleum Geologists, Short Course Notes*.

Embry, A.F., Johannessen, E., Owen, D.E., Beauchamp, B., Gianolla, P. (2007). Sequence Stratigraphy as a “Concrete” Stratigraphic Discipline Report of the ISSC Task Group on Sequence Stratigraphy.

Embry, A.F. (2009). Practical Sequence Stratigraphy, *Canadian Society of Petroleum Geologists*.



Galloway, W. E. (1989). Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. **73**.

Hunt, D., Tucker, M. E. (1992). Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base level fall. *Sedimentary Geology*, Vol. **81**, pp. 1–9.

Jervey, M. T. (1988). Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In *Sea Level Changes—An Integrated Approach* (C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. St.C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross and J. C. Van Wagoner, Eds.), pp. 47–69. SEPM Special Publication **42**.

Mitchum, R. M., Jr. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. In *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration* (C. E. Payton, Ed.), *American Association of Petroleum Geologists Memoir* **26**, pp. 205–212

Posamentier, H. W., Allen, G. P., James, D. P., and Tesson, M. (1992b). Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. **76**, pp. 1687–1709.

Qayyum F., De Groot P., Hemstra N., Catuneanu O. (2014). 4D Wheeler diagrams: concept and applications. *Geological Society*, London, Special Publications, Vol. **404**, 223-232.

Wilgus C. K., Hastings B. S., Posamentier H., Wagoner J. V., Ross C. A., Kendall C. G. St. C, (1988). Sea-Level Changes: An Integrated Approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, Vol. **42**

Ηλεκτρονικές Πηγές

URL: www.sepmstrata.org/

URL: strata.uga.edu/

URL: wiki.aapg.org



Αναφορές Κεφαλαίου 4, Τύποι Ταμιευτήρων

Βιβλία

Catuneanu, O. (2006). Principles of Sequence Stratigraphy, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. Chapter 5

Lucia, J. F. (2007). Carbonate Reservoir Characterization, An Integrated Approach, 2nd Edition, Springer Science+Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany. Chapters 6 – 7

Miall, D. A., (2010). The Geology of Stratigraphic Surfaces, 2nd Ed., Springer Science + Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany.

Pyrz, M. J., Deutsch, C. V. (2014). Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, Oxford, England, United Kingdom. Chapter 4

Ringrose, P., Bentley, M. (2015). Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide 2015 Edition, Springer Science+Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany. Chapter 6

Slatt, R. M. (2013). Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers, Origin, Recognition, Initiation, and Reservoir Quality, Volume **61**, 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. Chapters 7 - 11

Εργασίες - Δημοσιεύσεις

Grecula, M., Hognestad, J., Price, S., McGarva R. (2014). Interplay of fan-fringe reservoir deterioration and hydrodynamic aquifer: Understanding the margins of gas development in the Ormen Lange Field. *Geological Society Special Publications*, London.

Fryberger, S. G. (2013) Stratigraphic aspects of the Tensleep play of Wyoming, Steven G. Fryberger, The Permian Hyatt Ranch Member of the Tensleep Formation, The 7th Annual Wyoming CO₂ Conference – 2013.

Ηλεκτρονικές Πηγές



URL: wiki.aapg.org/Braided_fluvial_reservoirs

URL: wiki.aapg.org/Carbonate_reservoir

URL : wiki.aapg.org/Deep-water_marine_reservoirs

URL: wiki.aapg.org/Eolian_reservoirs

URL : wiki.aapg.org/Meandering_fluvial_reservoirs

Αναφορές Κεφαλαίων 5, Γενικές Έννοιες Γεωστατιστικής

Βιβλία

Gluyas J., Swarbrick R. (2004). Petroleum Geoscience, Blackwell Publishing Company, Hoboken, New Jersey. Chapters 1.5, 1.7

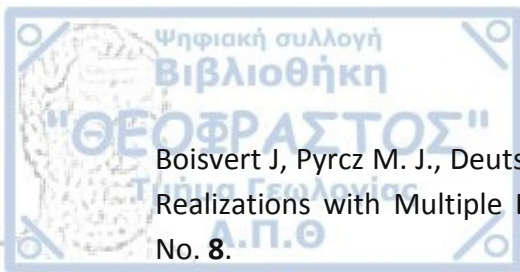
Ringrose P., Bentley M. (2015). Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide 2015 Edition, Springer Science+Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany. Chapters 1.1 – 1.9, 2.5 – 2.8, 3,4.

Pyrz M. J., Deutsch C. V. (2014). Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, Oxford, England, United Kingdom. Chapters 1.4, 1.5, 2.2 -2.4

Εργασίες - Δημοσιεύσεις

Παπαδοπούλου Ε. Β. (2014). Χρήση ντετερμινιστικών και γεωστατιστικών μεθόδων παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών ισόσειστων καμπύλων σε περιβάλλον GIS. Εφαρμογή σε δεδομένα ισχυρών σεισμών του ελλαδικού χώρου. *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Bohlin G. (2005). Introduction to geostatistic and variogram analysis. Chemical and Petroleum Engineering, *Kansas Geological Survey, Short Course 940*.



