



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Χ. Α. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ



**ΑΛΛΑΓΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ - ΑΥΞΗΣΗ
ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ - ΔΙΑΒΡΩΣΗ
ΤΩΝ ΑΚΤΩΝ**

ΕΠΙΒΛΕΤΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. Θ. ΚΑΡΑΜΠΑΣ

ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Α. ΛΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Θ.

Ν. ΜΥΛΟΠΟΥΛΟΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ 2002



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 598/1
Ημερ. Εισ.: 08-03-2004
Δωρεά:
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΠΜ
2002
ΚΑΡ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072534

Η εργασία αυτή αφιερώνεται
στους γονείς μου.

Ευχαριστίες

Θεωρώ χρέος μου από τη θέση αυτή να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Θ. Καραμπά, για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλλε και για την άφογη συνεργασία που είχαμε τόσο κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής αυτής εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ τους σεβαστούς μου καθηγητές για τις γνώσεις και τον τρόπο σκέψης που μου μετέδωσαν. Θα θυμάμαι πάντα την αγωνία τους για την ανάπτυξη του Τμήματος και την προσπάθειά τους για την παροχή υψηλού επιπέδου εκπαίδευσης. Ευχαριστώ τους καθηγητές Α. Λιακόπουλο και Ν. Μυλόπουλο που με τίμησαν με την παρουσία τους στην τριμελή επιτροπή. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και πολύ καλούς μου φίλους για τη συμπαράσταση και βοήθεια που μου προσέφεραν Ευγενίου Αγάθη, Λασπά Ευαγγελία, Κουφάκη Μιχάλη, Σοφία Πέππα και Μιχαηλίδου Νένα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης και τη Γραμματεία του Τμήματος που δεν ήταν απλά εκεί για τη γραμματειακή δουλειά, αλλά πολλές φορές έπαιξε και το ρόλο της οικογένειας, που για εμάς ήταν μακριά.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου, στην Ελλάδα, που στάθηκε δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους γονείς μου, στους οποίους αφιερώνεται αυτή η εργασία, που αν και μακριά, δεν σταμάτησαν να είναι το σημείο αναφοράς μου.

Χρήστος Α. Καραγιάννης

Βόλος, Σεπτέμβριος 2002

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο	1
1. Αλλαγή του Κλίματος	
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Αύξηση της Θερμοκρασίας.....	6
1.3 Τα Αποτελέσματα της Αύξησης της Θερμοκρασίας του Πλανήτη.....	11
Κεφάλαιο 2 ^ο	13
2. Αύξηση της Στάθμης της Θάλασσας	
2.1 Η αύξηση της Στάθμης της Θάλασσας – Αποτέλεσμα της Αύξησης της Θερμοκρασίας	13
2.2 Θερμική Διαστολή Ωκεανών.....	15
2.3 Λιώσιμο των Πάγων.....	17
2.4 Ανθρωπογενής Επεμβάσεις στον Κύκλο του νερού.....	21
2.5 Πρόγνωση Αύξησης της Στάθμης της Θάλασσας για τον 21 ^ο Αιώνα.....	23
2.6 Πρόγνωση Αύξησης της Στάθμης της Θάλασσας σε Μακρά Διάρκεια...26	
Κεφάλαιο 3 ^ο	31
3. Τα Αποτελέσματα της Αύξησης της Στάθμης της Θάλασσας	
3.1 Κοινωνικοοικονομικά Αποτελέσματα.....	31
3.2 Επιπτώσεις σε Τοπικό Επίπεδο.....	34
3.2.1 Ευρώπη.....	34
3.2.2 Αφρική.....	35
3.2.3 Νότια, Νοτιοανατολική και Ανατολική Ασία.....	38
3.2.4 Μικρά Νησιωτικά Κράτη.....	41

3.3	Επιπτώσεις στο Περιβάλλον.....	44
3.3.1	<i>Δέλτα Ποταμών.....</i>	<i>44</i>
3.3.2	<i>Παράκτιοι Υδροβιότοποι.....</i>	<i>45</i>
3.3.3	<i>Κοραλλιογενείς Ύφαλοι.....</i>	<i>47</i>
3.3.4	<i>Διάβρωση Ακτών.....</i>	<i>48</i>

Κεφάλαιο 4^ο50

4. Διαδικασία Διάβρωσης των Ακτών – Γενικά

4.1	Εισαγωγή.....	50
4.2	Φυσική Περιγραφή των Μηχανισμών Μεταφοράς Φερτών Υλών στον Παράκτιο Χώρο.....	50
4.3	Μεταφορά Υλών Εγκάρσια στην Ακτή.....	56
4.4	Μεταφορά Υλών Παράλληλα στην Ακτή.....	59
4.5	Ισοζύγιο Φερτών Υλών.....	60
4.6	Αλληλεπίδραση Ακτών – Παράκτιων Έργων.....	65
4.7	Έργα προστασίας Ακτών.....	70
4.8	Φωτογραφίες Ακτών Πριν και Μετά την Εφαρμογή Μέτρων Προστασίας της Ακτής.....	71

Κεφάλαιο 5^ο74

5. Διάβρωση Ακτών Λόγω της Αύξησης της Στάθμης της Θάλασσας – Κανόνας του Brunn

5.1	Εισαγωγή.....	74
5.2	Μαθηματική Έκφραση του Κανόνα του Brunn.....	75
5.3	Πρακτική Απόδειξη του Κανόνα του Brunn και Περιορισμοί στις Οριακές Συνθήκες.....	77
5.4	Πιστοποίηση του Κανόνα του Brunn.....	84
5.4.1	<i>Μοντέλα πρόγνωσης Ακτογραμμής.....</i>	<i>84</i>

5.4.2	Περίπτωση της Ακτής Niigata στην Ιαπωνία.....	85
5.4.3	Τοπογραφικές Μελέτες στην Περιοχή.....	86
5.4.4	Διαδικασία Πιστοποίησης.....	87
5.4.5	Υποχώρηση της Ακτογραμμής.....	88
5.4.6	Νέα Προσέγγιση στην Εκτίμηση της Υποχώρησης Ακτογραμμής.....	88
5.5	Κοραλλιογενείς Ύφαλοι και Προστασία των Ακτών.....	90

Κεφάλαιο 6^ο94

6. Μοντέλο πρόγνωσης υποχώρησης της ακτογραμμής

6.1	Κυματικό Μοντέλο.....	94
6.2	Υπομοντέλο Εκτίμησης Στερεομεταφοράς.....	99
6.3	Υπομοντέλο Μεταβολής Μορφολογίας Πυθμένα.....	102
6.4	Μέθοδος Εκτίμησης Υποχώρησης της Ακτογραμμής.....	103

Συμπεράσματα..... 108

Παράρτημα..... 110

Βιβλιογραφία.....118



1. ΑΛΛΑΓΗ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πλανήτης μας, μάλλον μεσήλικας τώρα, έχει συνηθίσει στις αλλαγές. Στο παρελθόν, η γη άλλαξε ατμόσφαιρα, το κλίμα άλλαξε επίσης, διανύοντας περιόδους παγετώνων και περιόδους με υψηλές θερμοκρασίες, ακόμη και οι θέσεις των ηπείρων δεν έμειναν σταθερές άλλαξαν και αλλάζουν και αυτές. Τα πάντα μεταβάλλονται διαρκώς και τίποτε Δε μένει σταθερό, όπως υποστηρίζει και ο Ηράκλειτος.

Από τη μυθολογία ξέρουμε για καταστροφικά φαινόμενα όπως τον κατακλυσμό του Δευκαλίωνα και του Νώε αλλά και αλλαγές για παράδειγμα στο κλίμα όπως τις περιγράφει ο Αριστοτέλης. Στις νεότερες περιόδους αυτές οι κλιματικές αλλαγές δεν σταμάτησαν και είναι πρόσφατο το παράδειγμα της μικρής παγετώδους εποχής που άρχισε τον Μεσαίωνα και τελείωσε σε μερικές περιοχές τον 19^ο αιώνα.

Όλες όμως οι προαναφερθείσες αλλαγές οφείλονται κυρίως σε φυσικά και άλλα εξωγενή αίτια και όχι στον ανθρώπινο παράγοντα. Η γη στα πρώτα στάδια της δημιουργίας της ήταν ένας πλανήτης με πολύ υψηλή θερμοκρασία και με ατμόσφαιρα όπως αυτή του γενεσιουργού της άστρου του Ήλιου. Η ατμόσφαιρα της γης που αποτελούνταν τότε κυρίως από ήλιο και υδρογόνο, και στην πορεία αντικαταστάθηκε μέσα σε εκατομμύρια χρόνια εξέλιξης, από μία ατμόσφαιρα με οξυγόνο, που προήλθε από τα έγκατα της γης. Η ατμόσφαιρα αυτή είχε μια χαρακτηριστική οσμή όπως αυτή που υπάρχει κοντά σε θερμές πηγές και ηφαιστεια. Η ατμόσφαιρα αυτή ονομάζεται αναγωγική.

Η εμφάνιση της ζωής στον πλανήτη, πριν από 2-3 δισεκατομμύρια χρόνια συσώρευσε οξυγόνο στην ατμόσφαιρα και από αναγωγική μετατράπηκε σε οξειδωτική, της οποίας είναι χαρακτηριστική ιδιότητά να οξειδώνει μέταλλα και οργανικά υλικά. Σε αυτή την ατμόσφαιρα έγιναν όλες οι πλανητικές αλλαγές του παρελθόντος που προαναφέρθηκαν, από τις



βιβλικές καταστροφές μέχρι την μικρή παγετώδη περίοδο, τα τελευταία χρόνια.

Ο 20ός αιώνας σηματοδοτεί την έναρξη μιας νέας περιόδου στην ιστορία της γης. Η αχαλίνωτη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και η χωρίς όρια εκμετάλλευση του φυσικού περιβάλλοντος από τον άνθρωπο, αποτελούν σκληρή πραγματικότητα. Είναι η περίοδος του εύκολου κέρδους, η περίοδος που η υλική ευημερία γίνεται αυτοσκοπός για τον άνθρωπο. Στο όνομα της οικονομικής ανάπτυξης γίνονται εγκλήματα κατά του περιβάλλοντος χωρίς φραγμούς και ενοχές. Για το περιβάλλον, που οι αρχαίοι Έλληνες το αγάπησαν και το λάτρεψαν δίνοντας του μορφές θεοτήτων, κανείς δεν ενδιαφέρεται. Μοναδικό στόχο αποτελούν η οικονομική ανάπτυξη και η ευημερία των αριθμών.

Όταν, μετά τον Β' παγκόσμιο πόλεμο πεθαίνουν μερικές εκατοντάδες άνθρωποι από το νέφος αιθαλομίχλης στο Λονδίνο, λαμβάνονται, κάτω από πανικό, μέτρα αντιμετώπισης. Έτσι εισάγεται η «Δράση του καθαρού αέρα» στο βρετανικό κοινοβούλιο. Η δεύτερη φορά που η μόλυνση της ατμόσφαιρας απασχόλησε την σύγχρονη κοινωνία ήταν η παρουσία φωτοχημικού νέφους στην Καλιφόρνια, που προκάλεσε μεγάλο αριθμό θανάτων και, όπως είναι λογικό, πανικό! Στη δεκαετία του '60 διαπιστώνεται από επιστήμονες ότι η αέρια ρύπανση δεν βλάπτει μόνο τοπικά άλλα μεταφέρεται με τη βοήθεια των μετεωρολογικών φαινομένων και έτσι βλάπτει πολλά σημεία στον πλανήτη, χωρίς να γνωρίζει σύνορα κρατών. Έτσι έγιναν για παράδειγμα στο παρελθόν μηνύσεις από τον Καναδά στις Η.Π.Α. και από την Σουηδία στη Γερμανία, λόγω της διακρατικής μεταφοράς της δασοκτόνου όξινης βροχής. Τα παραπάνω οδήγησαν στην πρώτη διεθνή σύμβαση που υπεγράφη στη Στοκχόλμη το 1972.

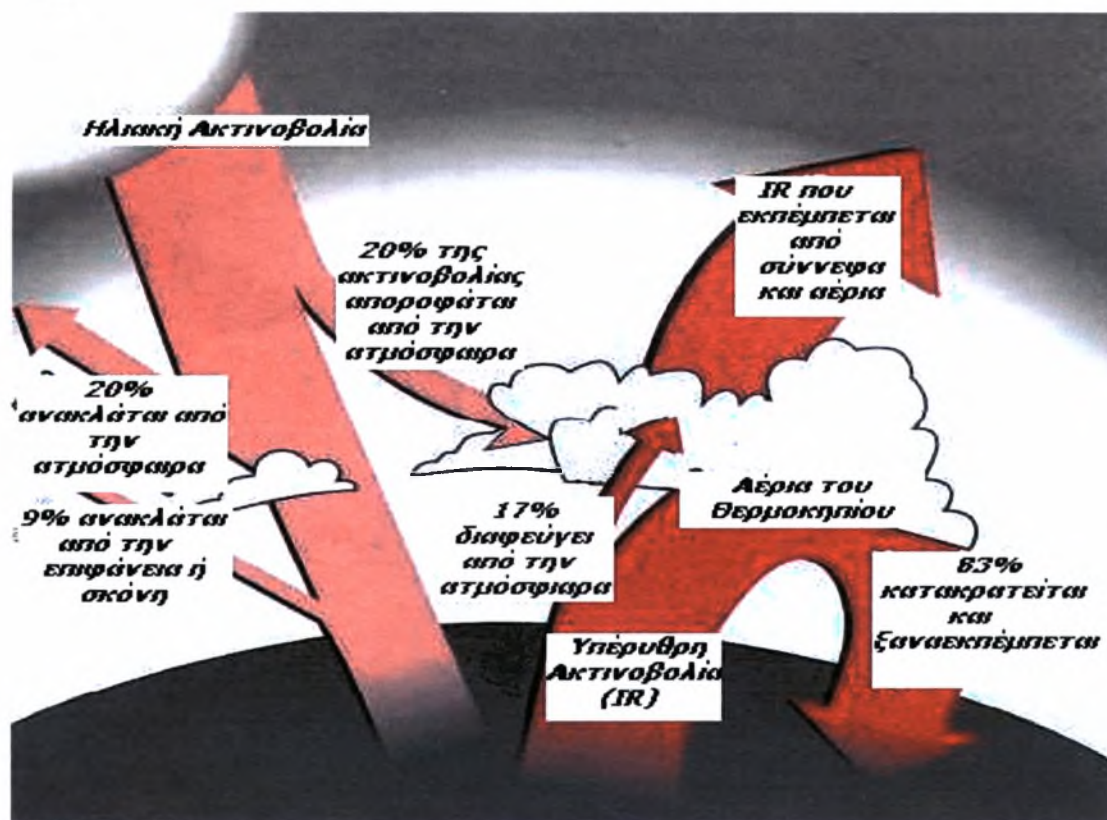
Στο δεύτερο ήμισυ του 20ου αιώνα, η ίδια η φύση αρχίζει να προειδοποιεί για σοβαρές ανθρωπογενείς επεμβάσεις που διατάραξαν την ισορροπία της. Είναι η περίοδος, όπου αναγνωρίστηκε από τον άνθρωπο η τεράστια αλλαγή που συντελέστηκε στη σύσταση της ατμόσφαιρας, που προκλήθηκε, χωρίς αμφιβολία, από τον ίδιο. Η αλλαγή στη σύσταση της



ατμόσφαιρας παίρνει ολοένα και πιο ανησυχητικές διαστάσεις, με την αλλοίωση της προστατευτικής ασπίδας του όζοντος, ξεκινώντας από την Ανταρκτική και συνεχίζοντας στα μεγάλα βόρεια γεωγραφικά πλάτη.

Σύμφωνα με έρευνες επιστημόνων έχει αποδειχτεί ότι όχι μόνο ελαττώνεται το προστατευτικό στρώμα του όζοντος τις δύο τελευταίες δεκαετίες, αλλά αυξάνουν και με ανησυχητικό ρυθμό οι συγκεντρώσεις αερίων, που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Εικόνα 1.1). Τα αέρια αυτά είναι κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο. Εντυπωσιακό είναι ότι από μετρήσεις που έγιναν σε καρότα πάγου, που περιείχαν εγκλωβισμένο αέρα, προέκυψε ότι ενώ τα τελευταία 400.000 χρόνια το διοξείδιο του άνθρακα παρέμεινε σταθερό στην ατμόσφαιρα (περίπου 280 ppm), τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί κατακόρυφα (περίπου στα 370 ppm). Το ίδιο ισχύει και για το μεθάνιο (από 0.7 ppm στα 1.7 ppm). Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί, από ανθρωπογενή αίτια, το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο κατά 15% στην ατμόσφαιρα ενώ, έχει ελαττωθεί κατά 10% το προστατευτικό στρώμα του όζοντος.

Το στρώμα του όζοντος είναι αυτό που φιλτράρει τις επικίνδυνες ακτινοβολίες του ήλιου, απαγορεύοντας σε αυτές να φτάσουν στην επιφάνεια της γης. Εκτός από τις πολύ σοβαρές ασθένειες που μπορεί να προκαλέσουν αυτές οι ακτινοβολίες στον άνθρωπο, το ζήτημα αποδεικνύεται ακόμη πιο σοβαρό, γιατί το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο είναι αυτά που διατηρούν τη μέση θερμοκρασία της γης σταθερή στους 15 °C. Χωρίς τα αέρια αυτά η μέση θερμοκρασία της γης θα ήταν -18 °C ! (Hansen et al. 1984). Δηλαδή η γη θα ήταν ακατοίκητη. Η ιδιαιτερότητα που έχουν αυτά τα δύο αέρια είναι ότι απορροφούν τη θερμική εκπομπή της γης και δεν την αφήνουν να αποβάλει θερμοκρασία προς το διάστημα. Αυτή η ισορροπία διαταράσσεται λόγω της ανεξέλεγκτης αύξησης των συγκεντρώσεων των δυο αυτών αερίων και δημιουργείται το γνωστό φαινόμενο του θερμοκηπίου, αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία της γης ολοένα και περισσότερο.



Εικόνα 1.1: Γραφικά απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
Πηγή: Ιστοσελίδα IPCC.

ΣΕΝΑΡΙΑ IPCC



Εικόνα 1.2: Γραφικά απεικόνιση των σεναρίων που θέσπισε η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος.
Πηγή: Ιστοσελίδα IPCC.



Το διοξείδιο του άνθρακα συμμετέχει στο φαινόμενο θερμοκηπίου περίπου κατά 60% και τα μεθάνιο κατά 20%. Το διοξείδιο του άνθρακα ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από τις πάσης φύσεως καύσεις των ορυκτών καυσίμων, ενώ το μεθάνιο προέρχεται από την κτηνοτροφία από τους χώρους υγειονομικής ταφής και άλλες οικολογικές και μη διαδικασίες. Οι μεταφορές και η βιομηχανία μοιράζονται την κύρια ευθύνη της εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα. Στις παραπάνω δραστηριότητες είναι λογικό να επικρατεί ανισότητα μεταξύ κρατών. Έτσι για παράδειγμα στις Η.Π.Α., στον Καναδά και στην Αυστραλία έχουν δυόμισι φορές μεγαλύτερη εκπομπή διοξειδίου ανά κάτοικο από ότι ο μέσος Ευρωπαίος.

Καθώς αυξάνονται τα αέρια του θερμοκηπίου οι συνέπειες γίνονται σοβαρότερες. Η μεγάλη διάρκεια διατήρησης των συγκεντρώσεων των αερίων στην ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα ότι ακόμη και σήμερα να ληφθούν δρακόντεια μέτρα αντιμετώπισης το φαινόμενο θα αργήσει να υποχωρήσει. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που κάνει τους επιστήμονες να ανησυχούν. Είναι φανερό λοιπόν ότι όσο αυξάνονται τα αέρια αυτά στην ατμόσφαιρα, τόσο αναμένεται να διαταράσσεται και το λεγόμενο θερμικό ισοζύγιο του πλανήτη. Οι μεταβολές που προκαλούνται είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Είναι σίγουρο όμως ότι οι αλλαγές στη σύσταση της ατμόσφαιρας αναμένεται να προκαλέσουν αλλαγή στο κλίμα. Ήδη η τελευταία εικοσαετία υπήρξε αρκετά διαταραγμένη από πλευράς κλίματος. Η προηγούμενη δεκαετία ήταν η θερμότερη της χιλιετίας, ενώ τα ακραία φαινόμενα σε πολλές περιοχές έδειξαν τάση αύξησης της συχνότητάς τους.

Πολλές χώρες, αλλά κυρίως οι Η.Π.Α., ενώ αποδέχονται τους κινδύνους που διαφαίνονται για το μέλλον, θέτουν προτεραιότητα στην οικονομία. Ο πρόεδρος των Η.Π.Α. δεν δέχεται το πρωτόκολλο του Κιότο, ενώ αντίθετα η Ευρωπαϊκή Ένωση και οι υπόλοιπες χώρες το έχουν υιοθετήσει. Οι συνέπειες από το εξελισσόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι δραματικές.

Χώρες που μέχρι τώρα θεωρούνταν άλυτες ξαφνικά παρουσιάζουν ακραία πλημμυρικά φαινόμενα. Σε χώρες εύκρατες τα φαινόμενα ξηρασίας



γίνονται πιο έντονα, ενώ οι βροχές πέφτουν πιο έντονες και χωρικά και χρονικά ανισοκατανομημένες. Μεταξύ αυτών και η Ελλάδα, που βρίσκεται στο σταυροδρόμι των κλιματικών αλλαγών. Η έκθεση της διακυβερνητικής επιτροπής για την κλιματική αλλαγή, όπως και η αντίστοιχη έκθεση ειδικής δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καταλήγουν σε παράλληλα ή και ίδια συμπεράσματα για την Ευρώπη.