Boisvert J, Pyrcz M. J., Deutsch C. V. (2006). Choosing Training Images and Checking Realizations with Multiple Point Statistics, Centre for Computational Geostatistics, No. **8**.

Deutsch C. V., Tran T. T. (2001). FLUVSIM: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems, *Computers & Geosciences*, Vol. **26**, Issue. 4.

Glacken I., Blackney P., Snowden Associates (1998). A practitioners implementation of indicator Kriging, *Beyond Ordinary Kriging Symposium*, 1998.

Hassanpour R. M., Deutsch C. V. (2010). An Introduction to Grid Free Object based Facies Modeling, *CCG Annual Report 12*, Paper **107**.

He X. L., Sonnenborg T. O., Jørgensen F. and Jensen K. H. (2014). The effect of training image and secondary data integration with multiple-point geostatistics in groundwater modeling, *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**, 2943-2954

Kessler T., Klint K. E., Renard P., Comunian A., Nilsson B. and Bjerg P. L., Multiple-point statistical approach to model geological heterogeneity. *Geological Survey of Denmark and Greenland*, Technical University of Denmark.

Majani B. S. (2007). Analysis of External Drift Kriging Algorithm with application to precipitation estimation in complex orography, *Thesis submitted to International Institute for Geo-information Science and Earth Observation*.

Meerschman E., Pirot G, Mariethoz G, Straubhaar J., Van Meirvenne M. and Renard P. (2012). A practical guide to performing multiple-point statistical simulations with the Direct Sampling algorithm, *Computers & Geosciences*, Vol. **52**.

Seifert D., Jensen J. L. (2000). Object and Pixel-Based Reservoir Modeling of a Braided Fluvial Reservoir. *Mathematical Geology*, Vol. **32**, No. **5**, 2000.

Van den Boogaart K. G. (2006). Some theory for Multiple Point Statistics: Fitting, checking and optimally exploiting the training image. Institute for Mathematics and Informatics, Greifswald University, Germany.

Ηλεκτρονικές Πηγές

URL: petrowiki.org/Kriging_and_cokriging



URL: petrowiki.org/Geostatistical_conditional_simulation

URL: petrowiki.org/Probability_and_uncertainty_analysis

URL: petrowiki.org/Geostatistical_reservoir_modeling

Αναφορές Κεφαλαίων 6, Ο στόχος του μοντέλου

Βιβλία

Ringrose P., Bentley M. (2015). Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide 2015 Edition, Springer Science+Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany. Chapters 1.1 – 1.9, 2.5 – 2.8, 3,4.

Pyrcz M. J., Deutsch C. V. (2014). Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, Oxford, England, United Kingdom. Chapters 1.4, 1.5, 2.2 -2.4

Εργασίες - Δημοσιεύσεις

Overeem I. (2008). Geological Modeling: Deterministic and Stochastic Models, University of Colorado at Boulder.

Αναφορές Κεφαλαίου 7 & 8, Rock Model & Property Model

Βιβλία

Buryakovsky L., Eremenko N.A., Gorfunkel M.V. and Chilingarian G.V., (2005). Geology and Geochemistry of Oil and Gas, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. Chapter 3.

Gluyas J., Swarbrick R. (2004). Petroleum Geoscience, Blackwell Publishing Company, Hoboken, New Jersey. Chapters 1.5.8 – 1.5.10

Pyrcz M. J., Deutsch C. V. (2014). Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, Oxford, England, United Kingdom. Chapters 4.6



Ringrose P., Bentley M. (2015). Reservoir Model Design: A Practitioner's Guide 2015 Edition, Springer Science+Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany. Chapters 3.2, 3.6, 3.7

Εργασίες - Δημοσιεύσεις

Costa A. (2006). Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption. *Geophysical Research Letters*, Vol. **33**, L02318

Ehrenberg S. N., Eberli G. P., Keramati M., Moallemi S. A. (2006). Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs. *AAPG Bullerlin*, Vol. **90**(1), pp 91-114

Loucks R. G., Dogde M., M., Galloway W., E. (1986). Controls on Porosity and Permeability of Hydrocarbon Reservoirs in Lower Tertiary Sandstones along the Texas Gulf Coast, *The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology*, Report of Investigations No. **149**, pp 78

Nelson P. H. (1994). Permeability – Porosity Relationships in Sedimentary Rocks. *Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts*, Vol. **35**, Issue 03

Souche L., Iskenova G., Lepage F., Desmarest D. (2014). Construction of Structurally and Stratigraphically Consistent Structural Models Using the Volume-Based Modelling Technology: Applications to an Australian Dataset. *International Petroleum Technology Conference, Conference Paper*.

Ηλεκτρονικές Πηγές

URL: infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/

URL: wiki.aapg.org/Permeability

URL: wiki.aapg.org/Porosity

URL: wiki.aapg.org/Wettability

URL: wiki.aapg.org/Relative_permeability_and_pore_type



URL: petrowiki.org/Rock_density_and_porosity