Τα αποτελέσματα των κλιματικών αλλαγών αυτών είναι πολλά και αλληλοεμπλεκόμενα και θα πρέπει να διαπιστωθούν και να αντιμετωπιστούν έγκαιρα. Αυτό που ανησυχεί κυρίως τους επιστήμονες είναι η περιέργη αλλαγή της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.

1.2 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ

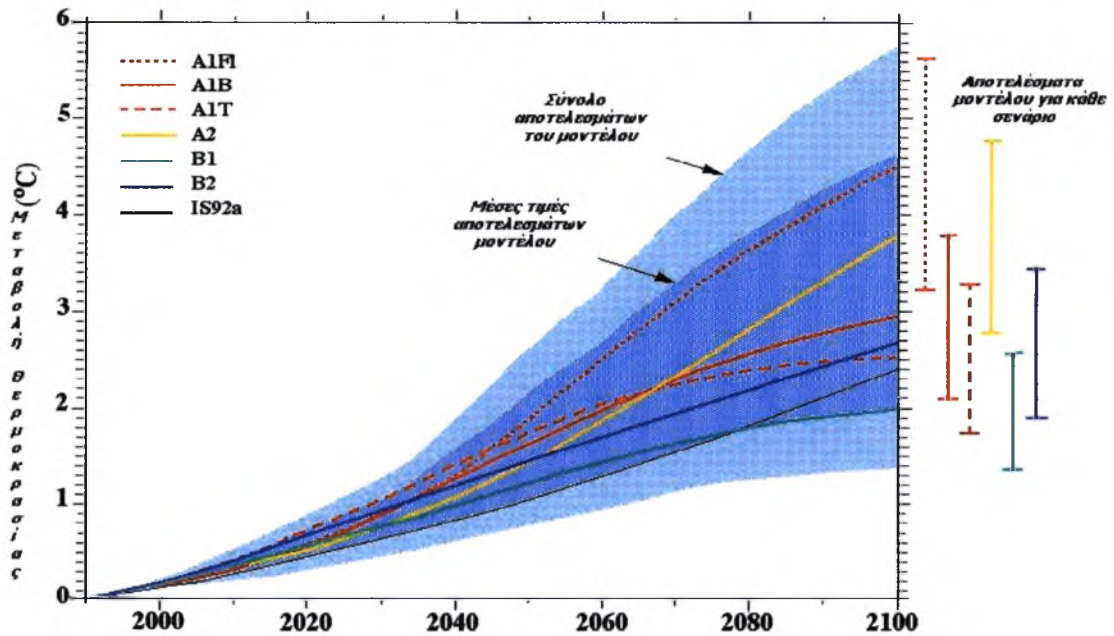
Ως κλίμα μιας περιοχής χαρακτηρίζεται ο μακράς διάρκειας συσχετισμός των θερμοκρασιακών, ανεμολογικών και υδρολογικών συνθηκών της. Στην δημιουργία των ατμοσφαιρικών συνθηκών παίζει ρόλο ένας μεγάλος αριθμός φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της γης και των ωκεανών. Λόγω των άπειρων συσχετισμών και αλληλεπιδράσεων στο σύστημα "γη – νερό – αέρας", είναι πολύ δύσκολο να προσομοιώσει και να προγνώσει κανείς επακριβώς τη μελλοντική συμπεριφορά του. Για να προσομοιώσει κανείς τις επιδράσεις που θα προκαλέσει μια ενδεχόμενη αλλαγή στο κλίμα για 50 έως 100 χρόνια, απαιτούνται ακόμη και από τους πιο ισχυρούς υπολογιστές αρκετοί μήνες επεξεργασίας! Οι περισσότερες δηλώσεις των επιστημόνων που αφορούν τις μελλοντικές κλιματικές αλλαγές είναι συγκρατημένες, από τη μια μεν γιατί οι κλιματικές διεργασίες είναι απρόβλεπτες και εξαρτώνται από πολλούς απροσδιόριστους παράγοντες, από την άλλη δε, επειδή υπάρχει αβεβαιότητα για το ποιά μέτρα και σε τι έκταση πρέπει να ληφθούν για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Παρόλα αυτά όμως, υπάρχει συμφωνία μεταξύ των επιστημόνων ότι οι εκπομπές των αερίων στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν το κλίμα. Αυτό, σύμφωνα με τους επιστήμονες, είχε και θα έχει, όπως έχει αποδειχτεί, επίπτωση και στη μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας της γης.



Παρατηρήθηκε στο παρελθόν και κυρίως μετά τη βιομηχανική επανάσταση, μια μέση αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, από το 1970 και μετά υπολογίστηκε αύξηση 0.15 °C ανά δεκαετία. Ο ρυθμός αυτός αύξησης όχι μόνο διατηρήθηκε αλλά αυξήθηκε επικίνδυνα.

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (*Intergovernmental Panel for Climatic Change – IPCC*) που ιδρύθηκε από τον Ο.Η.Ε το 1988 έχει παρουσιάσει σε πολλές εκθέσεις της τα αποτελέσματα επιστημονικών ερευνών για τα πώς θα μπορούσε να εξελιχθεί το κλίμα, ανάλογα με την πορεία των εκπομπών επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα, έως το 2100. Η Διακυβερνητική Επιτροπή όρισε έναν αριθμό σεναρίων έτσι ώστε να μπορεί κατά προσέγγιση να προσδιορίσει την αύξηση της θερμοκρασίας στο μέλλον (*Special Report on Emissions Scenarios*). Τα σενάρια αυτά που είχε δημιουργήσει η επιτροπή πριν το 1996 ξαναπεξεργάστηκαν και έτσι προέκυψαν 40 νέα σενάρια, τα λεγόμενα SRES-σενάρια (*Second Report on Emission Scenarios*). Τα σενάρια αυτά λαμβάνουν υπόψη την πιθανή ανάπτυξη τον 21^ο αιώνα στους τομείς της αύξησης του πληθυσμού, της οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, της τεχνολογικής εξέλιξης και της κατανάλωσης πρώτων υλών. Τα 40 αυτά σενάρια, κατατάσσονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, την A1, την A2, την B1 και την B2 (Εικόνα 1.2).

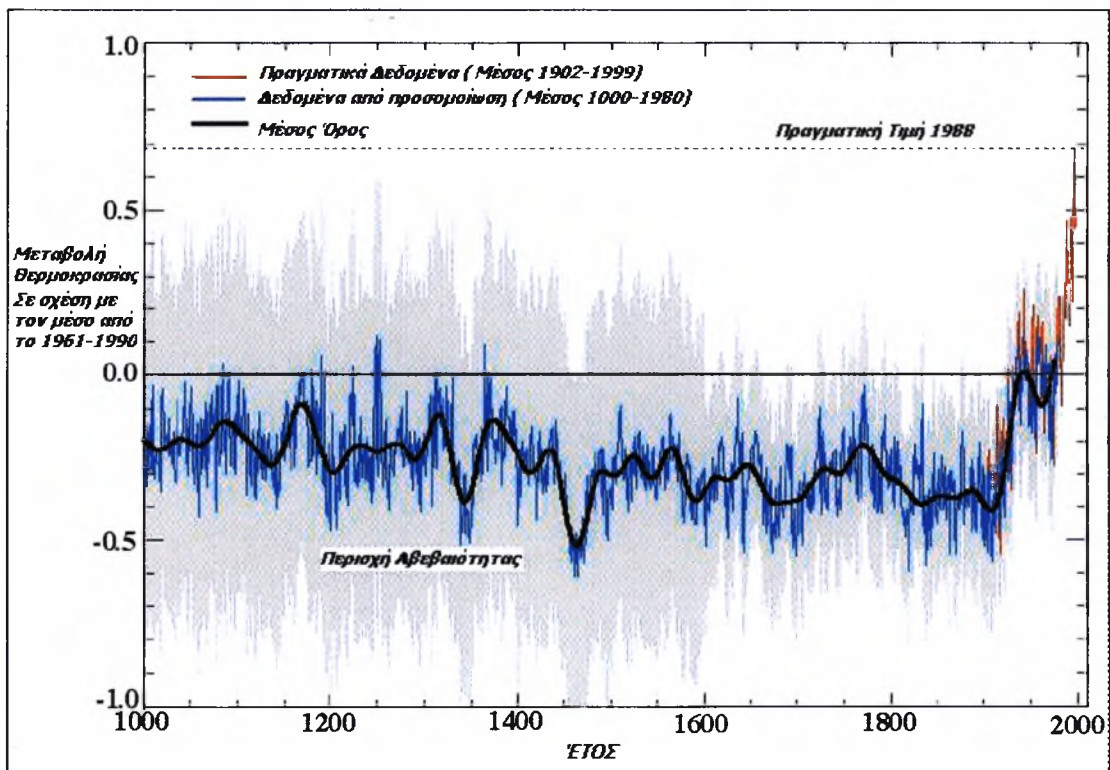
Τα σενάρια της κατηγορίας A1 περιγράφουν τον μελλοντικό κόσμο με μεγάλη οικονομική ανάπτυξη, έναν πληθυσμό που αυξάνεται μέχρι το μέσο του 21^{ου} αιώνα ενώ μετά αρχίζει να μειώνεται και την αποτελεσματική και γρήγορη εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Θεωρείται επίσης ότι το φαινόμενο της παγκοσμιοποίησης θα γίνεται όλο και πιο έντονο, δηλαδή οι περιφερειακές διαφορές στο εισόδημα, στην πολιτιστική και κοινωνική ταυτότητα και διαφορές στους ρυθμούς της τεχνολογικής ανάπτυξης αμβλύνονται. Η κατηγορία αυτή των σεναρίων χωρίζεται σε μικρότερες υποκατηγορίες ανάλογα με το τι ενεργειακές πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται. Έτσι δημιουργούνται τρεις υποκατηγορίες, τα A1FI-σενάρια που προϋποθέτουν της εκτεταμένη χρήση ορυκτών πηγών ενέργειας, τα A1T-σενάρια που εμπεριέχουν την κύρια χρήση μη ορυκτών



Εικόνα 1.3: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου που εφαρμόστηκε, για τα διάφορα σενάρια της IPCC, με σκοπό τον μελλοντικό υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.

Πηγή: Ιστοσελίδα IPCC.

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ 1000 ΧΡΟΝΙΑ : ΒΟΡ. ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟ



Εικόνα 1.4: Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει την εναλλαγή της θερμοκρασίας στο βόρειο ημισφαίριο σε °C, σε σχέση με τον μέσο από το 1961 – 1990.

Πηγή: Ιστοσελίδα IPCC.

πηγών ενέργειας και τα A1B-σενάρια που προβλέπουν την ισορροπημένη χρήση και των δύο μορφών ενέργειας.

Τα σενάρια της κατηγορίας A2 προβλέπουν μια ανομοιομορφη εικόνα του κόσμου, όπου οι τοπικές ιδιαιτερότητες διατηρούνται, ο αριθμός των γεννήσεων διαφέρει ανάλογα με την περιοχή, τα ήθη και τα έθιμα της κάθε κοινωνίας και έτσι ο πληθυσμός συνεχώς αυξάνει. Η οικονομική ανάπτυξη διαφέρει περιφερειακά, το Εθνικό Ακαθάριστο Προϊόν και η τεχνολογική ανάπτυξη δεν παραμένουν τα ίδια και ο ρυθμός ανάπτυξης δεν είναι τόσος όσος στις άλλες κύριες κατηγορίες σεναρίων.

Στα σενάρια της κατηγορίας B1 ο κόσμος αναπτύσσεται περίπου όπως στην περίπτωση της κατηγορίας A1, συμπεριλαμβάνοντας όμως μια γρήγορη αλλαγή της οικονομικής δομής των κοινωνιών σε κοινωνίες που η οικονομίες τους βασίζονται στην προσφορά υπηρεσιών και πληροφοριών. Συγχρόνως μειώνεται η κατανάλωση υλικών αγαθών και εισάγονται μη ρυπογόνες και γενικά πιο φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες. Η ανάπτυξη προσανατολίζεται στην άμβλυση των κοινωνικοπολιτικών ανισοτήτων και στην επίλυση των προβλημάτων της μόλυνσης του περιβάλλοντος, σε παγκόσμιο επίπεδο και συνεργασία.

Τα σενάρια της κατηγορίας B2 βασίζονται στην επίλυση των κοινωνικοοικονομοπολιτικών ανισοτήτων, σε τοπικό επίπεδο όμως. Ο πληθυσμός της γης αυξάνεται συνεχώς, αν και με χαμηλότερο ρυθμό από ότι στην περίπτωση των σεναρίων της κατηγορίας A2. Η οικονομική ανάπτυξη γίνεται με μέτριους ρυθμούς και οι τεχνολογικές επιτεύξεις γίνονται με χαμηλότερους ρυθμούς από ότι στις κατηγορίες σεναρίων A1 και B1, ενώ περιορίζονται σε τοπικό επίπεδο. Η προστασία του περιβάλλοντος και η ποιότητα ζωής παίζουν και σε αυτή την περίπτωση σημαντικό ρόλο, αλλά περιορίζονται και αυτά σε τοπικό επίπεδο.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω σενάρια εφαρμόστηκαν μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της μελλοντικής αύξησης της θερμοκρασίας και άλλων επιπτώσεων στον πλανήτη που θα εξετάσουμε παρακάτω.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 1.3), η μέση παγκόσμια θερμοκρασία, στη επιφάνεια του εδάφους, που υπολογίστηκε με



βάση 40 σενάρια, για την περίοδο από το 1990 έως το 2100, θα αυξηθεί περίπου κατά 1.4 έως 5.8 °C. Εδώ βλέπει κανείς ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν από αυτά που είχε ανακοινώσει η Διακυβερνητική Επιτροπή στην έκθεσή της το 1996 (πρόβλεψη 1996 : αύξηση 1.3 - 4.6 °C). Τα αποτελέσματα της προηγούμενης έκθεσης βασίζονταν κυρίως, σε έξι μόνο σενάρια. Ο λόγος της απόκλισης των αποτελεσμάτων είναι ότι, τότε είχε προβλεφθεί μικρότερη εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα, πράγμα που έσπευσαν να διορθώσουν αφού η τάση στα επόμενα χρόνια (1996-2001) αποδεικνύονταν, μάλλον αυξάνουσα.

Για να κρίνει κανείς εάν τα παραπάνω αποτελέσματα είναι όντως ένα φαινόμενο μοναδικό και δεν οφείλεται, για παράδειγμα στην περιοδικότητα κάποιου φαινομένου, θα ήταν καλό να δει την εξέλιξη της θερμοκρασίας στο παρελθόν.

Μετά από έρευνες που έγιναν, αποδείχτηκε ότι η διάρκεια του φαινομένου αυτού του 20ο αιώνα, είναι μοναδική στα ιστορικά χρονικά, αφού δεν έχει ξαναπαρατηρηθεί τα τελευταία 1000 χρόνια, τουλάχιστο. Η δεκαετία του 1990 ήταν αδιαμφισβήτητα η θερμότερη της χιλιετίας και το 1998 το θερμότερο έτος. Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 1.4), φαίνεται μια σχετικά θερμή περίοδος από τον 11^ο έως τον 14^ο αιώνα και μια σχετικά ψυχρή περίοδος, η λεγόμενη μικρή παγετώδη εποχή του μεσαίωνα, από τον 15^ο έως τον 19^ο αιώνα. Από το ίδιο διάγραμμα βλέπει κανείς ότι δεν μπορούμε να θεωρήσουμε αυτή την άνοδο της θερμοκρασίας ως αντίδραση του κλίματος στην προηγούμενη παγετώδη εποχή αφού η αύξηση δεν έχει καμία σχέση με το επίπεδο της φυσιολογικής που συμβαίνει σε τέτοιες περιπτώσεις. Οι τιμές της θερμοκρασίας στην περίοδο από τον 11^ο έως τον 14^ο αιώνα ήταν μεν κατά 0.2 °C πάνω από τον μέσο όρο, αλλά βρίσκονται κατά πολύ κάτω από αυτές του 20^ο αιώνα.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του παραπάνω διαγράμματος προέκυψαν από διάφορα στοιχεία που εντόπισαν οι επιστήμονες σε κορμούς δέντρων, σε κοράλλια και σε ιστορικά ντοκουμέντα. Επειδή τα στοιχεία για το νότιο ημισφαίριο είναι λιγοστά και



ελλιπή πριν το 1861, το διάγραμμα βασίζεται σε στοιχεία από το βόρειο ημισφαίριο.

Για παραπάνω στοιχεία, όσο αφορά την μεταβολή – αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, μπορεί κανείς να ανατρέξει στους πίνακες και τα διαγράμματα στο παράρτημα (Π1.1-Π1.15).

Αυτό που έχει σημασία είναι το αποτέλεσμα αυτών των ερευνών, δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας της γης κατά 1.4°C έως 5.8°C , έως το 2100.

Η ανθρωπογενής αυτή αύξηση της θερμοκρασίας θα προκαλέσει πολλές αλλαγές στον πλανήτη.

1.3 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ

Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος οι επιπτώσεις της αλλαγής, θα είναι πολλές και θα προκαλέσουν με τη σειρά του άλλες, εξίσου σοβαρές, δευτερογενείς επιπτώσεις.

Οι αναμενόμενες υψηλότερες ημερήσιες θερμοκρασίες θα εξελίσσονται σε καύσωνες και θα προκαλούν προβλήματα στους κατοίκους, των μεγάλων κυρίως πόλεων. Θα προκύψουν προβλήματα στην κτηνοτροφία, στη γεωργία, ακόμη και στον τουρισμό, αφού θα υπάρξει μετατόπιση των τουριστικών προορισμών. Ένα ακόμη σοβαρό πρόβλημα θα είναι η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για ψύξη. Επίσης αναμένεται διάφορα ζιζάνια να βρουν πρόσφορο έδαφος προκαλώντας, έτσι προβλήματα στις αγροτικές καλλιέργειες. Η μείωση του αριθμού των ψυχρών ημερών του έτους θα έχει ως αποτέλεσμα την έξαρση ιών επικίνδυνων για τον άνθρωπο και τα ζώα.

Θα είναι πιο έντονη η χρονική και χωρική ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων που παρουσιάζονται πιο αραιά και με μεγαλύτερη ένταση. Οι πλημμύρες θα είναι αναπόφευκτες και θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με μεγάλο κόστος, επιβαρύνοντας έτσι τις οικονομίες των κρατών. Ακόμη οι έντονες βροχοπτώσεις μπορεί, να προκαλέσουν αυξημένη διάβρωση του



εδάφους. Οι αυξημένες απορροές που θα προκληθούν θα δημιουργήσουν προβλήματα σε φράγματα και ταμιευτήρες, που καλούνται να παραλάβουν μεγάλα και έντονα πλημμυρικά κύματα.

Η ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων θα έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση των περιόδων ξηρασίας και λειψυδρίας. Η γεωργία αναμένεται να επηρεαστεί αντιδρώντας με μειωμένη παραγωγή. Οι παραγωγοί θα εξαναγκαστούν να προσαρμόσουν τα προϊόντα τους στις νέες συνθήκες. Οι περίοδοι ξηρασίας αναμένεται να προκαλέσουν προβλήματα σε διάφορες κατασκευές λόγω καθιζήσεων (γνωστό σε εμάς από τα φαινόμενα καθιζήσεων του θεσσαλικού κάμπου λόγω υπεράντλησης υπόγειων υδάτων). Η έλλειψη βροχών θα προκαλέσει ακόμη υποβάθμιση της ποιότητας και ποσότητας των υδατικών αποθεμάτων. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί επίσης στον αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς σε δάση (εάν μέχρι τότε έχει απομείνει κανένα!).

Η αλλαγή στο κλίμα θα προκαλέσει και εντατικοποίηση των ακραίων φαινομένων όπως το El Niño και το La Niña, που είναι γνωστό ποια είναι τα αποτελέσματά τους, αφού το ζήσαμε τα τελευταία χρόνια.

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας είναι η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, φαινόμενο το οποίο θα συζητηθεί και θα σχολιαστεί παρακάτω.



2. ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

2.1 Η ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

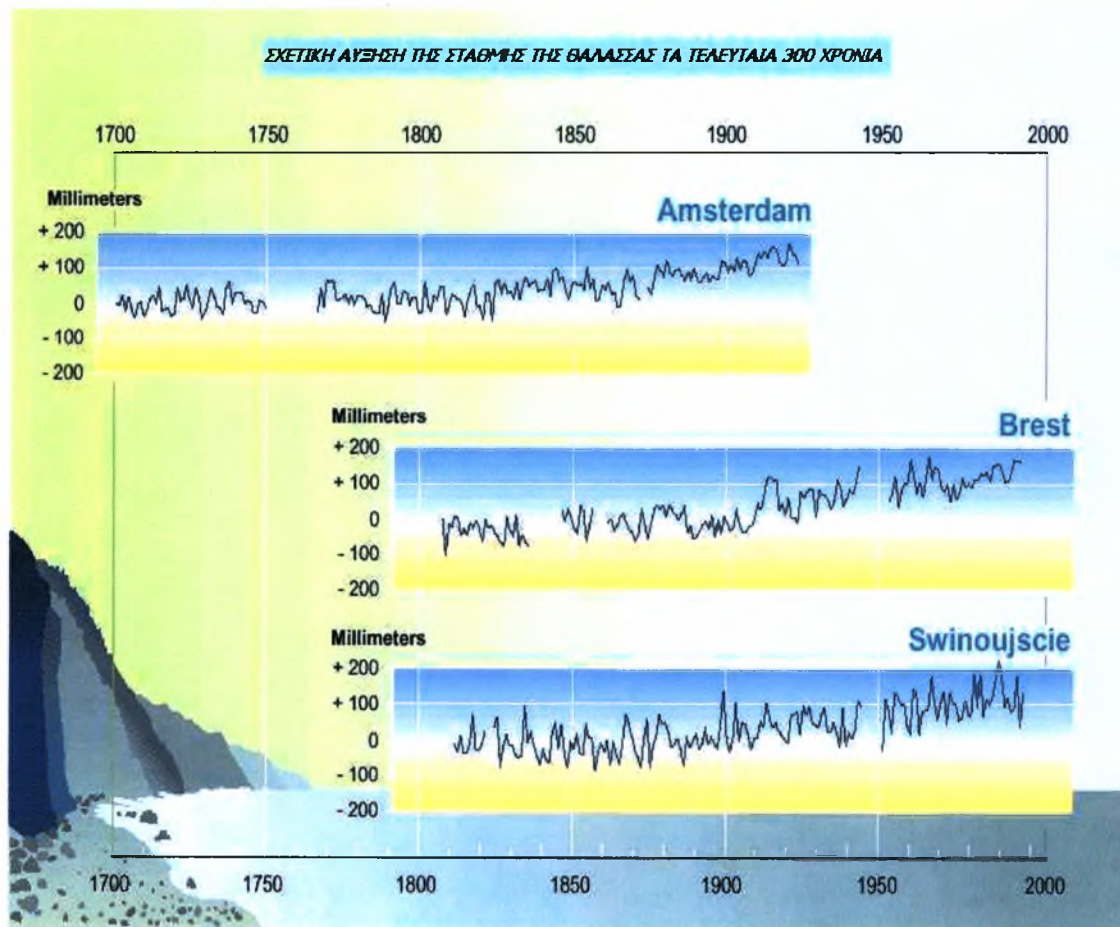
Μια από σημαντικότερες επιπτώσεις που προκαλεί η αλλαγή του κλίματος, εξαιτίας της επέμβασης του ανθρώπου, είναι η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, από την οποία θα προκληθούν αναμφισβήτητα προβλήματα μεγάλης εμβέλειας στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη κοινωνία. Όταν άρχισαν να εξετάζονται οι επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο του θερμοκηπίου στον άνθρωπο και στο περιβάλλον, η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας ήταν αυτή που προκάλεσε και την μεγαλύτερη αναστάτωση. Διάφορα καταστροφολογικά σενάρια ήρθαν στη δημοσιότητα από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, πανικοβάλλοντας τους πολίτες, πολλές φορές χωρίς καμία ουσιαστική απόδειξη. Χαρακτηριστικά είναι τα σενάρια σύμφωνα με τα οποία πολλές παραλιακές πόλεις παρουσιάζονται ως μελλοντικές μικρές Βενετίες, η Έρημος Σαχάρα μετατρέπεται σε παραλιακό θέρετρο και η μείωση των πάγων στους Πόλους φαντάζει εξαιρετικά απειλητική. Χαρακτηριστικό είναι και το εξώφυλλο του, κατά τα άλλα έγκυρου, γερμανικού περιοδικού "Der Spiegel", στο οποίο παρουσιάζεται ο γνωστός Καθηδρικός Ναός της Κολωνίας «βυθισμένος» κατά το ένα τρίτο στο νερό (τεύχος 44, 1986).

Οι κύριοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αλλάξει η στάθμη της θάλασσας είναι δύο. Πρώτον με την αλλαγή της μορφής και του όγκου του βυθού και δεύτερον από την αύξηση ή μείωση του όγκου του νερού. Τα αίτια που μπορούν να προκαλέσουν μια αλλαγή στον βυθό της θάλασσας είναι η απόθεση στερεού υλικού από την διάβρωση και η ανύψωση ή υποβίβασή του με διάφορες γεωλογικές διεργασίες. Αυτά τα φαινόμενα είναι μακροχρόνια και περιορίζονται κυρίως σε τοπικό επίπεδο. Οι σημαντικότερες από αυτές τις διεργασίες, στο πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν, είναι η αντίδραση του φλοιού της γης στην αποφόρτισή του από



τους πάγους, που έφερε κατά την τελευταία παγετώδη περίοδο. Ενώ οι πάγοι της περιόδου αυτής, έχουν λειώσει εδώ και 6000 χρόνια, η λεγόμενη ισοστατική ανύψωση της εδαφικής μάζας διαρκεί ακόμη. Έτσι για παράδειγμα η ακτογραμμή της Βόρειας Θάλασσας έχει μετακινηθεί τα τελευταία 10000 χρόνια κατά μερικές εκατοντάδες μέτρα. Στις Σουηδικές ακτές της Βόρειας Θάλασσας, κοντά στην Στοκχόλμη, παρατηρείται ακόμη και σήμερα μείωση της στάθμης της θάλασσας, κατά 4 χιλιοστά το χρόνο, που οφείλεται στο παραπάνω φαινόμενο. Παράλληλα με τις παραπάνω διεργασίες, συμβαίνουν και άλλες που επηρεάζουν την στάθμη της θάλασσας, όπως ηφαιστειακά και σεισμικά φαινόμενα. Το σύνολο των παραπάνω φαινομένων επηρεάζει τη στάθμη της θάλασσας μόνο σε τοπικό επίπεδο.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω φαινόμενα η αλλαγή του όγκου του νερού της θάλασσας δεν περιορίζει την αύξηση τοπικά αλλά την μεταβάλλει σε παγκόσμιο επίπεδο. Η μεταβολή του όγκου του νερού οφείλεται, στην θερμική διαστολή ή συστολή του, λόγω της θέρμανσης ή ψύξης του αντίστοιχα. Επίσης, το λιώσιμο του πάγου προσθέτει όγκο νερού στον ήδη υπάρχοντα και η δημιουργία πάγου αφαιρεί όγκο από το νερό της θάλασσας. Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η αλλαγή στη στάθμη της θάλασσας οφείλεται σε κλιματικές αλλαγές. Άλλα κλιματικά φαινόμενα που επηρεάζουν σε τοπικό επίπεδο την στάθμη είναι ο άνεμος, η εξάτμιση και ο κατακρημνισμός. Η εναλλαγή θερμών και ψυχρών περιόδων είχε επηρεάσει σημαντικά την στάθμη της θάλασσας και εξακολουθεί να την επηρεάζει. Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά την τελευταία παγετώδη περίοδο η στάθμη της θάλασσας βρισκόταν 120 μέτρα κάτω από την σημερινή, αφού ένα μεγάλο μέρος του νερού ήταν εγκλωβισμένο σε παγετώνες που κάλυπταν την επιφάνεια της γης (84 εκ. κυβ. χιλ. έναντι 32 εκ. κυβ. χιλ. σήμερα). Στην τελευταία μεσοπαγετώδη περίοδο (πριν 110χιλ. έως 130χιλ. χρόνια), όπου επικρατούσε κλίμα κατά 2 °C θερμότερο από σήμερα, η στάθμη της θάλασσας ήταν κατά μέσο όρο 6 μέτρα υψηλότερα από την σημερινή.



Εικόνα 2.1: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας από την περίοδο του 18^{ου} αιώνα σε διάφορα σημεία μέτρησης στην Ευρώπη
Πηγή: IPCC 2001: Climate Change 2001. Synthesis-Report

2.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΩΚΕΑΝΩΝ

Οι χωρικά και χρονικά ανομοιόμορφα κατανεμημένες μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας στο παρελθόν, δυσκολεύει την εξαγωγή συμπερασμάτων για το πώς μεταβλήθηκε στο παρελθόν η στάθμη της θάλασσας. Μόνο τα τελευταία 40 χρόνια, υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός σταθμών μέτρησης, περίπου 400, που μετρούν ταυτόχρονα την στάθμη ανά τον κόσμο. Παρόλα αυτά βρίσκονται γεωγραφικά ανισοκατανεμημένοι αφού έχουν εγκατασταθεί κυρίως στις ακτές της Ευρώπης, της Β. Αμερικής και της Ιαπωνίας.

Στον 20^ο αιώνα η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας κυμαίνονταν από 1.0 έως 2.0 χιλιοστά το χρόνο, δηλαδή συνολικά 10 έως 20 εκατοστά. Σύμφωνα με τις νεότερες εκτιμήσεις 15 εκατοστά (Church, J.A. and



Gregory, J.M. , 2001). Η αύξηση αυτή είναι η μεγαλύτερη των τελευταίων 2000 ετών αφού μέχρι τώρα η αύξηση κυμαίνονταν μεταξύ 0.1 και 0.2 χιλιοστά το χρόνο.

Η αύξηση αυτή των τελευταίων 100 χρόνων οφείλεται κυρίως στη θερμική διαστολή του νερού της θάλασσας, που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.6 °C. Λόγω της θέρμανσης του νερού των ωκεανών μειώνεται η πυκνότητά του και έτσι αυξάνεται ο όγκος του για να διατηρηθεί η μάζα. Λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας των ωκεανών καθυστερεί η μετάδοση της θερμότητας από τα επιφανειακά στρώματα στα βαθύτερα που προκαλεί σημαντικές καθυστερήσεις στην διάδοση της διαστολής. Η γεωγραφική εξάπλωση της μεταβολής της στάθμης μπορεί να διαρκέσει ακόμη και μερικές δεκαετίες ωστόσο σταθεροποιηθεί, γιατί είναι μεγαλύτερη σε περιοχές με έντονη αύξηση της θερμοκρασίας και μικρότερη σε περιοχές με μικρές μεταβολές.

Η έλλειψη δεδομένων για τη μεταβολή της θερμοκρασίας των ωκεανών για μεγάλο χρονικό διάστημα, δυσκολεύει την χειροπιαστή απόδειξη της θερμικής διαστολής των ωκεανών, λόγω του φαινομένου αυτού. Τα πιο αξιόπιστα δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό αυτό είναι αυτά για τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό. Μεταξύ του 20°B παράλληλου και του 35°B παράλληλου προσδιορίστηκε από έρευνες 40 ετών (1950-1990) μια αύξηση της θερμοκρασίας του νερού κατά 0.57 °C ανά 100 χρόνια σε βάθος 100 έως 2500 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας ισοδυναμεί με μια θερμική διαστολή του όγκου του νερού κατά 1.0 χιλ. το χρόνο (Joyce, T.M. , R.S. Pickart and R.C. Millard –1999). Παρόμοια αποτελέσματα εξήχθησαν και για τον Βόρειο Ειρηνικό Ωκεανό, για μια περίοδο 20 χρόνων (3.5°N έως 60°N). Εδώ προσδιορίστηκε από την αλλαγή των τιμών της πυκνότητας μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 1.4 χιλ. το χρόνο (Wong, A.P.S. et al. –1999).

Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας που οφείλεται στην θερμική διαστολή, στον 20^ο αιώνα ανέρχεται πιθανός στα 10 εκατοστά (Church, J.A. and Gregory, J.M. , 2001). Σύμφωνα με αποτελέσματα που εξήχθησαν από μαθηματικά μοντέλα η συμβολή της θερμικής διαστολής στην αύξηση της



στάθμης της θάλασσας τον 20^ο αιώνα ήταν 0.3 –0.7 χιλ. το χρόνο με μια αυξητική τάση 0.6 – 1.1 χιλ το χρόνο την τελευταία δεκαετία (Church, J.A. and Gregory, J.M. , 2001 και Jackett, T.J., McDougall, M.H. England and A.C. Hirst –2000).

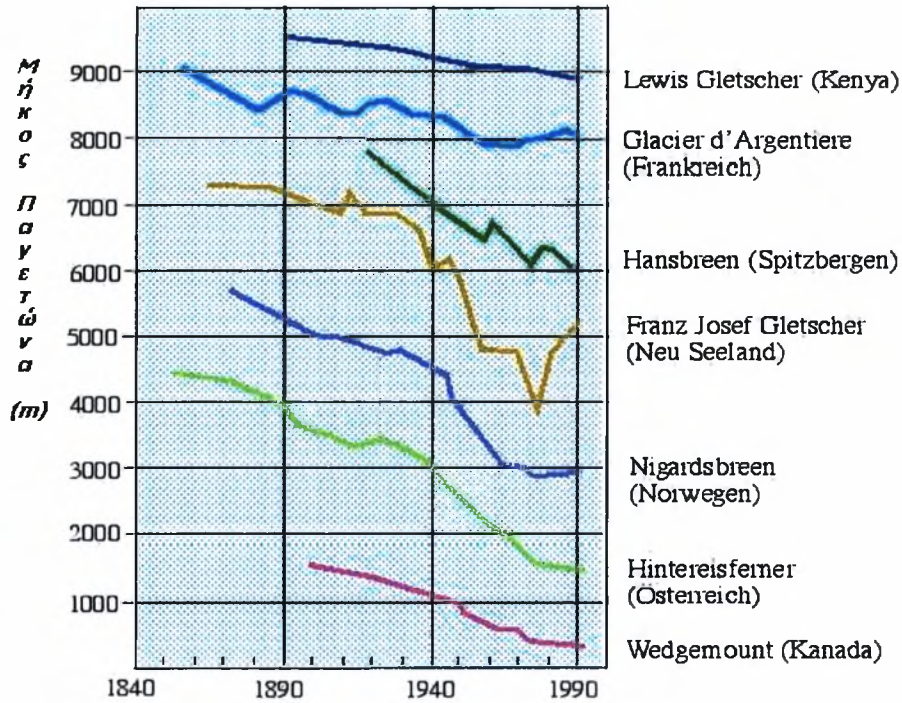
2.3 ΛΙΩΣΙΜΟ ΤΩΝ ΠΑΓΩΝ

Μια άλλη αιτία για την αύξηση της στάθμης της θάλασσας είναι το λιώσιμο των Πάγων. Το λιώσιμο των παγετώνων στα βουνά προκάλεσε τον 20^ο αιώνα μια αύξηση στη στάθμη της θάλασσας κατά 2-5 εκατοστά. Η πιθανότητα να αυξηθεί η στάθμη λόγω του λιώσιμου των πάγων της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής είναι μη προσδιορίσιμη. Δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί εάν τελικά οι πάγοι αυτοί θα λιώσουν ή εάν τελικά θα αυξηθεί ο όγκος τους από τις αυξημένες κατακρημνίσεις, όπως χιονοπτώσεις, που θα προκληθούν από την αλλαγή του κλίματος.

	Ορεινοί Παγετώνες	Κάλυμμα Πάγου	Παγετώνας Γροιλανδίας	Παγετώνας Ανταρκτικής
Έκταση (10 ⁶ Km ²)	0.43	0.24	1.71	12.37
Όγκος (10 ⁶ Km ³)	0.08	0.10	2.85	25.71

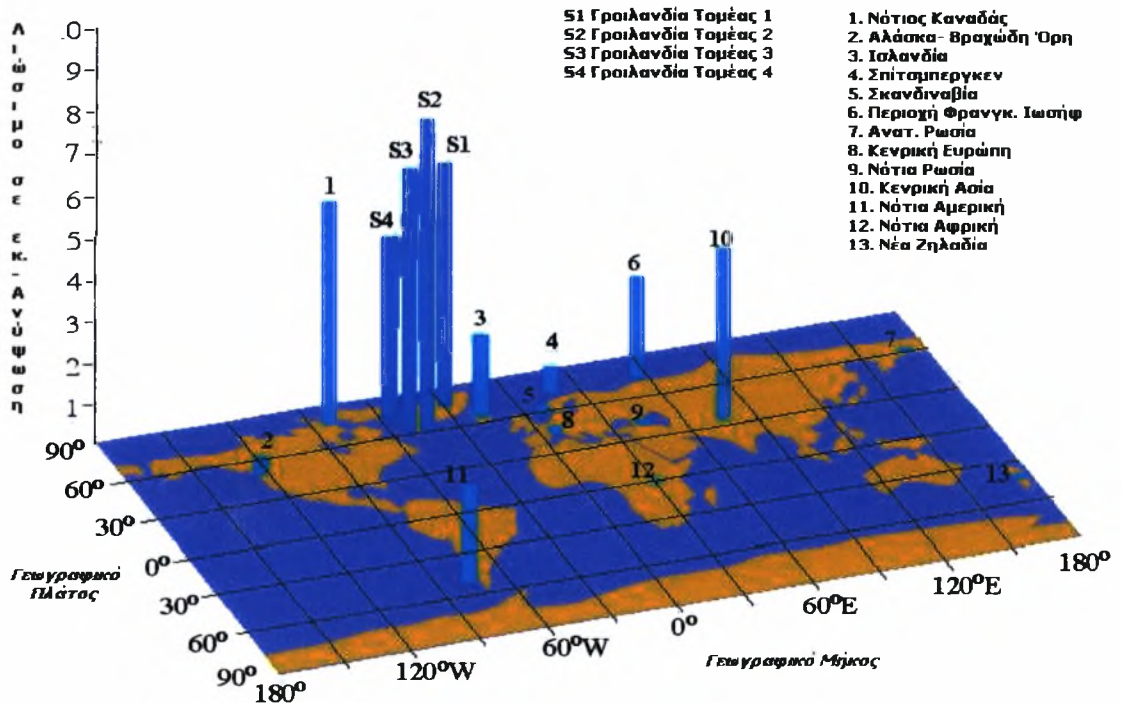
Πηγή: Church, J.A. and Gregory, J.M. , 2001: Changes in Sea Level

Οι ορεινοί παγετώνες και άλλες καλυμμένες επιφάνειες με πάγο καταλαμβάνουν παγκοσμίως την έκταση των 670 000 Km². Το νερό που είναι εγκλωβισμένο σε παγετώνες και μικρότερες άλλες περιοχές καλυμμένες από πάγο (εξαιρουμένου αυτού στην Γροιλανδία και την Ανταρκτική) θα προκαλούσε μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας της τάξης των 51 εκατοστών κατά μέσο όρο παγκοσμίως. Οι παγετώνες αντιδρούν στην αλλαγή του κλίματος αρκετά ευαίσθητα και μεταβάλουν την μάζα τους με σχετικά γοργούς ρυθμούς. Παγκοσμίως υπάρχουν περίπου 160000 καταγεγραμμένοι παγετώνες. Μόνο για τους 40, από τους παραπάνω 160000, υπάρχουν συνεχείς μετρήσεις της μάζας και της έκτασής τους εδώ και 20 χρόνια περίπου, ενώ για άλλους 100 οι μετρήσεις φτάνουν τα 5 χρόνια. Λόγω λοιπόν των ελάχιστων δεδομένων που



Εικόνα 2.2: Μεταβολή μήκους των σημαντικότερων παγετώνων από το 1850 και μετά. Ιωσήφ Ρωσία

Πηγή: Zuo, Z. and J. Oerlemans (1997): Contribution of glacier melt to sea-level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation, *Climate Dynamics*, 13,835-845



Εικόνα 2.3: Η συμβολή των παγετώνων και στρώματος πάγου στην Γροιλανδία (σκούρο μπλε χρώμα), στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας από το 1865 έως το 1990. Οι περίπου 100 περιοχές με παγετώνες στην γη είναι κατανεμημένες εδώ σε 13 περιφέρειες.

Πηγή: όπως πάνω.



υπάρχουν για τους παγετώνες, είναι δύσκολο να γίνουν εκτιμήσεις, με μικρό σφάλμα, όσο αφορά την συμμετοχή τους στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας.

Πρέπει ιδιαίτερα να τονιστεί, ότι από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα έχει μειωθεί δραστικά η έκταση των ορεινών παγετώνων της Ευρώπης και της Β.Αμερικής. Μερικοί από τους παγετώνες που έτυχαν μακράς παρακολούθησης τα τελευταία χρόνια είναι οι : Hintereisferner (Αυστρία), Rhone-Gletscher (Ελβετία), Sarennes (Γαλλία), Storbreen (Νορβηγία), Storglaciären (Σουηδία) και South Cascade (Η.Π.Α.).

Κατά την περίοδο από το 1961 έως το 1990 το λιώσιμο των παγετώνων συνέβαλε στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 0.25 χιλ. το χρόνο. Σε μερικές περιπτώσεις οι παγετώνες, όπως αυτός στην Νέα Ζηλανδία, όχι μόνο δεν μειώνονται λόγω της αλλαγής του κλίματος, αλλά ακριβώς αυτή η αλλαγή του κλίματος σε τοπικό επίπεδο ευνοεί την επέκτασή τους (Church, J.A. and Gregory, J.M. , 2001 και Zuo, Z. and J. Oerlemans – 1997).

Ακόμη πιο λίγα είναι τα δεδομένα που υπάρχουν για τους πάγους της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής. Οι τελευταίες παρατηρήσεις που έχουν γίνει εκεί, προσδιόρισαν λιώσιμο των πάγων στις άκρες των παγετώνων και μεγάλη συσσώρευση στον πυρήνα τους. Δεν είναι προσδιορισίμο όμως πια από τις δύο διεργασίες κυριαρχεί, δηλαδή εάν τελικά η μάζα των πάγων μειώνεται ή όχι. Ένα σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζεται και δυσκολεύει την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι ότι δεν μπορεί να προσδιοριστεί που οφείλονται διάφορες αντιδράσεις των παγετώνων που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια. Έτσι για παράδειγμα δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί εάν η απόσπαση κομματιών πάγου από τους παγετώνες οφείλεται στην κλιματική αλλαγή ή γίνεται στα πλαίσια της περιόδου αντίδρασης-ανάρρωσης των παγετώνων από την τελευταία παγετώδη περίοδο. Κατά την μεταβατική περίοδο από μια παγετώδη σε μια πιο θερμή περίοδο, η θερμοκρασία στην επιφάνεια ενός παγετώνα μεταβάλλεται κατά 20 °C. Η καθυστερημένη αντίδραση λοιπόν ενός παγετώνα, σε μια τέτοια θερμοκρασιακή μεταβολή, οφείλεται κυρίως στους πολύ αργούς ρυθμούς αντίδρασης που έχει, αφού για να μεταφερθεί αυτή η μεταβολή στο



εσωτερικό του απαιτούνται πολλές χιλιάδες χρόνια. Έτσι πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι η αντίδραση του παγετώνα σε κλιματικές αλλαγές δεν εξαρτάτε μόνο από τις αλλαγές που συμβαίνουν σήμερα, αλλά και σε πολύ μεγάλο βαθμό από αλλαγές που συνέβησαν στο παρελθόν.

Το πλήρες λιώσιμο των πάγων της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής θα μπορούσε να προκαλέσει μια αύξηση στη στάθμη της θάλασσας κατά 70 μέτρα, από το οποίο το 90% θα οφείλονταν στο λιώσιμο των πάγων της Ανταρκτικής. Το χιόνι που πέφτει ετησίως στις περιοχές αυτές θα προκαλούσε μια αύξηση της στάθμης κατά 6.5 χιλ. τον χρόνο. Το χιόνι αυτό αντισταθμίζεται με το αντίστοιχο λιώσιμο των πάγων της περιοχής. Επειδή οι θερμοκρασίες στην Ανταρκτική είναι πολύ χαμηλές δεν υπάρχει κάποιο είδος επιφανειακής απορροής και το λιώσιμο γίνεται στην κάτω επιφάνεια των πάγων ή γίνονται αποσπάσεις κομματιών πάγου στις άκρες των παγετώνων. Σημαντικό για τον προσδιορισμό της συμμετοχής των πάγων, στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας είναι ότι η συσσώρευση προκαλεί κάποια μείωση της μάζας κατά 10% με αποτέλεσμα αντί η στάθμη να αυξάνει, να μειώνεται.

Αντιθέτως στην Γροιλανδία μπορεί να παρατηρήσει κανείς επιφανειακή απορροή, κατά την περίοδο του καλοκαιριού, αφού επικρατούν εκεί μεγαλύτερες, συγκριτικά με την Ανταρκτική, θερμοκρασίες. Η επιφανειακή απορροή αποτελεί το 50% των συνολικών απωλειών, ενώ το υπόλοιπο 50% οφείλεται και εδώ, στην απόσπαση κομματιών πάγου και την δημιουργία παγόβουνων που ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις μέχρι να λιώσουν. Σύμφωνα με νεότερες εκτιμήσεις υπερτερούν οι απώλειες αυτές των κατακρυσμισμών κατά 8% περίπου και προκαλείται έτσι μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 0.12 χιλ. τον χρόνο (Church, J.A. and Gregory, J.M. , 2001).

Μετρήσεις με τη βοήθεια Laser που έγιναν για την επιφάνεια των πάγων από αέρος, την δεκαετία του '90, απέδειξαν ότι σε περιοχές με υψόμετρο άνω των 2000 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας δεν παρατηρούνται σημαντικές ή σχεδόν καθόλου αλλαγές. Στις περιοχές κάτω από αυτό το υψόμετρο παρατηρήθηκε μια πτώση της επιφάνειας του πάγου



κατά 1 μέτρο το χρόνο σε περιοχές κοντά στις ακτές, πράγμα που προκαλεί μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 0.13 χιλ. το χρόνο, που αντιστοιχεί στο 7% της αύξησης που έχει παρατηρηθεί μέχρι σήμερα. Ωστόσο όμως η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.5 °C από το 1980 έως το 1990 μπορεί να εξηγήσει μόνο το 50% αυτής αύξησης. Το πιθανότερο αίτιο που προκάλεσε το υπόλοιπο 50% είναι η «παγοδυναμική», που είναι η αντίδραση των παγετώνων στην αλλαγή του κλίματος του παρελθόντος (Dahl-Jensen, D. –2000 και Krabill, W. ,W. Abdalati, E. Frederick, S. Manizada, C. Martin, J. Sonntag, R. Thomas, W. Wright, J. Yungel-2000-Greenland Ice Sheet).

2.4 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ανεξάρτητα από την αλλαγή του κλίματος και ο άνθρωπος επηρεάζει τη στάθμη της θάλασσας με τις δραστηριότητες του, οι οποίες οδηγούν σε ανακατανομή και επέμβαση στον κύκλο του νερού. Ο άνθρωπος επηρεάζει τόσο την πορεία του νερού στην επιφάνεια της γης, όσο και αυτή των υπόγειων υδάτων. Διάφορες δραστηριότητες, όπως άντληση υπόγειων υδάτων για άρδευση και ύδρευση, εκτροπή επιφανειακών υδάτων με σκοπό την άρδευση, αποξήλωση τροπικών δασών, αποξηράνσεις υδροβιότοπων και το σφράγισμα κατοικημένων περιοχών για διήθηση νερού που αυξάνει έτσι την επιφανειακή απορροή, προκαλούν μια θετική συμβολή στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Αντιθέτως η κατασκευή ταμιευτήρων για την συλλογή υδάτων μειώνει την συνολική απορροή στην θάλασσα.

Σε πολλά σημεία ανά τον κόσμο υπάρχουν μεγάλοι φυσικοί υπόγειοι ταμιευτήρες. Οι σημαντικότεροι είναι αυτοί κάτω από την έρημο Σαχάρα (ισοδυναμεί με μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 167 εκατ.), κάτω από τη Αραβική Χερσόνησο (140 εκατ.), στην περιοχή της Κασπίας Θάλασσας (61.2 εκατ.) και στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες (4.6 εκατ.). Κατά την άντληση υπόγειων υδάτων, για διάφορες ανθρωπογενής δραστηριότητες, το νερό φτάνει πιο εύκολα στη θάλασσα κυρίως λόγω της αυξημένης επιφανειακής απορροής ή και της εξάτμισης. Η συμβολή αυτής

της δραστηριότητας στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας υπολογίστηκε σε 0.1 έως 0.4 χιλ. το χρόνο.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα για την υπερεξάντληση των επιφανειακών υδατικών πόρων αποτελούν η Λίμνη της Αράλης και η Κασπία Θάλασσα, όπου τα τελευταία 100 χρόνια μειώθηκε η στάθμη τους κατά μερικά μέτρα! Η συμβολή της κατάχρησης των επιφανειακών υδατικών πόρων στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας, λαμβάνοντας υπόψη την θετική συμβολή της αυξημένης επιφανειακής απορροής και την αρνητική της συγκέντρωσης νερού σε επιφανειακούς ταμιευτήρες, υπολογίστηκε για τον 20^ο αιώνα σε 0.1 χιλ. το χρόνο.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω σημαντικό ρόλο παίζει και η αποξήλωση των τροπικών δασών, αφού έτσι καταστρέφεται ένας μεγάλος επιφανειακός φυσικός ταμιευτήρας. Η καταστροφή των δασών και η «σφράγιση» μεγάλων επιφανειών από τον άνθρωπο για την δημιουργία κατοικιών και την εξάπλωση των πόλεων συμβάλει στην αύξηση της επιφανειακής απορροής και ακολούθως στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας.

Οι τελευταίες εκτιμήσεις έδειξαν ότι η συμβολή των ανθρωπογενών επεμβάσεων στον κύκλο του νερού προκαλούν συνολικά μια αύξηση στην στάθμη της θάλασσας κατά 0.54 χιλ το χρόνο, δηλαδή μέχρι σήμερα έχουν προκαλέσει μια αύξηση 11.8 χιλ. (Sahagian, D. –2000).

Όμως είναι πιθανό, η παραπάνω αύξηση που έχει εκτιμηθεί να εξισορροπείται τελικά από την αποθήκευση νερού σε τεχνητούς επιφανειακούς ταμιευτήρες με σκοπό την άρδευση, την παραγωγή ενέργειας, την προστασία από πλημμύρες κ.τ.λ. Το νερό που αποθηκεύεται στους ταμιευτήρες και δεν καταλήγει στη θάλασσα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει την στάθμη της. Περίπου γνωστός είναι μόνο ο όγκος των μεγάλων ταμιευτήρων, που προσδιορίζεται από $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ έως $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$, δηλαδή αντιστοιχεί μια ισοδύναμη αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά -14 έως -28 χιλ. Είναι πολύ πιθανό όμως η συνολική ποσότητα αποθηκευμένου νερού σε τεχνητούς ταμιευτήρες, να είναι πολύ μεγαλύτερη από $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$. Πρέπει να τονιστεί ότι μόνο η πλήρωση νέων ταμιευτήρων επιδρά στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας, αρνητικά.



Εάν στο μέλλον θα κατασκευαστούν λιγότεροι ταμιευτήρες από ότι στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, κάτι που είναι πολύ πιθανό, θα προκληθεί εντός του 21^{ου} αιώνα μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 30% (Sahagian, D. –2000).

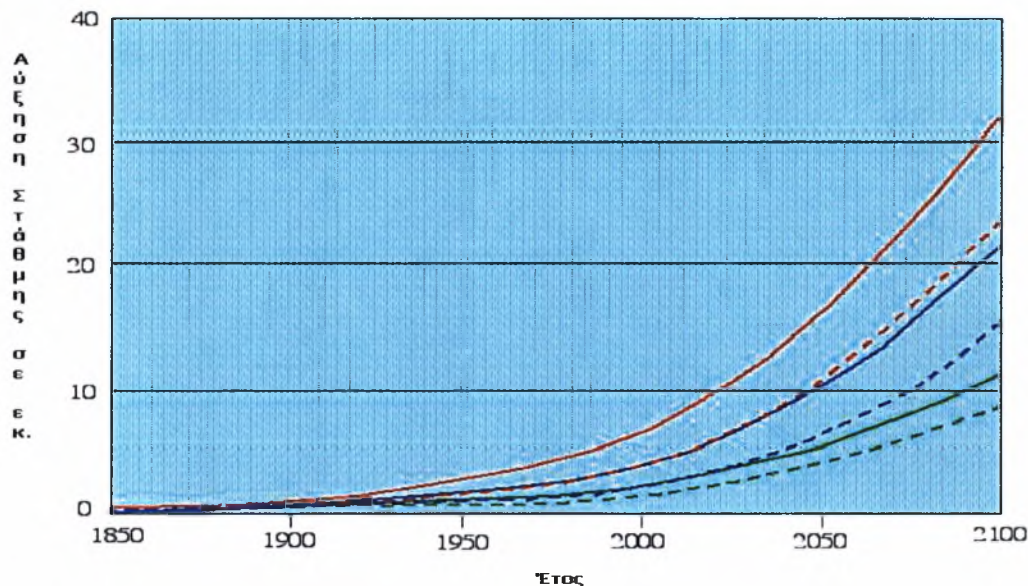
2.5 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ 21^ο ΑΙΩΝΑ

Σύμφωνα με το σενάριο IS92a (1992-έχει ξεπεραστεί!) της Παγκόσμιας Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος, όπου οι εκπομπές των βλαβερών αερίων στην ατμόσφαιρα δεν θα μειωθούν, θα αυξηθεί η στάθμη της θάλασσας μέχρι το 2100 περίπου 50 εκατοστά. Οι διαφορές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των διάφορων σεναρίων είναι μηδαμινές, λόγω της μακράς περιόδου αντίδρασης του ωκεανού στις κλιματικές αλλαγές. Αυτό όμως σημαίνει πως οι αλλαγές που συνέβησαν μέχρι σήμερα θα επηρεάζουν τη στάθμη της θάλασσας για πολλά ακόμη χρόνια.

Ο κύριος λόγος για την αύξηση της στάθμης της θάλασσας στον 21^ο αιώνα θα είναι η θερμική διαστολή του νερού της θάλασσας. Από την εφαρμογή διάφορων μαθηματικών μοντέλων για την περίοδο 1990 έως 2090, έχει εκτιμηθεί μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας, που οφείλεται στην θερμική διαστολή, κατά 28 εκατοστά, λαμβάνοντας υπόψη και τις εκπομπές θειικών και στερεών στην ατμόσφαιρα. Η παραπάνω εκτίμηση δείχνει και μια αυξανόμενη τάση της αύξησης το δεύτερο μισό του αιώνα.

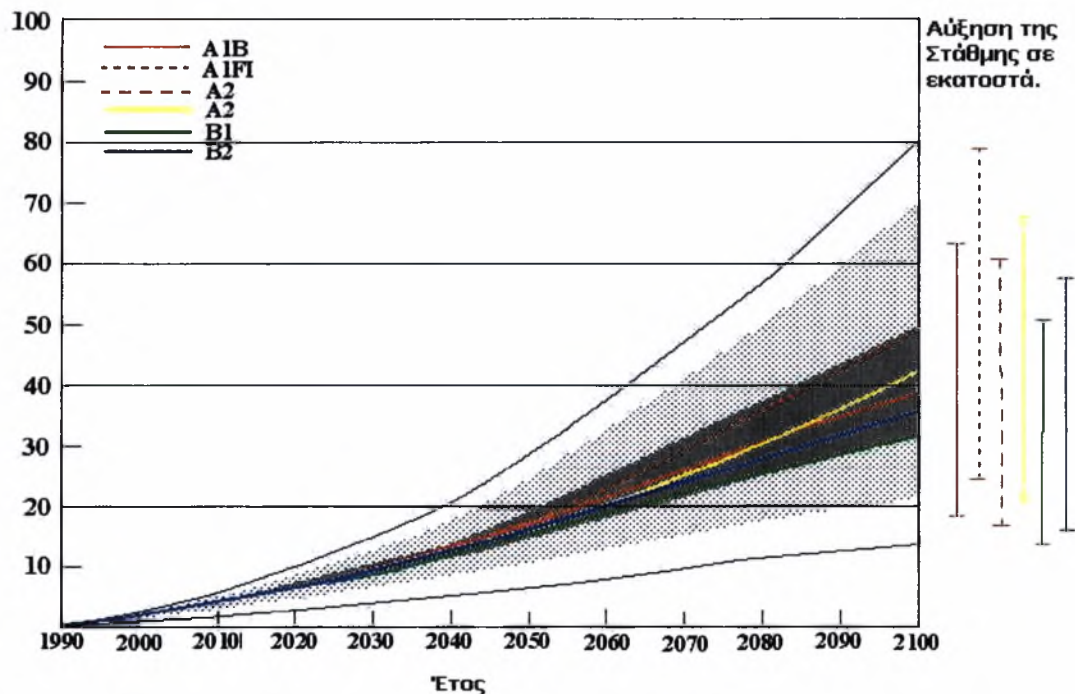
Όμοια μαθηματικά μοντέλα με το παραπάνω, εφαρμόστηκαν για να υπολογιστεί η συμβολή του λιώσιματος των παγετώνων στη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας. Έτσι προέκυψε ότι οι παγετώνες θα επηρεάσουν την στάθμη της θάλασσας αυξάνοντάς την κατά 16 εκατοστά.

Ο μεγάλος παγετώνας της Γροιλανδίας θα αυξήσει την στάθμη της θάλασσας μόνο κατά 6 εκατοστά, αφού έχει ληφθεί υπόψη η συσσώρευση της μάζας του στον πυρήνα του. Για τον λόγο της συσσώρευσης οι πάγοι της Ανταρκτικής όχι μόνο δεν θα αυξήσουν την στάθμη της θάλασσας, αλλά θα την μειώσουν κατά 1 εκατοστό.



Εικόνα 2.4: Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας έως το 2100 λόγω του λιώσιμου των πάγων(μπλε), πάγων Γροιλανδίας (πράσινο) και των δυο διεργασιών μαζί(κόκκινο), για το σενάριο IS92a IPCC (συνεχόμενες) και για την επιπλέον συμμετοχή εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα(διακεκομμένη). Εδώ δεν έχει ληφθεί υπόψη η συμμετοχή της θερμικής διαστολής της θάλασσας(20-30 cm) και της συσσώρευσης μάζας της Ανταρκτικής(περίπου -8 cm).

Πηγή: Gregory, J.M. and Oerlemans, J. (1998): Simulated future sea-level rise due to glacier melt based on regionally and seasonally resolved temperature changes, Nature, 391, 29. Jan.1998.



Εικόνα 2.5: Η μελλοντική αύξηση της στάθμης της θάλασσας από το 1990 έως το 2100 σύμφωνα με τα έξι βασικά σενάρια SRES. Η σκούρα γκριζα περιοχή δείχνει τις μέσες τιμές των 35 βασικών σεναρίων και η ανοιχτόχρωμη περιοχή το εύρος των υπολογισθέντων τιμών. Η άνω και η κάτω γραμμή δείχνουν τα ακρότατα. Στο πλάι φαίνεται το εύρος τιμών για το κάθε σενάριο.

Πηγή: Church, J.A. and Gregory, J.M. (2001): Changes in Sea Level, in: IPCC



Έτσι κατά μέσο όρο προκύπτει για το προαναφερθέν σενάριο μια συνολική αύξηση 49 εκατοστά της στάθμης για την περίοδο 1990 έως 2090 (Church, J.A. and Gregory, J.M.-2001 και Gregory, J.M. and Oerlemans, J. – 1998).

Επιπλέον θα πρέπει να προστεθεί μια ελάχιστη συμβολή από την μερική έστω απόψυξη εδαφών και πετρωμάτων αενάως παγωμένων. Επίσης θα πρέπει να προστεθούν και άλλα 5 εκατοστά που οφείλονται στην αντίδραση των παγετώνων σε παλαιότερες κλιματικές αλλαγές.

Η περιοχή αβεβαιότητας είναι όμως σχετικά μεγάλη και οφείλεται κυρίως στο ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη στο μαθηματικό μοντέλο πολύ αστάθμητοι παράγοντες, όπως η μελλοντική απορρόφηση θερμότητας των ωκεανών, οι χωρικές και ποσοτικές αλλαγές στους κατακρυσμνησμούς πάνω από τους παγετώνες και η δυναμική των πάγων που οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, σε παρελθοντικές κλιματικές αλλαγές.

Οι προαναφερθείσες τιμές για την αύξηση της στάθμης τον 21^ο αιώνα έχουν εκτιμηθεί με το σενάριο IS92a, που είναι από το 1992. Τα τελευταία χρόνια (2001), έχουν γίνει εκτιμήσεις χρησιμοποιώντας τα 40 νέα σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής, από όπου προέκυψαν, όμοια μεν διαφορετικά δε, αποτελέσματα. Όσον αφορά τα σενάρια αυτά που δημιουργήθηκαν το 2001, έχουν περιγραφεί παραπάνω στο κεφάλαιο 1^ο για την αλλαγή του κλίματος.

Με τα νέα σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής προέκυψε, μέσω μαθηματικών μοντέλων, αύξηση στη στάθμη της θάλασσας από 14 έως 80 εκατοστά από το 1990 έως το 2100, από όπου τελικά προέκυψε ο μέσος όρος των 47 εκατοστών.

Η αύξηση της στάθμης αναμένεται να μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή. Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα που έχουν εφαρμοστεί αναφέρουν την ελάχιστη αύξηση νότια του 60 °N παραλλήλου και την μέγιστη στον Ατλαντικό και Ινδικό Ωκεανό μεταξύ του 30 °N και του 60 °N παραλλήλου. Μερικά άλλα μοντέλα προβλέπουν την μέγιστη αύξηση της στάθμης στον Αρκτικό Ωκεανό.

2.6 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΕ ΜΑΚΡΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑ

Η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα μετά το έτος 2001, μπορεί μεν να θεωρηθεί δεδομένη, αλλά είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί ποσοτικά. Έτσι, μπορούν να γίνουν μόνο υποθέσεις για την αύξηση της στάθμης της θάλασσας στο μέλλον και ειδικά μετά το 2100. Όμως η θερμική διαστολή των ωκεανών που προκαλεί αύξηση της στάθμης, είναι σίγουρο ότι θα συνεχίζει να επηρεάζει τη στάθμη και στο μακρινό μέλλον, αφού ακόμη και μετά από μια ενδεχόμενη σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των βλαβερών αερίων στην ατμόσφαιρα, το κλίμα θα συνεχίζει να αλλάζει για πολλά χρόνια ακόμη.

Σύμφωνα με το σενάριο IS92a («δεν αλλάζει τίποτε»), θα διπλασιαστεί η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (540 ppm) πριν το 2100 και θα αυξηθεί η στάθμη της θάλασσας λόγω της θερμικής διαστολής κατά 10-20 εκατοστά. Εάν τώρα υποθέσει κανείς ότι θα σταθεροποιηθεί και θα παραμείνει σταθερή η συγκέντρωση στα 540 ppm, θα αυξηθεί παρόλα αυτά η στάθμη της θάλασσας τα επόμενα 500 χρόνια από 50 έως 100 εκατοστά. Σε περίπτωση που τετραπλασιαστεί η συγκέντρωση του διοξειδίου στην ατμόσφαιρα εντός των επομένων 140 ετών και μετά επέλθει μια σταθεροποίηση του, θα μπορούσε και μόνο η θερμική διαστολή να προκαλέσει μια αύξηση κατά 100 έως 400 εκατοστά στην επόμενη χιλιετία (Church, J.A. and Gregory, J.M.-2001).

Οι πάγοι στους πόλους αναμένεται τον 21^ο αιώνα να αντιδράσουν πιο έντονα στην εκπομπή αερίων στην ατμόσφαιρα από τον άνθρωπο. Αυτό αναμένεται να γίνει τον 22^ο αιώνα, ακόμη και εάν σταματήσει η «θέρμανση του πλανήτη».

Εκτιμάτε ότι στην περίπτωση συνεχιζόμενης «θέρμανσης» του πλανήτη θα αντιδράσουν πιο ευαίσθητα οι πάγοι στην Γροιλανδία. Στην περίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας κατά 3 °C πάνω από την Γροιλανδία, θα λιώσουν οι πάγοι της περιοχής ολοκληρωτικά σε μια σχετικά μακρά περίοδο. Σε περίπτωση που υπάρξει μια αύξηση της τάξης των 8 °C, θα λιώσουν οι πάγοι εντός 1500 ετών, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που

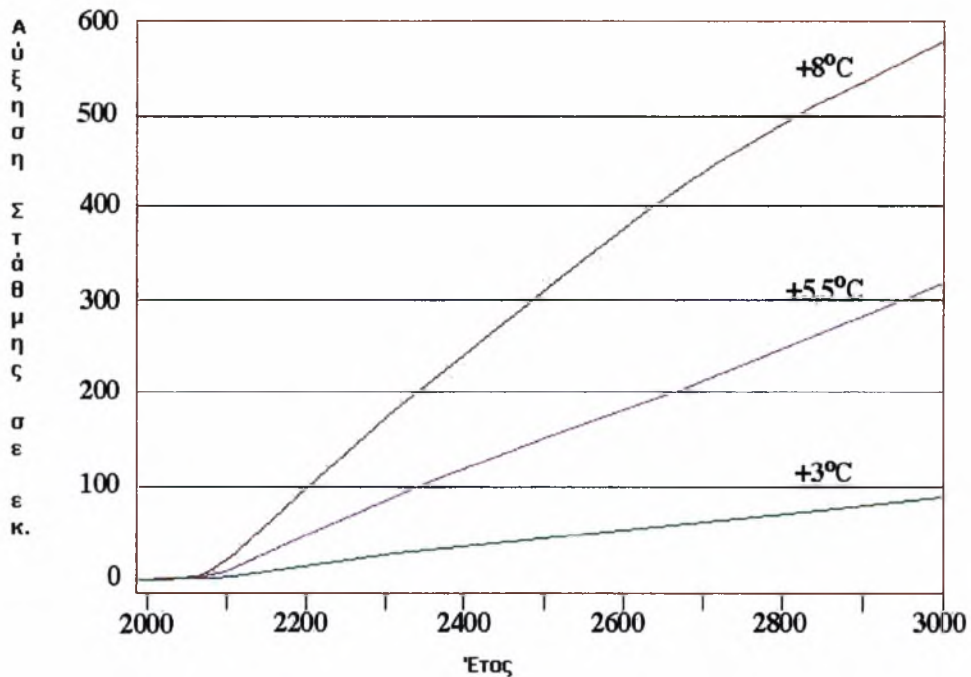


προέκυψαν από υπολογισμούς με μαθηματικά μοντέλα. Η αντιστοιχία αυτής της περίπτωσης ισοδυναμεί με μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 720 εκατοστά!

Όσον αφορά την Δυτική Ανταρκτική, γίνεται μεγάλη συζήτηση για τη σταθερότητα των παγωμένων μαζών που αριθμούν 3.8 εκατομμύρια km^3 . Εάν οι πάγοι εκεί λιώσουν ολοκληρωτικά, αυτό θα ισοδυναμούσε με μια αύξηση της στάθμης κατά 400 έως 600 εκατοστά. Η περιοχή της Δυτικής Ανταρκτικής είναι η πιο δυναμική ολόκληρης της Ανταρκτικής. Το μεγαλύτερο μέρος των πάγων βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ενώ κοντά στις άκρες οι πάγοι επιπλέουν. Ο πάγος που εδράζει τον πυθμένα της θάλασσας, και βρίσκεται κυρίως στο εσωτερικό της ηπείρου, μετακινείται σχετικά γρήγορα μέσω παγωμένων ποταμών προς την ακτή-άκρη. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ ασταθές. Θα μπορούσε για παράδειγμα να εισχωρήσει νερό σε υγρή μορφή κάτω από τον ρέοντα πάγο και να μειώσει την σταθερότητα αυτών των εδαφών, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα ροής του παγωμένου ποταμού. Η ταχύτητα αυτή είναι πιθανό να επηρεαστεί αν λιώσουν οι επιπλέοντες πάγοι λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της θάλασσας.

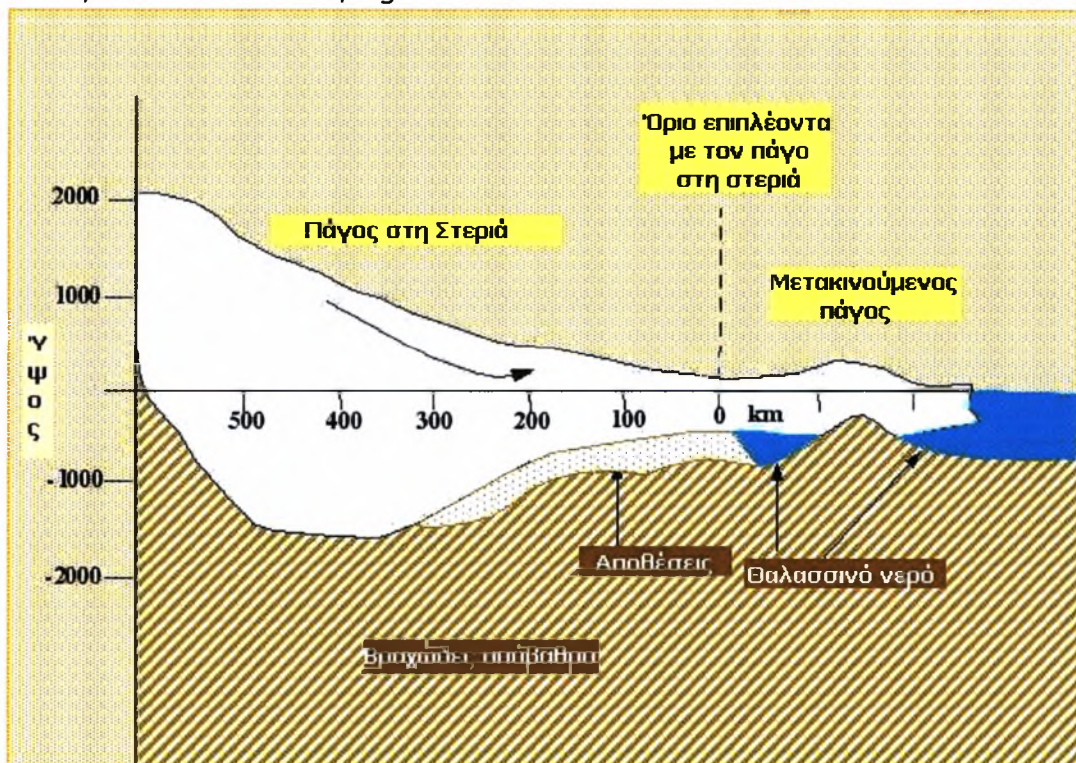
Το στρώμα πάγου της Δυτικής Ανταρκτικής ήταν στο παρελθόν πολύ μεγαλύτερο, αφού εκτιμάται ότι έχει μειωθεί από την προηγούμενη παγετώδη περίοδο στο ένα τρίτο της αρχικής του έκτασης. Η μείωση αυτή ισοδυναμεί με μια αύξηση της στάθμης κατά 1100 εκατοστά (R. Bindshalder – 1998). Κατά το προηγούμενο διάστημα μεταξύ δυο εποχών των παγετώνων, όπου η μέση θερμοκρασία του πλανήτη ήταν μόνο 2 °C υψηλότερη από σήμερα, έλιωσε ένα μεγάλο μέρος του στρώματος πάγου της Ανταρκτικής που ήταν και ο βασικός λόγος για την αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 6 μέτρα που συνέβη τότε (Oppenheimer, M. –1998.)

Σήμερα παρατηρούνται κατά διαστήματα τοπικά σημαντικές αλλαγές στην Ανταρκτική, δεν υπάρχει όμως κάποια εμπεριστατωμένη έρευνα που να βασίζεται σε παρατηρήσεις και να επιβεβαιώνει την συμμετοχή των αλλαγών αυτών στην τωρινή αύξηση της στάθμης της θάλασσας.



Εικόνα 2.6: Η συμμετοχή των πάγων της Γροιλανδίας στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας στην περίπτωση τριών σεναρίων αλλαγής του κλίματος στην Τρίτη χιλιετία. Το μαθηματικό μοντέλο υποθέτει την αύξηση των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα μέχρι το 2130 και έπειτα την σταθεροποίησή τους.

Πηγή: Huybrechts, P. and J.De Wolde (1999): The dynamic response of the Greenland and Antarctic ice sheets to multiple-century climatic warming, *Journal of Climate*, 12, 2169-2188; Church, J.A. and Gregory, J.M. (2001): Changes in Sea Level, in: IPCC WG1 TAR, Fig.11.16



Εικόνα 2.7: Τομή του στρώματος πάγου της δυτικής Ανταρκτικής(τυποποιημένη).

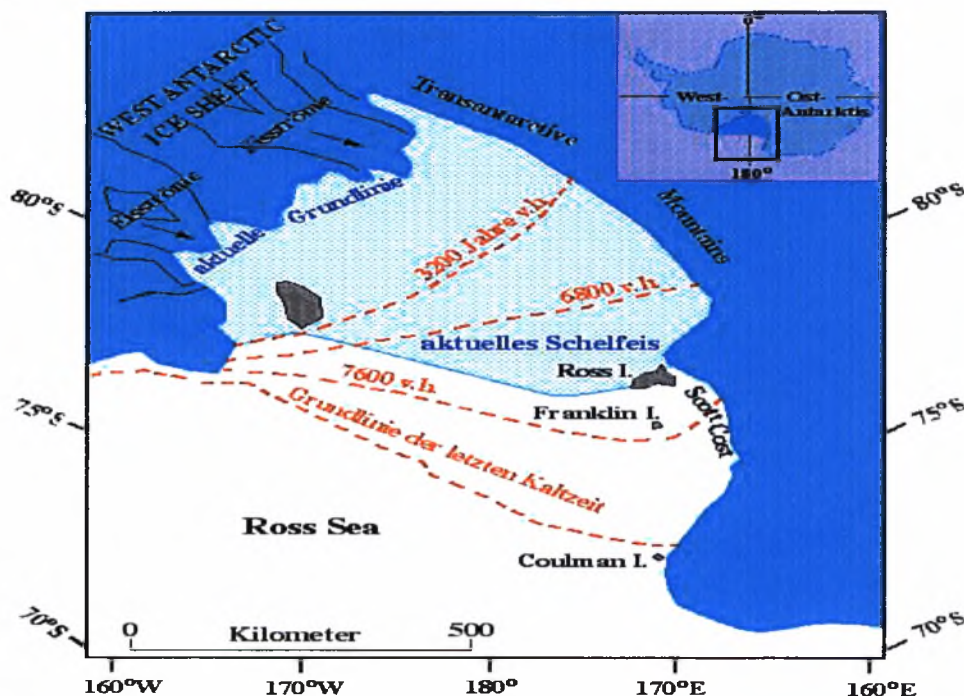
Πηγή: Oppenheimer, M. (1998): Global warming and the stability of the West Antarctic Ice Sheet, *Nature*, 393, 325-332



Μεμονωμένες έρευνες εκτιμούν, ότι οι διάφορες αυτές διεργασίες συμβάλλουν στην αύξηση κατά 0.9 χιλ. το χρόνο. Ανάγοντας το αυτό στο μέλλον σημαίνει ότι το στρώμα πάγου θα εξαφανιστεί στα επόμενα 4000 έως 7000 χρόνια (R. Bindshalder – 1998).

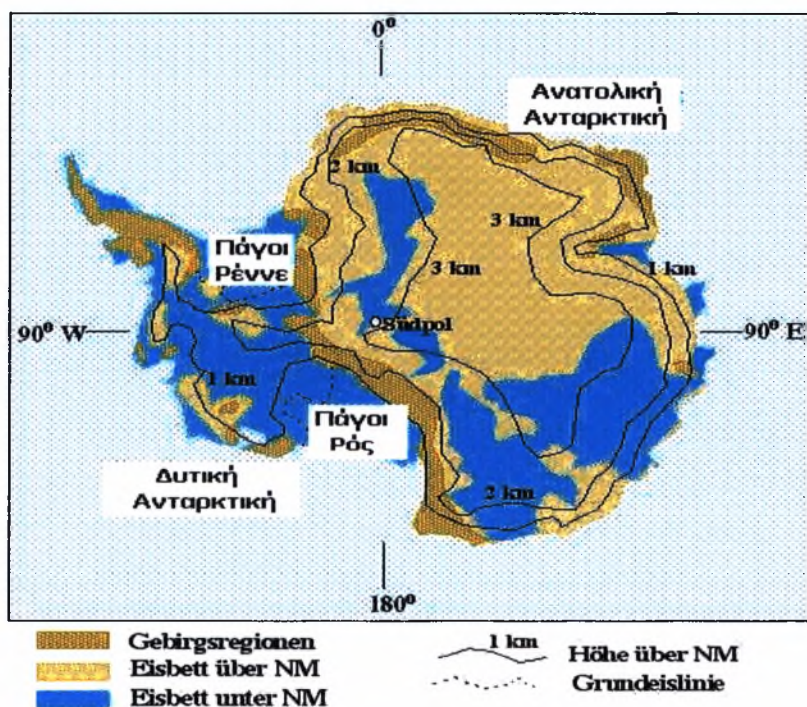
Οι πρόσφατες θεαματικές αποσπάσεις παγόβουνων στην Ανταρκτική, όπως αυτή του παγόβουνου Larsen, δείχνει ότι το στρώμα πάγου κινδυνεύει και από τοπικές θερμοκρασιακές μεταβολές. Όμως οι πάγοι στην Δυτική Ανταρκτική θα κινδύνευαν πραγματικά, μόνο στην περίπτωση όπου θα είχαμε ετήσια μέση θερμοκρασία $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ και μέση θερμοκρασία το καλοκαίρι $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τώρα η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι -15 έως $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η θερμοκρασία το καλοκαίρι φτάνει τους $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ως εκ τούτου όλοι σχεδόν οι επιστήμονες συμφωνούν ότι το στρώμα πάγου της Δυτικής Ανταρκτικής δεν κινδυνεύει για τα επόμενα τουλάχιστο 100 χρόνια, με αποτέλεσμα να μην συμβάλλει στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Σύμφωνα με μια ομάδα επιστημόνων η πιθανότητα να συμβάλουν οι πάγοι στην αύξηση της στάθμης κατά 10 χιλ. το χρόνο, είναι 2%, ενώ η πιθανότητα να συμβάλλουν με 2 χιλ. είναι 10% (Church, J.A. and Gregory, J.M.-2001).

Σε αντίθεση με την Δυτική Ανταρκτική, στην Ανατολική Ανταρκτική δεν υπάρχει κίνδυνος για τον λιώσιμο των πάγων. Το στρώμα του πάγου, εκεί κινδυνεύει μόνο από το λιώσιμο της επιφάνειάς του, πράγμα που για να συμβεί πρέπει να επικρατήσουν θερμοκρασίες $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ υψηλότερες από αυτές που επικρατούν τώρα. Αυτό έχει να συμβεί 15 εκατομμύρια χρόνια, άρα είναι πολύ απίθανο. Έστω όμως και να συνέβαινε το λιώσιμο το πάγου θα διαρκούσε τουλάχιστο 10 000 χρόνια!



Εικόνα 2.8: Οπισθοχώρηση ακτογραμμής από την τελευταία παγετώδη περίοδο στη θάλασσα Ross.

Πηγή: Conway, H., B.L. Hall, G.H. Denton, A.M. Gades (1999): Past and Future Grounding-Line Retreat of the West Antarctic Ice Sheet, Science, 286, 280-283



Εικόνα 2.9: Η Ανταρκτική. Το στρώμα πάγου της Δυτικής Ανταρκτικής βρίσκεται δυτικά του Διανταρκτικού Όρους και κάτω από τη στάθμη της θάλασσας παγωμένο στον βυθό της.

Πηγή: R. Bindshadler (1998): Future of the Westantarctic Ice Sheet, Science 282, 428-429 und Oppenheimer, M. (1998): Global warming and the stability of the West Antarctic Ice Sheet, Nature, 393, 325-332



3. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

3.1 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Είναι σχετικά απροσδιόριστο το πόσο και εάν θα επηρεαστούν οι παράκτιες περιοχές από την αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Ο βαθμός με τον οποίο θα επηρεαστεί κάποια περιοχή εξαρτάται από την μορφολογία της και από την δυνατότητα προσαρμογής της στις αλλαγές. Οι δυνατότητες προσαρμογής ωστόσο των φυσικών συστημάτων στις αλλαγές, θα εξαρτηθούν σε πολλές περιπτώσεις και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες που αναπτύσσονται στις παράκτιες.

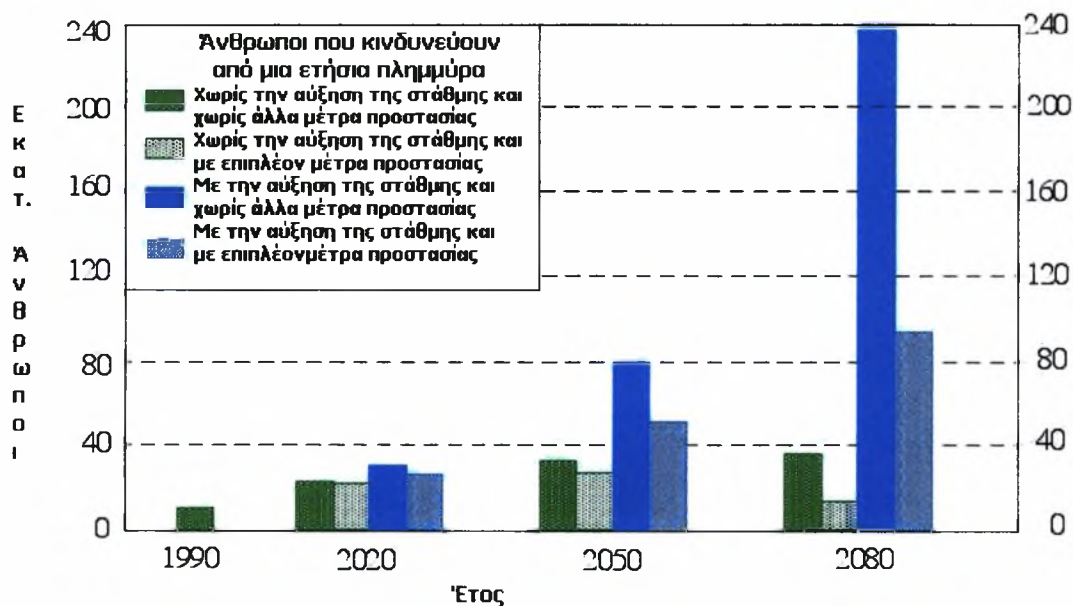
Πολλά κράτη ενδεχομένως να προσπαθήσουν με διάφορα μέτρα πρόληψης να περιορίσουν την μετατόπιση της ακτογραμμής. Ωστόσο τα μέτρα αυτά είναι αντιοικονομικά και οι οικονομίες πολλών φτωχών κρατών δεν μπορούν να σηκώσουν αυτό το βάρος. Δε θα δοθεί καν η δυνατότητα σε ορισμένα κράτη να αμυνθούν ενάντια στα κοινωνικοοικονομικά αποτελέσματα που θα προκαλέσει αυτή η αύξηση. Τα αποτελέσματα αυτά θα επηρεάσουν πολλούς τομείς όπως τον τουρισμό, εάν για παράδειγμα εξαφανιστούν ολόκληρες ακτές από τη διάβρωση ή δημιουργηθούν προβλήματα στην υδροδότηση και στην ποιότητα του πόσιμου νερού από την υφαλμύρωση. Η γεωργική οικονομία θα πληγεί επίσης αφού θα χαθούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις ή θα μετατραπούν σε μη καλλιεργήσιμες λόγω της αυξημένης αλατότητάς τους. Επίσης θα επηρεαστούν και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες ή ακόμη και οι ίδιες ανθρώπινες ζωές από φαινόμενα όπως πλημμύρες και πιο έντονες καταιγίδες. Οι ανθρώπινες ζωές που αναμένεται να κινδυνεύουν τον 21^ο αιώνα από τις πλημμύρες θα είναι και εκτός αυτού περισσότερες λόγω της αύξησης του πληθυσμού της γης. Οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο είναι κράτη με χαμηλό υψόμετρο και κυρίως νησιωτικές χώρες, αλλά και περιοχές κοντά σε δέλτα ποταμών. Στις



περιοχές αυτές το κόστος αντιμετώπισης του φαινομένου θα είναι ακόμη υψηλότερο.

Την δεκαετία του 1990 ζούσε το 21% του ανθρώπινου πληθυσμού σε περιοχές κοντά στις ακτές (σε απόσταση 30 km από την ακτογραμμή). Ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού σε αυτή την περιοχή είναι διπλάσιος σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο. Δέκα εκατομμύρια άνθρωποι ζούσαν το 1990 σε παράκτιες περιοχές που κινδύνευαν από μια ετήσια πλημμύρα. Στις αναπτυγμένες χώρες τέτοιες περιοχές προστατεύονται από προστατευτικά αναχώματα και φράγματα. Στις αναπτυσσόμενες χώρες ωστόσο πολλοί άνθρωποι είναι εκτεθειμένοι σε τακτικά πλημμυρικά φαινόμενα, που καταστρέφουν τις κατοικίες τους, προκαλούν τεράστιες οικονομικές απώλειες και σε πολλές περιπτώσεις ακόμη και νεκρούς. Το ρίσκο αυτό αυξάνεται με την υπεράντληση υπόγειων υδάτων που προκαλεί καθιζήσεις στη επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό πολύ έντονα στις περιοχές της Οσάκα, του Τόκιο και της Σαγκάης, όπου η καθίζηση ήταν της τάξης των μερικών μέτρων (Nicholls, J.R., F.M.J. Hoozemans and M. Marchand –1999).

Σύμφωνα με υπολογισμούς, εκτιμήθηκε ότι το 2080 με την αύξηση του πληθυσμού, θα είναι εκτεθειμένοι σε πλημμύρες 575 εκατομμύρια άνθρωποι που κατοικούν σε μεγάλες παράκτιες πόλεις, χωρίς να συνυπολογιστεί η αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Εάν υποθεθεί μια αύξηση της στάθμης κατά 38 εκατοστά (Nicholls, J.R., F.M.J. Hoozemans and M. Marchand – 1999), έως το 2080, ο αριθμός αυτός γίνεται 630 έως 640 εκατομμύρια άνθρωποι, δηλαδή θα επηρεάσει κατά 10% περισσότερους ανθρώπους! Τα 10 εκατομμύρια άνθρωποι που κινδύνευαν το 1990 από μια ετήσια πλημμύρα, θα γίνουν το 2080, 36 εκατομμύρια χωρίς να συνυπολογίσει κανείς την αύξηση της στάθμης. Στην περίπτωση που πραγματοποιηθεί η κατασκευή προστατευτικών έργων στις ακτές, ο αριθμός των ανθρώπων που κινδυνεύουν θα είναι έως το 2050 27 εκατομμύρια και θα μειωθεί έως το 2080 στα 13 εκατομμύρια.



Εικόνα 3.1: Πληθυσμός που κινδυνεύει από πλημμύρες κάθε έτος για διάφορα σενάρια. Πράσινο σκούρο: χωρίς αύξηση της στάθμης και χωρίς προστασία ακτών, Πράσινο ανοιχτό: χωρίς αύξηση στάθμης και με καλύτερη προστασία ακτών, Μπλε σκούρο: με αύξηση της στάθμης και χωρίς καλύτερη προστασία ακτών, Μπλε ανοιχτό: με αύξηση της στάθμης και με καλύτερη προστασία ακτών.

Πηγή: Nicholls, J.R., F.M.J. Hoozemans and M. Marchand –1999- Increasing risk and wetland loose due to global sea level rise: regional and global analyses, Global Environmental Change 9, 69-87.



Εικόνα 3.2: Περιοχές που κινδυνεύουν από την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας κατά 38 εκατοστά έως το 2080 (εκατομμύρια άνθρωποι το χρόνο).

Πηγή: Nicholls, J. R., F. M. J. Hoozemans and M. Marchand-1999- Increasing risk and wetland loose due to global sea level rise: regional and global analyses, Global and Environmental Change 9, 69-87.



Στην περίπτωση που συνυπολογιστεί και η αύξηση της στάθμης ο αριθμός τους αναμένεται να τετραπλασιαστεί έως το 2080, δηλαδή χωρίς έργα προστασίας 237 εκατομμύρια και με έργα 93 εκατομμύρια άνθρωποι.

3.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΤΟΠΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η πλειονότητα του πληθυσμού που κινδυνεύει από πλημμύρες είναι συγκεντρωμένη σε λίγες περιοχές της γης, όπως: στην περιοχή της νότιας Μεσογείου, στην δυτική και ανατολική Αφρική και στην νότια και νοτιοανατολική Ασία. Σε αυτές τις πέντε περιοχές θα συγκεντρωθεί μελλοντικά το 90% του πληθυσμού που θα επηρεάζονται από πλημμύρες με συχνότητα επανεμφάνισης πάνω από ένα έτος. Οι περισσότεροι από αυτούς τους ανθρώπους, περίπου το 40%, θα κατοικεί στην νότια Ασία. Στην Ασία βρίσκονται οι περισσότερες πυκνοκατοικημένες περιοχές κοντά σε δέλτα ποταμών, που βρίσκονται σε υψόμετρο χαμηλό σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας. Εκτός από τη νότια Ασία, μεμονωμένες παρόμοιες τέτοιες περιοχές υπάρχουν και στην νοτιοανατολική Ασία, στη Κίνα και στην νότια Αφρική. Οι πιο επιρρεπείς περιοχές στην ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, είναι τα μικρά νησιωτικά κράτη της Καραϊβικής και του Ινδικού και Ειρηνικού Ωκεανού. Ο αριθμός των ανθρώπων εδώ που θα κινδυνεύουν από μια πλημμυρά, με περίοδο επανεμφάνισης ενός έτους, θα είναι κατά 50 φορές μεγαλύτερος από ότι σήμερα, ακόμη και αν ληφθούν μέτρα προστασίας.

3.2.1 ΕΥΡΩΠΗ

Τα περισσότερα πληθυσμιακά και οικονομικά κέντρα της Ευρώπης είναι συγκεντρωμένα σε παραθαλάσσιες περιοχές. Ορισμένες περιοχές, όπως μεγάλα τμήματα της Ολλανδίας, η περιοχή Φένς της Αγγλίας και η πεδιάδα του Πάδου στην Ιταλία βρίσκονται σήμερα ήδη κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Υπάρχουν όμως και άλλες περιοχές που έχουν να αντιμετωπίσουν πλημμύρες από τη θάλασσα, όπως η Βενετία τα Χανιά και πολλά νησιά της Ελλάδας. Η θωράκιση αυτών των περιοχών κοστίζει πάρα



πολλά χρήματα και σίγουρα στο μέλλον θα παίξει μεγάλο ρόλο στον ετήσιο προϋπολογισμό των κρατών όπου βρίσκονται. Σήμερα ωστόσο, οι περισσότερες περιοχές της Ευρώπης που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο, είναι επαρκώς προστατευμένες για την περίπτωση μιας ήπιας αύξησης της στάθμης. Σε μερικές περιοχές της Ευρώπης άλλωστε, η αύξηση της στάθμης έχει συνυπολογιστεί στην Ακτομηχανική τους. Έτσι για παράδειγμα στην Ολλανδία και στην Μεγάλη Βρετανία έχουν προσχεδιάσει την οπισθοχώρηση της ακτογραμμής, δίνοντας έτσι χώρο στην θάλασσα να εκτονωθεί σε περίπτωση καταιγίδων. Τα επόμενα χρόνια, δεν θα υπάρξουν προβλήματα στην αντιμετώπιση του φαινομένου της αύξησης της στάθμης της θάλασσας στην Ευρώπη. Η Ευρώπη είναι η μια ήπειρος με μακρά ιστορία στην Ακτομηχανική και εκτός αυτού παρουσιάζει οικονομική ευημερία μπορώντας έτσι να αντιμετωπίσει επί το πλείστον το πρόβλημα.

Χώρα	Πληθυσμός που Κινδυνεύει		Απώλεια Αξίας		Απώλεια Εδαφών		Απώλεια Υγροβιότοπων
	Αριθμός σε χιλιάδες	σε %	ΕΚΑΤ. US\$	% ΤΟΥ Α.Ε.Π.	km ²	σε %	km ²
Ολλανδία	3600	24	186000	69	2165	6,7	642
Γερμανία	309	0,3	7500	0,05	13900	3,9	2000
Πολωνία	196	0,5	22000	24	1700	0,5	?

Πίνακας 3.1: Επιπτώσεις σε μερικά Ευρωπαϊκά κράτη λόγω της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας κατά 1 μέτρο. Η στήλη της απώλειας αξίας σε εκατομμύρια δολάρια αναφέρεται σε τιμές του 1990.

Πηγή: Nicholls, J.R. and N. Mimura –1999- Increasing flood risk and wetland losses due to global sea level rise: regional and global analyses, Global Environmental Change 9, 69-87

3.2.2 ΑΦΡΙΚΗ

Σε αντίθεση με την Ευρώπη, στην Αφρική η προστασία των ακτών είναι ελάχιστα εξελιγμένη. Έρευνες για τη Σενεγάλη, το Μπενίν και τη Νιγηρία προσδιόρισαν ποιες θα ήταν οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις σε σχέση με την κοινωνικοοικονομική κατάσταση αυτών των χωρών, το 1990, για μια αύξηση της στάθμης κατά 1 μέτρο (Nicholls, J.R. and N. Mimura – 1998 και Jallow, B.P., S. Toure, M.M.K. Barrow and A.A. Mathieu –1999). Στα παραπάνω τρία κράτη αναμένεται να χαθούν μεγάλες εκτάσεις γης, κυρίως



υδροβιότοποι που βρίσκονται σε δέλτα ποταμών, σε εκβολές ποταμών και σε λιμνοθάλασσες. Στη Σενεγάλη θα καταστρέφονταν μεγάλες τουριστικές εγκαταστάσεις, ενώ 180000 άνθρωποι θα μείνουν άστεγοι. Στις πυκνοκατοικημένες παραθαλάσσιες περιοχές του Μπενίν, 1.35 εκατομμύρια άνθρωποι θα έχαναν το σπίτι τους, δηλαδή το 25% όλου του πληθυσμού, ενώ στην Νιγηρία ο αριθμός τους εκτιμάτε σε 3.5 εκατομμύρια. Θα ήταν δυνατόν, τουλάχιστο στη Νιγηρία, ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων να προστατευτεί με τα κατάλληλα έργα προστασίας. Περίπου 600000 άνθρωποι που ζουν στο δέλτα του Νίγηρα, θα έπρεπε μετεγκατασταθούν, αφού εκεί τα διάφορα έργα προστασίας όπως φράγματα και αναχώματα απαιτούν μοντέρνα τεχνολογία, τεχνογνωσία και ένα υπέρογκο ποσό χρημάτων!

Αντίστοιχα αποτελέσματα θα είχαμε στην Γάμπια και στην Ακτή του Ελεφαντοστού, κυρίως πέριξ της πρωτεύουσας του Abidjan (Jallow, B.P., S. Toure, M.M.K. Barrow and A.A. Mathieu –1999). Για μια αύξηση της στάθμης κατά 1 μέτρο θα πλημμυρίζαν στην Γάμπια 92km² και στην Ακτή του Ελεφαντοστού 563km². Η μεγαλύτερη απώλεια γης θα παρατηρούνταν στην περιοχή του Abidjan, αφού εκεί η περιοχή αποτελείται από λιμνοθάλασσες και περιοχές με αρκετά χαμηλό υψόμετρο. Στην Γάμπια η μισή από την πλημμυρισμένη περιοχή θα βρισκόταν στην περιοχή των εκβολών του ποταμού Γάμπια. Στην Γάμπια η κατάσταση θα ήταν κρίσιμη γιατί η πρωτεύουσα Banjul βρίσκεται επί το πλείστον, κάτω από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας και μια ενδεχόμενη αύξηση του 1 μέτρου θα απαιτούσε την εγκατάλειψή της. Έτσι και στο Abidjan θα έπρεπε να εγκαταλειφθεί ή να επανακατασκευαστεί το αεροδρόμιο και το λιμάνι της πόλης από όπου διακινούνται το 60% των εξαγωγών της χώρας.

Καταστροφικά αποτελέσματα θα είχε μια ενδεχόμενη αύξηση και για το δέλτα του Νείλου, όπου βρίσκονται οι δυο μεγαλουπόλεις Αλεξάνδρεια και Port Said (El Raey, K. Dewidar and M. El Hattab-1999). Το δέλτα του Νείλου βρίσκεται βόρεια του Καΐρου και καταλαμβάνει το 2.3% της έκτασης της Αιγύπτου.

Παράκτια Περιοχή	20 cm/αιώνα	50 cm/ αιώνα	100 cm/ αιώνα
Γάμπια	4,96 km ²	45,89 km ²	92,32 km ²
Περιοχή Abidjan	112,5 km ²	281,3 km ²	562,5 km ²

Πίνακας 3.2: Απώλειες γης για διάφορα σενάρια αύξησης της στάθμης της θάλασσας.

Πηγή: Jallow, B.P., S. Toure, M.M.K. Barrow and A.A. Mathieu –1999- Coastal zone of the Gambia and the Abidjan region in Cote d'Ivoire: sea level rise vulnerability, response strategies, and adaption options, Climate Research 12. 129-136.

Εκεί όμως βρίσκεται το 40% της καλλιεργήσιμης έκτασης της χώρας και το 50% του πληθυσμού της. Η Αλεξάνδρεια είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Αιγύπτου (4 εκατ. Κάτοικοι) και έχει το μεγαλύτερο λιμάνι της χώρας και το 40% του βιομηχανικού δυναμικού της. Προς τη θάλασσα υπάρχει μια παραλιακή αμμώδης λωρίδα πλάτους 63 km που την αποκόπτει από την θάλασσα. Η πόλη είναι χωροθετημένη σε μια παράκτια περιοχή και μερικές συνοικίες της βρίσκονται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, όντας προστατευμένες από την εισχώρηση υδάτων με φυσικά ή τεχνητά φράγματα. Το 45% του πληθυσμού της πόλης, το 54% των βιομηχανιών και το 45% των υπηρεσιών βρίσκονται σε περιοχές κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Εάν δεν ληφθούν σύντομα κάποια μέτρα αντιμετώπισης, για μια αύξηση της στάθμης κατά 50 εκατ., μόνο, το 67% του πληθυσμού της πόλης θα μένει σε περιοχές κατακλυσμένες από νερό. Επίσης το 66% των βιομηχανιών και το 76% των υπηρεσιών θα πλημμύριζαν, πράγμα που θα σήμαινε μια τεράστια απώλεια θέσεων εργασίας.

Αύξηση της Στάθμης της Θάλασσας σε cm (Έτος)	18 (2010)	30 (2025)	50 (2050)
Απώλεια Περιοχών (km ²)	11,4	19,0	31,7
Άστεγος Πληθυσμός	252 000	545 000	1 512 000
<i>Απώλεια Θέσεων Εργασίας:</i>			
Γεωργία	1 370	3 205	8 812
Τουρισμός	5 737	12 323	33 919
Βιομηχανία	24 400	54 936	151 200
Θέσεις Εργασίας Συνολικά	32 507	70 465	195 443

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα, διάφορων σεναρίων αύξησης της στάθμης της θάλασσας, για την Αλεξάνδρεια.

Πηγή: El Raey, K. Dewidar and M. El Hattab-1999- Adaption to the impacts of sea level rise in Egypt, Climate Research 12, 117-128



Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι επιπτώσεις μιας αύξησης της στάθμης για την Αφρική, εάν ληφθεί υπόψη η έντονη αύξηση του πληθυσμού στις παράκτιες περιοχές. Οι επτά παραλιακές πόλεις με πληθυσμό πάνω από 1 εκατομμύριο κατοίκους, από την Ραμπάτ στο Μαρόκο έως την Λουάντα στην Αγκόλα, είχαν, το 1990, έναν συνολικό πληθυσμό που ανέρχεται στα 21 εκατομμύρια. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Ο.Η.Ε. ο πληθυσμός αυτός θα φτάσει το 2010 τα 51 εκατομμύρια. Ιδιαίτερα σημαντική θα είναι η αύξηση του πληθυσμού του Λάγκος στην Αγκόλα, όπου ο πληθυσμός από 8 εκατομμύρια θα φτάσει τα 21 εκατομμύρια, ανήκοντας έτσι σε μια από τις 10 μεγαλύτερες πόλεις του κόσμου. Οι επιπτώσεις λοιπών, μιας αύξησης της στάθμης της θάλασσας, θα παίξουν και μόνο λόγω της εκτίναξης των πληθυσμών των παραλιακών αυτών περιοχών, τον 21^ο αιώνα, πολύ σημαντικό κοινωνικοπολιτικό ρόλο.

3.2.3 ΝΟΤΙΑ, ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΑΣΙΑ

Σε αυτή την περιοχή της γης βρίσκονται κράτη με τα πιο πυκνοκατοικημένα δέλτα ποταμών, που στην περίπτωση μιας αύξησης της στάθμης της θάλασσας, θα είχαν να αντιμετωπίσουν πολλά προβλήματα. Τα κράτη που θα αντιμετωπίσουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις είναι το Μπαγκλαντές, η Ινδία, η Κίνα και η Ταϊλάνδη. Η αστικοποίηση στις ακτές αυτών των χωρών είναι ακόμη πιο έντονη από ότι στην δυτική Αφρική. Σύμφωνα με προγνώσεις αναμένεται έως το 2010 να «φυτρώσουν» στις ακτές αυτών των περιοχών 13 μεγαλουπόλεις, που ο πληθυσμός της κάθε μιας θα είναι πάνω από 8 εκατομμύρια. Σε πολλές από αυτές τις πόλεις οι κάτοικοι αντιμετωπίζουν, ήδη, προβλήματα καθιζήσεων λόγω της υπεράντλησης υπόγειων υδάτων. Το φαινόμενο έχει προκαλέσει και στο παρών μια σχετική «αύξηση της στάθμης της θάλασσας» (ουσιαστικά καθίζηση του εδάφους). Στο Τόκιο, στην Οσάκα και στην Σαγκάη παρατηρήθηκαν καθιζήσεις της τάξης των 5 μέτρων, πράγμα που οδήγησε στην κατασκευή προστατευτικών αναχωμάτων και φραγμάτων για την προστασία των περιοχών από το νερό.

Κράτος	Αύξηση Στάθμης	Απώλεια γης		Αστεγος Πληθυσμός	
	cm	km ²	%	Εκάτ.	%
Μπαγκλαντές	45	15668	10,9	5,5	5,0
Μπαγκλαντές	100	29846	20,7	14,8	13,5
Ινδία	100	5763	0,4	7,1	0,8
Ινδονησία	60	34000	1,9	2,0	1,1
Μαλαισία	100	7000	2,1	>0,05	>0,3
Πακιστάν	200	1700	0,2	?	?
Βιετνάμ	100	40000	12,1	17,1	23,1

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα, διάφορων σεναρίων αύξησης της στάθμης της θάλασσας, για την Νότια και Νοτιοανατολική Ασία.

Πηγή: Nicholls, J.R. and N. Mimura (1998): Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications, *Climate Research* 11, 5-18

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι μια ενδεχόμενη αύξηση της στάθμης κατά 1 μέτρο θα προκαλούσε 15 εκατομμύρια αστεγούς στο Μπαγκλαντές και 17 εκατομμύρια στο Βιετνάμ, υπό την προϋπόθεση να παραμείνει ο πληθυσμός των κρατών σταθερός στις τιμές του 1990. Για μια αντίστοιχη αύξηση στην Κίνα θα είχαμε 72 εκατομμύρια αστεγούς και απώλεια γης έκτασης 125 000 km², στην περίπτωση πλημμύρας με περίοδο επανεμφάνισης εκατό χρόνια. Βασιζόμενοι στις τάσεις που επικρατούν σήμερα για αύξηση της στάθμης, οι αριθμοί αυτοί μπορούν να πολλαπλασιαστούν. Έτσι και στην Ιαπωνία στην περίπτωση μιας τέτοιας αύξησης θα πλημμύριζαν 2300 km² γης και θα κινδύνευαν 4 εκατομμύρια άνθρωποι. Ωστόσο οι περιοχές αυτές προστατεύονται σήμερα από αναχώματα. Περίπου το 10% των εκτάσεων καλλιέργειας ρυζιού, που καλύπτει τις ανάγκες 200 εκατομμυρίων ανθρώπων, βρίσκεται σε περιοχές που θα πλημμύριζαν στην περίπτωση αύξησης της στάθμης κατά 1 μέτρο. Σημαντικές επιπτώσεις θα έχει η γεωργία και από την υφαλμύρωση των υπόγειων υδάτων, λόγω της εισχώρησης θαλασσινού νερού και λόγω της αύξησης της αλατότητας των καλλιεργήσιμων εδαφών.

Συγκεκριμένα το Μπαγκλαντές δεν είναι μόνο ένα από τα φτωχότερα κράτη στον κόσμο, αλλά είναι αυτό που ίσως κινδυνεύει περισσότερο από κάθε άλλο στον κόσμο, από την αλλαγή του κλίματος και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Εκτός από τις πλημμύρες έχει να αντιμετωπίσει και τροπικούς κυκλώνες και διάβρωση των ακτών του. Η ειδική γεωγραφική



θέση στην οποία βρίσκεται το Μπαγκλαντές, μεταξύ των Ιμαλαΐων στον βορρά και του κόλπου της Βεγκάλης στο νότο, δεν ευθύνεται μόνο για τους τόσο σημαντικούς για τη ζωή της περιοχής μουσώνες, αλλά και για άλλα πολλά καταστροφικά φυσικά φαινόμενα. Η τοπογραφία των ανατολικών περιοχών, τόσο στο βορρά όσο και στο νότο, δείχνει ένα έδαφος επίπεδο με πολύ μικρές κλίσεις. Περίπου το 10% της έκτασης του κράτους βρίσκεται σε υψόμετρο πάνω από ένα μέτρο από τη μέση στάθμη της θάλασσας και το ένα τρίτο κάτω από την ανύψωση της παλίρροιας. Το δυτικό τμήμα μπορεί μιν να είναι σχετικά επίπεδο από την άλλη δε προστατεύεται από τροπικού ανεμοστρόβιλους και πλημμύρες από τις μεγάλες εκτάσεις παραθαλάσσιων βιότοπων. Το μεσαίο τμήμα της ακτής του Μπαγκλαντές, όπου εκβάλουν τρεις από τους μεγαλύτερους ποταμούς του κόσμου, ο Γάνγκης, ο Βραχμαπούτρας και ο Μέγνας, έχει να αντιμετωπίσει τις χειρότερες φυσικές καταστροφές στον πλανήτη, όπως τυφώνες και πλημμύρες (Ali, A.-1999).

Στο Μπαγκλαντές δεν είναι σπάνια τα πλημμυρικά κύματα που προκαλούν καταιγίδες να ξεπερνούν τα 10 μέτρα. Ο λόγος για τα τόσο μεγάλα ύψη είναι τα ρηχά νερά στο βόριο τμήμα του κόλπου της Βεγκάλης, το ότι ο κόλπος είναι κλειστός προς το βορά και η μεγάλη ανύψωση της παλίρροιας. Μια ενδεχόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας θα πλημμύριζε μεγάλες πεδινές εκτάσεις και έτσι θα δημιουργούνταν η δυνατότητα για ακόμη μεγαλύτερα ύψη κύματος. Στην περίπτωση μιας αύξησης κατά 30 έως 75 εκατοστά, έχει υπολογιστεί με μαθηματικά μοντέλα, ότι θα πλημμυρίσουν 5.8 Km^2 και 11.2 Km^2 αντίστοιχα, από τα οποία το 95% είναι καλλιεργήσιμη γη. Ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα που ενδέχεται να πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι, η παρεμπόδιση της εκβολής των μεγάλων ποταμών που εκβάλουν στο κόλπο της Βεγκάλης, που μπορεί να προκαλέσει ανύψωση της στάθμης τους στην ενδοχώρα και πλημμύρες (Ali, A.-1999).



3.2.4 ΜΙΚΡΑ ΝΗΣΙΩΤΙΚΑ ΚΡΑΤΗ

Τα επονομαζόμενα μικρά νησιωτικά κράτη στους δύο μεγάλους ωκεανούς, στην Καραϊβική και στη Μεσόγειο, είναι από τις περιοχές που θα επηρεαστούν περισσότερο από μια ενδεχόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Για αυτό το λόγο τα κράτη αυτά συσπειρώθηκαν και ίδρυσαν έναν οργανισμό, τον AOSIS (Alliance of Small Island States), που εκπροσωπεί τα κοινά τους συμφέροντα στις διεθνείς συνεδριάσεις για τις κλιματικές αλλαγές. Αυτά τα κράτη μπορεί να αποτελούνται από ένα μεγάλο νησί, όπως η Κύπρος, το Μπαρμπάντος και το Ναούρου, ή από περισσότερα δημιουργώντας έτσι συμπλέγματα νησιών, όπως τα νησιά Τουβαλού(9), τα νησιά Βανουάτου(12), οι Σεϋχέλλες(115), τα νησιά Τόγκα(180) και οι πολυάριθμες Μαλδίβες(1200). Παρόλο που τα κράτη αυτά δεν παρουσιάζουν ομοιογένεια, έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά που καθιστούν κατανοητά τα κοινά προβλήματα που θα έχουν να αντιμετωπίσουν με την κλιματική αλλαγή. Τα κράτη αυτά είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε κλιματικές αλλαγές και την αύξηση της στάθμης της θάλασσας, που αυτές θα προκαλέσουν. Αυτό συμβαίνει λόγω της περιορισμένης φυσικής τους έκτασης, των ελάχιστων πρώτων υλών που διαθέτουν, της εξαιρετικής τους ευαισθησίας σε φυσικές καταστροφές όπως τυφώνες, πλημμύρες, τσουνάμι, εκρήξεις ηφαιστειών και μεγάλων περιόδων ξηρασίας. Τα νησιά αυτά είναι συνήθως αρκετά αποκομμένα από τις μεγάλες, διεθνείς αγορές της ενδοχώρας και έχουν ελάχιστα ή και καθόλου, αναπτυγμένες υποδομές. Η ευαισθησία τους οφείλεται επίσης και στο ότι στα νησιά αυτά όλες οι δραστηριότητες τους και η πλειονότητα του, συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού τους, είναι συγκεντρωμένη στις παράκτιες περιοχές.

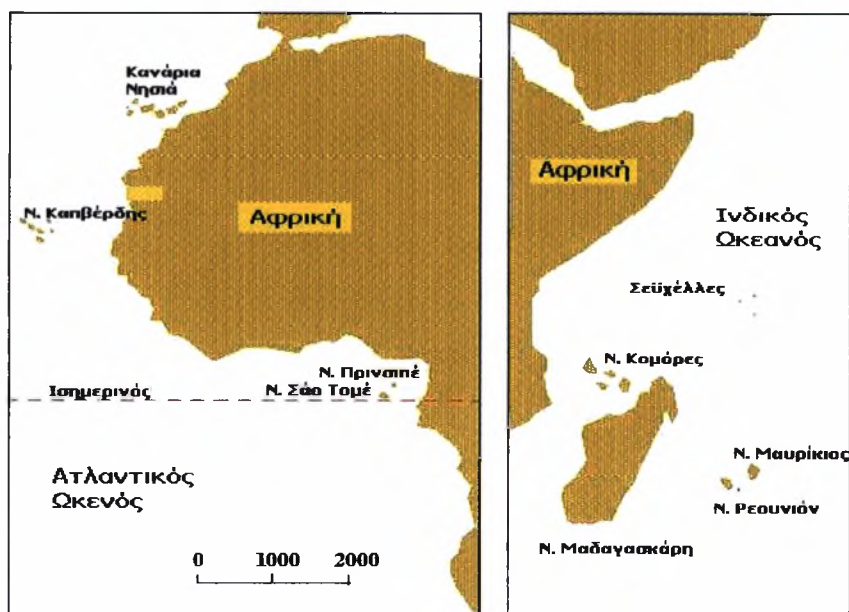
Πολλά νησιά και atolles, στον Ειρηνικό και Ινδικό Ωκεανό, δεν έχουν υψόμετρο μεγαλύτερο από 3 έως 4 μέτρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Έτσι για παράδειγμα η atolle Τουβαλού βρίσκεται κατά μέσο όρο 1.5 μέτρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.



Εικόνα 3.3: Μικρά νησιωτικά κράτη του Ειρηνικού Ωκεανού.



Εικόνα 3.4: Μικρά νησιωτικά κράτη της Καραϊβικής.



Εικόνα 3.5: Μικρά νησιωτικά κράτη στον Ατλαντικό και Ινδικό Ωκεανό.



Σε περίπτωση ανύψωσης της στάθμης κατά 1 μέτρο, θα πλημμυρίζαν τα δύο τρίτα του νησιού και το υπόλοιπο θα ήταν εκτεθειμένο στην εντονότερη διαβρωτική δραστηριότητα των κυμάτων. Ακόμη και νησιά με υψηλότερο υψόμετρο, όπως τα νησιά Τόγκα, Φίτζι και δυτική Σαμόα, θα είχαν να αντιμετωπίσουν κινδύνους από την αύξηση της στάθμης της θάλασσας, αφού είναι συγκεντρωμένος ο πληθυσμός τους στις παράκτιες περιοχές. Το ρίσκο αυξάνει κυρίως λόγω της έντονης αστυφιλίας που οδηγεί τον πληθυσμό των νησιών στις πρωτεύουσές τους, οι οποίες είναι χτισμένες παραθαλάσσια, σε περιοχές εκτεθειμένες σε μια ενδεχόμενη αύξηση. Στην περίπτωση μιας αύξησης κατά 0.3 μέτρα έως 1 μέτρο θα πλημμυριζε για παράδειγμα στα νησιά Τόγκα το 1.1% και 3.9% της συνολικής έκτασης του νησιού, αλλά θα κινδύνευαν 2700 ή 9000 άνθρωποι αντίστοιχα, δηλαδή το 4.3% και 14.2% του πληθυσμού τους αντίστοιχα. Στην περίπτωση μιας καταιγίδας που θα προκαλούσε ύψη κύματος της τάξης των 2.8 μέτρων, όπως ο τυφώνας Ισαάκ το 1982, θα κινδύνευαν επί του παρόντος 20000 άνθρωποι. Για μια αντίστοιχη καταιγίδα και μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 30 εκατοστά ο αριθμός θα ανέρχονταν σε 23470 ανθρώπους, ενώ για μια αύξηση κατά 1 μέτρο ο αριθμός τους θα ήταν 29560, δηλαδή το 46% του πληθυσμού του νησιού (Mimura, N. -1999).

Η συχνότητα ακραίων γεγονότων, όπως μεγάλες πλημμύρες, θα αυξηθεί στην περίπτωση μια αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Λόγω της πυκνότητας του πληθυσμού τους και τις μεγάλης συγκέντρωσης ευαίσθητων υποδομών στις παράκτιες περιοχές τους, τα μικρά νησιωτικά κράτη, θα έχουν να αντιμετωπίσουν μεγάλα προβλήματα. Στην πλειοψηφία τους, αν όχι όλα, τα μικρά νησιωτικά κράτη βασίζουν την οικονομία τους στον τουρισμό, που σε μερικές περιπτώσεις όπως στην Καραϊβική αποτελεί το 50% του Α.Ε.Π. τους. Όλες σχεδόν οι τουριστικές δραστηριότητες επικεντρώνονται στις παράκτιες περιοχές των νησιών και έτσι θα επηρεαστούν έντονα από μια ενδεχόμενη αύξηση της στάθμης. Έτσι παρατηρήθηκε σε ακτές του Τρινιντάντ και του Τομπάγκο τα τελευταία 15 χρόνια μια αύξηση της στάθμης κατά 8 έως 10 χιλ. που προκάλεσε μια μέση διάβρωση της ακτής κατά 2 έως 4 μέτρα το χρόνο (Singh, B.-1997). Επίσης



έχει παρατηρηθεί και σε κάποια από τα νησιά Φίτζι τα τελευταία 70 χρόνια μια διάβρωση κατά 30 μέτρα (Nurse, L. A. and G. Sem-2001). Παρακάτω θα γίνει αναφορά στην διάβρωση των ακτών γενικά και την διάβρωση τους λόγω της αύξησης της στάθμης της θάλασσας ειδικά.

3.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.3.1 ΔΕΛΤΑ ΠΟΤΑΜΩΝ

Τα δέλτα ποταμών δεν είναι απλά σημαντικοί βιότοποι αλλά είναι και από τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές στον κόσμο. Λόγω της χαμηλής τους θέσης, σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας, οι περιοχές αυτές ανήκουν σε αυτές που κινδυνεύουν περισσότερο από μια αύξηση της στάθμης. Ακριβώς λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης γης θάλασσας στις περιοχές αυτές μπορεί η επίδραση του φαινομένου της παλίρροιας να φτάσει και 100 km στην ενδοχώρα. Η γεωργία στις περιοχές αυτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του διατιθέμενου νερού αλλά και από την υφαλμύρωση των αποθεμάτων. Παρόλα αυτά επικεντρώνονται οι καλλιέργειες πολλών κρατών στις περιοχές αυτές, λόγω της γονιμότητας του εδάφους και της εύκολης διάθεσης νερού. Έτσι για παράδειγμα το 50% της παραγωγής ρυζιού στο Βιετνάμ προέρχεται από το δέλτα του Μεκόνγκ στο νότο και το 20% από το δέλτα του Κόκκινου Ποταμού στο βορρά.

Μια σειρά από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως άντληση υπόγειου νερού για άρδευση, κατασκευή φραγμάτων και η διευθέτηση της κοίτης των ποταμών, έχει καταστήσει της περιοχές αυτές πολύ ευαίσθητες έναντι μιας ενδεχόμενης αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Τα τελευταία 200 χρόνια, αλλά κυρίως από το 1950 και μετά, έχει μειωθεί η στερεομεταφορά από τον Νείλο και τον Ινδό ποταμό κατά 95% και του Μισισσιπή κατά 50%. Στο δέλτα του Chao Praya στον κόλπο της Μπανκόγκ, έχει προκληθεί μια σχετική αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 17 χιλ. το χρόνο, λόγω της αλόγιστης άντλησης υπόγειων υδάτων. Παρόμοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί και στην Κίνα, στο δέλτα του Huang He. Σε τέτοιες



περιπτώσεις μπορεί ακόμη και μια ελάχιστη αύξηση της στάθμης να προκαλέσει μεγάλες απώλειες γης, λόγω της διάβρωσης των ακτών από τους κυματισμούς. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το δέλτα του Νείλου, του Μακένσι και του Γάγκη ποταμού. Στην περίπτωση μιας αύξησης της στάθμης, όπως η προβλεπόμενη, κινδυνεύουν στην νότια Αμερική οι περιοχές των δέλτα του Αμαζονίου, του Ορινόκο και των Παρανά και Πλάτα. Επιπλέον είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η έκταση και το μήκος των ακτών κοντά σε δέλτα, λόγω της έντονης δυναμικότητάς τους. Το κόστος που απαιτείται για να ληφθούν αποτελεσματικά μέτρα προστασίας των ακτών στις περιοχές αυτές είναι διπλάσιο ή και τετραπλάσιο του αντίστοιχου άλλων περιοχών (Nicholls, R. J., F.M.J. Hoozemans, M. Marchand-1999).

3.3.2 ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Οι σημαντικότεροι υδροβιότοποι στις ακτές είναι οι αλμυροί και βαλτώδεις παραθαλάσσιοι βιότοποι, οι ρηχοί θαλάσσιοι βιότοποι κοντά στη στεριά και τα παραθαλάσσια μικρά δάση με θάμνους και δέντρα που εκτείνονται και μέσα στη θάλασσα, τα γνωστά μαγκρόβια. Οι παράκτιοι βιότοποι μπορεί μεν λόγω της θέσης τους να κινδυνεύουν από μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας, από την άλλη δε μπορούν να προσαρμοστούν σταδιακά στην αύξηση με την βοήθεια της στερεομεταφοράς και της ανάπτυξης των φυτών. Οι απώλειες υδροβιότοπων από την θάλασσα μπορεί να ισοσταθμισθούν με την φυσική μεταφορά τους προς την ενδοχώρα, εάν οι συνθήκες εκεί είναι κατάλληλες και δεν τους απαγορεύεται από επεμβάσεις του ανθρώπου με έργα προστασίας από πλημμύρες. Είναι σχεδόν σίγουρο όμως ότι λόγω της έντονης αύξησης του πληθυσμού στις παράκτιες περιοχές και λόγω των έργων προστασίας που θα πρέπει να κατασκευαστούν, όπως αναχώματα και φράγματα, θα εμποδιστεί η μετανάστευση των υδροβιότοπων. Έτσι και αλλιώς όμως παρατηρείται ήδη μια μείωση του αριθμού και της έκτασης των υδροβιότοπων λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Από το 1990 έως το 2080 υπολογίστηκε, με



τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, μια μείωση των υγροβιότοπων κατά 32% δηλαδή συνολικά 62%, ακόμη και χωρίς την αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Για μια αύξηση της στάθμης για 38 εκατοστά έως το 2080 έχει υπολογιστεί, πάλι με μαθηματικά μοντέλα, μια μείωση των υγροβιότοπων από 6% έως 22% που οφείλεται μόνο στην αύξηση και συνολικά 36% έως 70%, δηλαδή 210 000 km² (Nicholls, R. J., F.M.J. Hoozemans, M. Marchand-1999). Οι περιοχές που θα παρουσιάσουν τις μεγαλύτερες απώλειες είναι η ακτή του Ατλαντικού στην βόρεια και κεντρική Αμερική, στην Μεσόγειο Θάλασσα και την Βόρεια Θάλασσα. Σε μερικές περιπτώσεις, όπως στην Μεσόγειο και τη Βόρεια Θάλασσα η απώλεια των υγροβιότοπων θα είναι και μόνο λόγω της αύξησης της στάθμης της θάλασσας, ολοκληρωτική! Η απώλεια αυτή θα επηρεάσει πολλούς τομείς όπως για παράδειγμα την κάλυψη των αναγκών σε τρόφιμα και την απώλεια περιοχών τεράστιας οικολογικής σημασίας αφού αποτελούν χώρους αναπαραγωγής πολλών ειδών ψαριών πτηνών και άλλων ζώων. Επίσης θα επηρεάσει την διάβρωση των ακτών αφού θα χαθούν φυσικά προστατευτικά από την μανία των κυμάτων.

Δεκαετία	Αύξηση της Στάθμης της Θάλασσας κατά 38 cm έως το 2080		Αύξηση της Στάθμης της Θάλασσας και Άμεση Ανθρώπινη Καταστροφή	
	υψηλή τιμή	χαμηλή τιμή	υψηλή τιμή	χαμηλή τιμή
2020	2,3 %	0,0 %	15-31 %	13-30 %
2050	10,5 %	1,9 %	31-53 %	24-49 %
2080	22,2 %	5,7 %	47-70 %	36-64 %

Πίνακας 3.5: Απώλειες Υγροβιότοπων από την αύξηση της στάθμης της θάλασσας και την άμεση καταστροφή από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Πηγή: Nicholls, R. J., F.M.J. Hoozemans, M. Marchand-1999- Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses, Global Environmental Change 9, 69-87

Τα μαγκρόβια, τα συναντά κανείς σε δέλτα ποταμών σε τροπικές περιοχές, αλλά και σε εκβολές ποταμών, λιμνοθάλασσες και άλλες ακτές. Οι βιότοποι αυτοί επιπλέον προστατεύουν τις ακτές από τη διάβρωση, αφού παίζουν το ρόλο φυσικού κυματοθραύστη. Όπου συναντά κανείς αυτούς τους βιότοπους βλέπει ότι έχουν αρχίσει να καταστρέφονται από τον



άνθρωπο με διάφορες δραστηριότητές του, όπως την υλοτομία. Έτσι για παράδειγμα έχει καταστραφεί το 50% αυτών των υγροβιότοπων στην Ταϊλάνδη. Στην περίπτωση της αύξησης της στάθμης της θάλασσας αυτό θα είχε ως επακόλουθο, μειωμένη φυσική προστασία των ακτών από διάβρωση.

Οι αλμυροί βαλτώδεις υγροβιότοποι βρίσκονται αρκετά χαμηλά, κοντά στη θάλασσα και θα επηρεαστούν έτσι πάρα πολύ από μια αύξηση της στάθμης. Το πόσο και το εάν θα επηρεαστούν εξαρτάται από τον ρυθμό της αύξησης, από το εάν θα πλημμυρίσουν ή θα διαβρωθούν και από την κατασκευή προστατευτικών φραγμάτων. Οι βιότοποι αυτοί έχουν τη δυνατότητα να παράγουν οργανικό υλικό και να «ανεβαινουν» μαζί με την αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Η κάθετη αυτή συσσώρευση υλικού εξαρτάται από την περίπτωση και υπολογίστηκε ότι είναι από 2 έως 16 χιλ. το χρόνο (McLean, R.F. and Tsyban, A. –2001).

3.3.3 ΚΟΡΑΛΛΙΟΓΕΝΗΣ ΥΦΑΛΟΙ

Στους κοραλλιογενής ύφαλους και στα τροπικά δάση, εμφανίζονται τα περισσότερα είδη πανίδας και χλωρίδας στον κόσμο. Μόνο στους κοραλλιογενής ύφαλους ζουν πάνω από 400 000 είδη, από τα οποία είναι γνωστά μόνο τα 60 000, στα οποία συμπεριλαμβάνεται και το 25% των γνωστών ειδών ψαριών στον κόσμο! Ο μεγάλος αριθμός ψαριών που διαθέτουν οι κοραλλιογενής ύφαλοι είναι σημαντική πηγή για την εξασφάλιση τροφής, πολλών παράκτιων κοινοτήτων. Οι ύφαλοι προσφέρουν οικοδομικό υλικό και προσελκύουν τον τουρισμό.

Οι κοραλλιογενής ύφαλοι, που εκτείνονται γύρω από τα κοραλλιογενή νησιά και μπροστά από ακτές, παίζουν το ρόλο φυσικού κυματοθραύστη και προστατεύουν έτσι τις ακτές από τα κύματα και τη διάβρωση.

Η έκταση των κοραλλιογενών υφάλων στον κόσμο ανέρχεται σε 255000 km². Το 58% περίπου των υφάλων και σε μερικές περιοχές της Νοτιοανατολικής Ασίας το 80%, κινδυνεύει από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως τη βιομηχανική ανάπτυξη, την μόλυνση του



περιβάλλοντος, τον τουρισμό και την οικιστική ανάπτυξη, την υπεραλιεία και την συλλογή κοραλλιών. Η μέγιστη κατακόρυφη ανάπτυξη των κοραλλιών είναι περίπου 10 χιλ. το χρόνο, που σημαίνει ότι υγιεινοί κοραλλιογενής ύφαλοι, θα μπορούσαν να συμβαδίσουν με την προβλεπόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Αβέβαιη είναι η κατάσταση για τους υφάλους που έχουν ήδη υποστεί βλάβες, όπως αυτούς στην νοτιοανατολική Ασία, στην ανατολική Αφρική και στην Καραϊβική.

Λόγω της αραίωσης του στρώματος του όζοντος στην ατμόσφαιρα πολλοί κοραλλιογενής ύφαλοι έχουν υποστεί βλάβες από την αυξημένη UV-ακτινοβολία. Επίσης έχουν παρουσιαστεί προβλήματα στους υφάλους λόγω της αυξανόμενης θερμοκρασίας των ωκεανών. Ο αποχρωματισμός των κοραλλιών συμβαίνει ακόμη και αν οι μέγιστες επιφανειακές θερμοκρασίες του νερού αυξηθούν κατά 1 °C. Σε θερμοκρασιακές ανωμαλίες όπου παρουσιάζονται αυξήσεις των 3 °C (βλέπε El Nino) , για πολλούς μήνες, τα κοράλλια αρχίζουν και πεθαίνουν σε μεγάλο βαθμό. Στην περίπτωση του El Nino το 1997/98 παρατηρήθηκε αποχρωματισμός των κοραλλιών στον Ινδικό Ωκεανό χωρίς προηγούμενο, όσο αφορά την έκταση και έντασή του. Στο φαινόμενο αυτό μπορεί να δει κανείς έναν προάγγελο της κλιματικής αλλαγής και της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη. Εάν, έως το 2065 διπλασιαστεί η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, αναμένεται να αντιδράσουν τα κοράλλια με μια μείωση της δημιουργίας ασβεστίου κατά 17-35%. Στην περίπτωση αυτή δεν θα είναι δυνατό να συμβαδίσει η ανάπτυξη των κοραλλιών, με την αύξηση της στάθμης της θάλασσας (McLean, R.F. and Tsyban, A. –2001).

3.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΚΤΩΝ

Αμμώδης παραλίες και άλλες αμμώδης ακτές που δημιουργούνται από τους κυματισμούς και την παλίρροια, αποτελούν περίπου το 20% της παγκόσμιας ακτογραμμής. Ένα μικρό ποσοστό αυτών των ακτών αποτελείται από χαλίκι. Επειδή οι κλίσεις στις ακτές είναι πολύ μικρές, η διάβρωση μπορεί να προκαλέσει απώλειες της τάξης των μερικών δεκάδων



μέτρων. Σε περίπτωση ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας θα πρέπει να ληφθούν δραστικά μέτρα προστασίας των ακτών, γιατί ο κίνδυνος για διάβρωση θα αυξηθεί αισθητά.

Όσο αφορά τη διάβρωση των ακτών, θα γίνει αναφορά στα παρακάτω κεφάλαια.



4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΤΩΝ - ΓΕΝΙΚΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μορφοδυναμική της ακτής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η διάβρωσή τους και στη συνέχεια η μεταφορά του υλικού οφείλονται σε τριβές του πυθμένα, που προκαλούνται από τις κινήσεις των κυμάτων, την θραύση τους και τα ρεύματα που προέρχονται από τα κύματα που θραύονται. Οι διαδικασίες αυτές χάνουν τη σημασία τους όσο αυξάνει το βάθος του νερού. Σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο αυτό παίζει και η μορφολογία του πυθμένα. Η μεταφορά των φερτών γίνεται σε αμμώδης ακτές, με δύο κυρίως διαδικασίες, τη μεταφορά του φορτίου εν αιώρηση και τη μεταφορά του φορτίου του πυθμένα. Ο μεγαλύτερος ωστόσο όγκος των φερτών μεταφέρεται εν αιώρηση.

Οι ακτές και ο πυθμένας των θαλάσσιων ζωνών κοντά στην ακτή, όπου γίνεται η μεταφορά των φερτών, μπορεί να είναι βραχώδης ή αμμώδης. Η πρώτη μορφή είναι κυρίως σταθερή και εξελίσσεται μακροπρόθεσμα. Η δεύτερη μορφή ακτών είναι αυτή που διαβρώνεται και αλλάζει μορφή σε σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα.

Αυτές οι αμμώδης ακτές είναι δυνατών να έχουν φτάσει σε δυναμική ισορροπία ή και να βρίσκονται σε μια συνεχή αλλαγή, δηλαδή να διαβρώνονται συνεχώς ή να δέχονται υλικό.

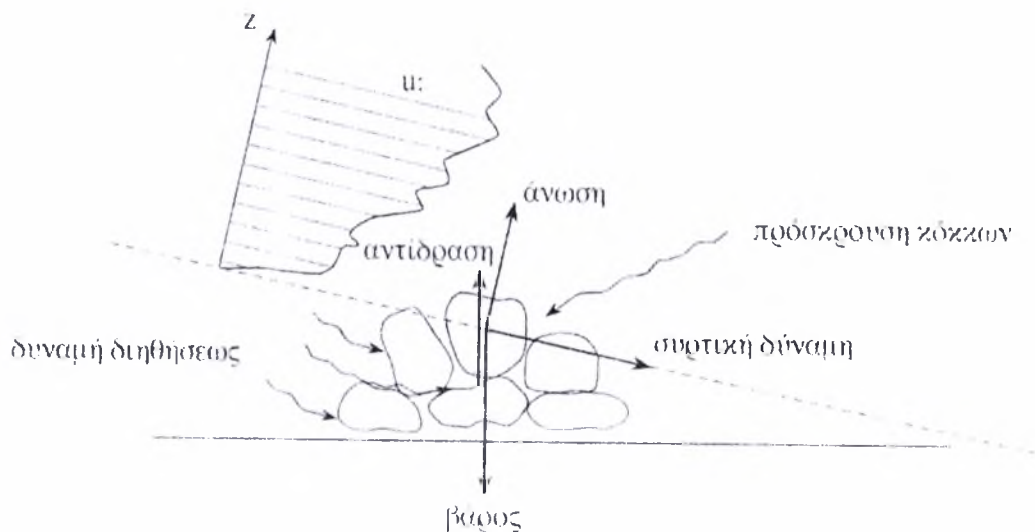
4.2 ΦΥΣΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΧΩΡΟ

Όταν δεν υπάρχουν κυματισμοί ή ρεύματα δεν γίνεται μεταφορά κοκκώδους υλικού του πυθμένα. Ο ουσιαστικός λόγος της κίνησης των κόκκων είναι η ύπαρξη κυματισμών, ρευμάτων ή και των δύο.

Όσο πλησιάζει κανείς την ακτή, τόσο οι κυματισμοί που φτάνουν εκεί αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της κίνησής τους. Η ταχύτητα μετάδοσης των κυματισμών μειώνεται. Αφού όμως δεν γίνεται να μειωθεί η περίοδος του

κύματος, οι κορυφές τους πλησιάζουν όλο και περισσότερο και έτσι τα κύματα γίνονται ολοένα ψηλότερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μια μεγάλη συνιστώσα της ταχύτητας προς τη στεριά, έναντι της μιας άλλης συνιστώσας προς τη θάλασσα που είναι η μικρότερη. Έτσι, όταν επιτυγχάνεται μια συγκεκριμένη ταχύτητα, μεταφέρεται υλικό μεγάλης διαμέτρου προς τη στεριά και μικρής διαμέτρου προς τη θάλασσα. Η μεταφορά του υλικού σταματά όταν οι εξασκούμενες δυνάμεις βρεθούν σε ισορροπία.

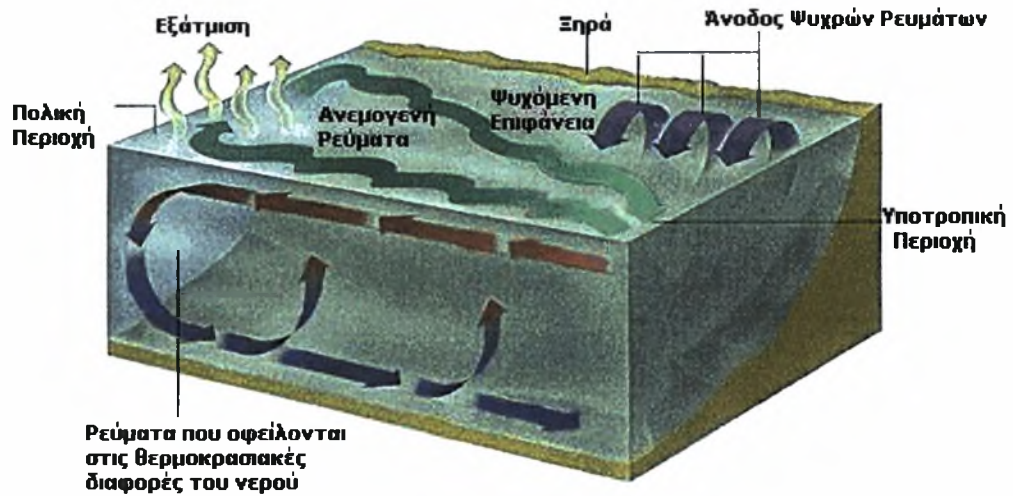
Σε έναν κόκκο, στην επιφάνεια του πυθμένα, δρουν διάφορες συνιστώσες δυνάμεων. Ορθές και διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, αντίδραση στηρίξεως σε άλλους κόκκους, υδροδυναμικές υποπίεσεις λόγω διηθήσεως και δυνάμεις προσκρούσεως άλλων κόκκων, είναι δυνατό να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες αποκολλήσεως των επιφανειακών κόκκων (Σχήμα 4.1).



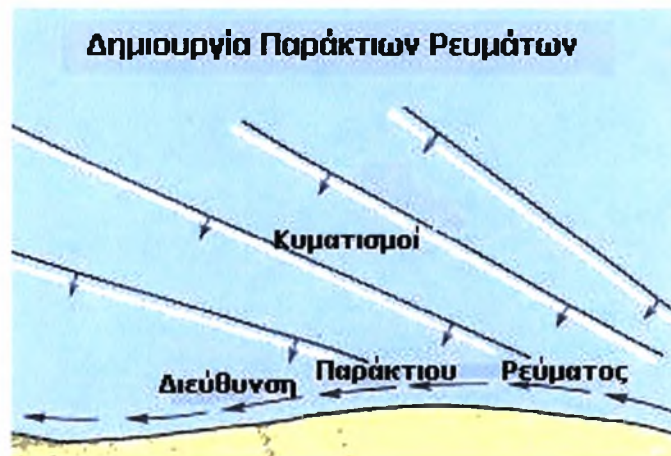
Σχήμα 4.1: Η δράση κάποιων συνιστωσών πάνω σε έναν κόκκο της επιφάνειας του πυθμένα.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.1

Στην περίπτωση λεπτόκοκκων εδαφών, όπως αργιλικών, μοριακές δυνάμεις συνοχής (συνεκτικά εδάφη), κάνουν πιο δύσκολη την έναρξη της διάβρωσης του πυθμένα, ιδίως σε πυθμένες όπου έχει προχωρήσει διαδικασία στερεοποίησης (consolidation).



Εικόνα 4.2: Η δράση ρευμάτων στη θάλασσα που επηρεάζουν την ακτογραμμή.
 Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου



Εικόνα 4.3: Η δημιουργία παράλληλου θαλάσσιου ρεύματος προς την ακτή.
 Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου



Εικόνα 4.4: Η κίνηση ζικ-ζακ των σωματιδίων ως αποτέλεσμα της αναρρίχησης και επιστροφής των κυμάτων.
 Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου.

Οι σύγχρονες μαθηματικές σχέσεις, για την περιγραφή της ενάρξεως της αποκολλήσεως αλλά και του ρυθμού μεταφοράς, είναι εμπειρικές ή λαμβάνουν υπόψη ολοκληρωτικές ισορροπίες, σε στοιχεία ελέγχου διαστάσεων πολύ μεγαλύτερων των κόκκων. Μετά την αποσταθεροποίηση των κόκκων η κίνησή τους γίνεται με δύο τρόπους: ή με κύλιση στον πυθμένα και διαδοχικά άλματα ύψους έως $10D$, που συνεπάγονται περιοδική επαφή με τον πυθμένα ή χωρίς επαφή με τον πυθμένα, σε αιώρηση μέσα στην υδάτινη στήλη. Η ανά μονάδα όγκου αιωρήματος, ποσότητα όγκου ή βάρους (η συγκέντρωση C δηλαδή) των κόκκων, μεταβάλλεται ομαλά, μειούμενη από τον πυθμένα προς την επιφάνεια κατά έναν περίπου εκθετικό τρόπο.

Παρά τη συνέχεια αυτή, είναι πλέον παγιωμένη η τεχνητή διάκριση του φορτίου φερτών υλών σε δύο διακεκριμένους τρόπους μεταφοράς, το φορτίο πυθμένα και το φορτίο σε αιώρηση, που σαν ειδικές παροχές όγκου ή βυθισμένου βάρους φερτών υλών συμβολίζονται με q_b και Q_s (σε $m^3/m/sec$) ή g_b , g_s σε $(kg/m/sec)$. Η συσχέτιση g και q καθορίζεται από το βυθισμένο ειδικό βάρος:

$$g = (\gamma_s - \gamma_w)(1-n)q$$

όπου n το πορώδες.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το ειδικό φορτίο αιωρουμένων δίνεται από το ολοκλήρωμα, από μια στάθμη αναφοράς Z_a σε απόσταση από τον πυθμένα ως την επιφάνεια του γινομένου c και u . Το φορτίο πυθμένα περιορίζεται στη ζώνη πάχους Z_a σε μικρή απόσταση από τον πυθμένα, της τάξης του $2D_{50}$ (ύψος άλματος κόκκων που κινούνται με άλματα). Οι ειδικές παροχές q_s και q_b σχετίζονται με τα υδροδυναμικά στοιχεία της ροής και τα φυσικά χαρακτηριστικά των κόκκων, με εμπειρικές σχέσεις, που θα περιγραφούν στην επόμενη παράγραφο.

Η εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα ή ακριβέστερα ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης Z_b του πυθμένα, κάτω από δεδομένες υδροδυναμικές συνθήκες, δίνεται από την εξίσωση που προκύπτει από την

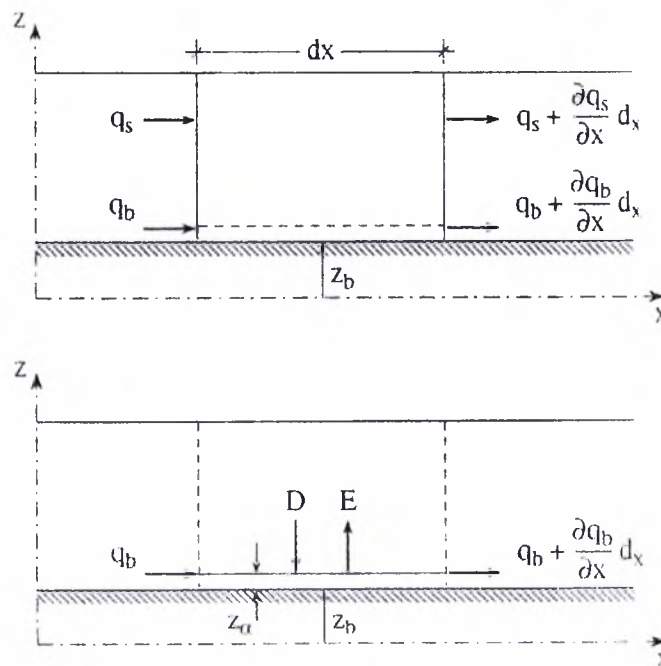
αρχή διατηρήσεως της μάζας ή του όγκου των φερτών υλών και γράφεται ως προς τις ειδικές παροχές βυθισμένου βάρους ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} z_b (\gamma_s - \gamma_w)(1 - n) + \frac{\partial}{\partial x} (g_{bx} + g_{sx}) + \frac{\partial}{\partial y} (g_{by} + g_{sy}) = 0$$

Η ίδια σχέση, αν είναι γνωστός από την επίλυση της εξίσωσης υπολογισμού της στερεομεταφοράς σε αιώρηση, ο ρυθμός επαναιωρήσεως (E) και καθιζήσεως (D) φερτών από και προς τον πυθμένα μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = D - E$$

σύμφωνα με τους συμβολισμούς της εικόνας 4.5.



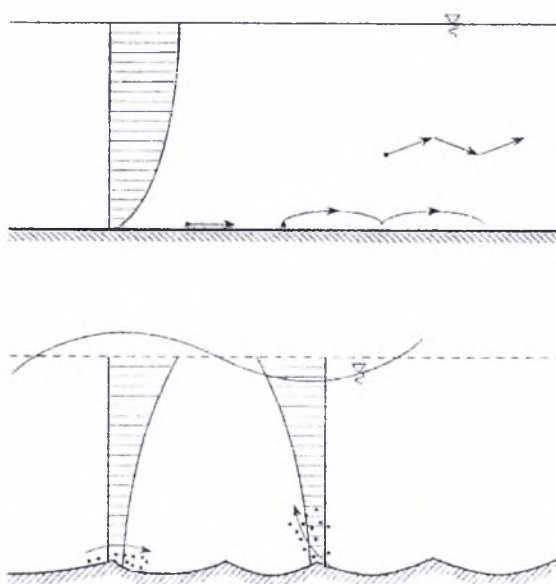
Εικόνα 4.5: Συμβολισμοί για την εξίσωση της εξέλιξης του πυθμένα, όταν είναι γνωστοί οι ρυθμοί επαναιωρήσεως και καθιζήσεως.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.2

Το φυσικό μέγεθος που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στην αποσταθεροποίηση των κόκκων είναι η διατμητική τάση πυθμένα. Η εκτεταμένη εμπειρία από την ποτάμια υδραυλική σχετικά με το μέγεθος αυτό τ_{bc} είναι δυνατό να μεταφερθεί και στην ακτομηχανική στην

παράκτια διεργασία στερεομεταφοράς, αν καθοριστεί το μέγεθος της διατμητικής τάσεως που διαμορφώνει ο συνδυασμός κυματισμών και ρευμάτων t_{bcw} (c = δείκτης ρεύματος, w = δείκτης κύματος).

Από τις θεωρίες σχετικά με τον φυσικό μηχανισμό στερεομεταφοράς στις ακτές υπερέχει η θεωρία του Bagnold (1964). Ο Bagnold τεκμηρίωσε το γεγονός ότι στον παράκτιο χώρο, συνήθως οι κυματισμοί είναι οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν την αποσταθεροποίηση των κόκκων και σε συνέχεια τα θαλάσσια ρεύματα αναλαμβάνουν τη μεταφορά σε μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις. Η τυρβώδης ροή του ρεύματος συμβάλλει στην κατακόρυφη διάχυση των φερτών σε αιώρηση, σε συνεργασία με τις περιοδικές τροχιές των κυματισμών που επαυξάνουν την κατακόρυφη διάχυση. Η δράση τους παραμετροποιείται σαν επιπλέον ισοδύναμος συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης. Επίσης, η διαφορά της μορφής του πυθμένα μεταξύ περιβάλλοντος, όπου επικρατούν μετρίας εντάσεως ρεύματα (επίπεδος πυθμένας με ανωμαλίες της τάξης του κόκκου), από το περιβάλλον όπου επικρατούν οι κυματισμοί (αμμοκυμάτια ύψους μερικών εκατοστών και μήκους μερικών δεκατόμετρων), συνεπάγεται και διαφορετικές συνθήκες ροής κοντά στον πυθμένα και αναρπαγής προς την υδάτινη στήλη κόκκων (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Διαφορετικές συνθήκες ροής κοντά στον πυθμένα, λόγω της διαφοράς στη μορφή του.



Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.3

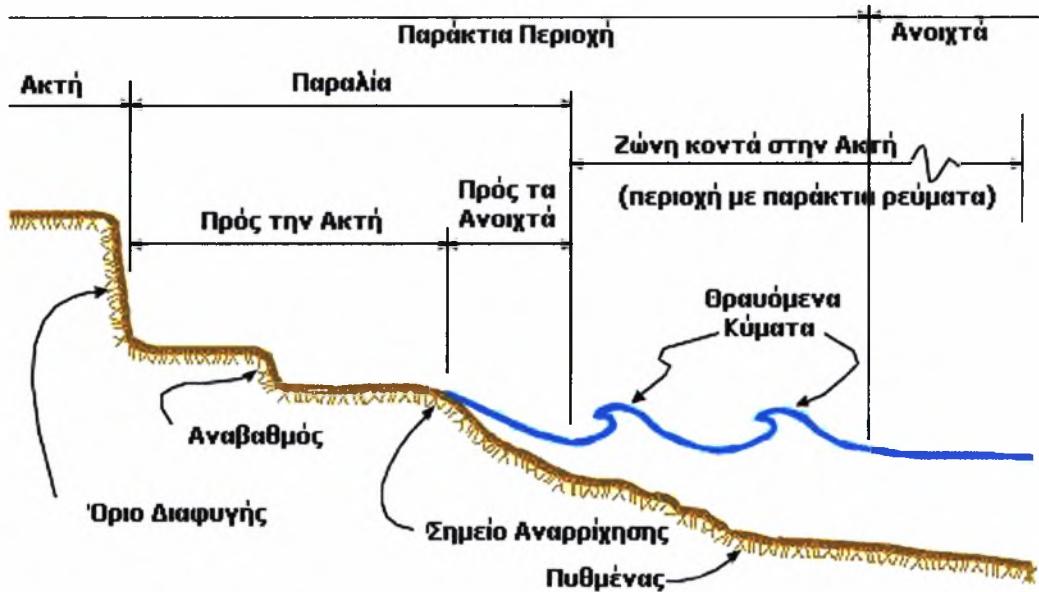
"Ένα ποσοστό της κυματικής ενέργειας καταναλίσκεται στην αποκόλληση και κατακόρυφη διάχυση των κόκκων, και το ρεύμα με την τυρβώδη κινητική του ενέργεια συμπληρώνει τη διάχυση, αναλαμβάνοντας το κύριο μέρος της οριζόντιας μεταφοράς. Η αναλογία των δύο συνιστωσών διαφοροποιείται στις δύο κύριες κατευθύνσεις μεταφοράς φερτών υλών, την παράλληλη και την εγκάρσια στις ακτές, και για το λόγο αυτό οι διαδικασίες κωδικοποιούνται σε δύο ξεχωριστές κατευθύνσεις (χωρίς αυτό να έχει απόλυτη φυσική ισχύ).

4.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ

Η εγκάρσια μεταφορά φερτών υλών αποτελεί τη μια συνιστώσα που συμβάλλει στη διαμόρφωση του προφίλ της ακτής. Εγκάρσια προς την ακτή, σύμφωνα με τη σχηματοποίηση της εικόνας 4.7, διακρίνεται το όριο της επιδράσεως των κυματισμών προς την ανοιχτή θάλασσα, μια ζώνη (offshore) μεταξύ αυτού του ορίου και της γραμμής θραύσεως και μια ζώνη (inshore-surf zone) μεταξύ της γραμμής θραύσεως και του ορίου αναρριχήσεως των κυματισμών. Στη δεύτερη ζώνη, το τμήμα μεταξύ ακτογραμμής και ορίου αναρριχήσεως κυματισμών είναι το μέτωπο της ακτής (foreshore). Πίσω από τις ζώνες αυτές είναι η ράχη της ακτής (backshore), που φτάνει ως το μέγιστο όριο αναρριχήσεως των χειμερινών κυματισμών, και ακολουθούν είτε ζώνη θινών είτε γαιώδη πρηνή.

Η διαμόρφωση του βάθους του νερού ή του εξάλου υψομέτρου των ζωνών αυτών επηρεάζεται από τις εγκάρσιες διαδικασίες μεταφοράς φερτών υλών .

Το όριο επιδράσεως των κυματισμών καθορίζεται από τη σχέση των Swart-Flemming ή αντίστοιχη του Halmeier, που σχετίζει τη μέγιστη κυματική ταχύτητα κοντά στον πυθμένα με τη διάμετρο και το ειδικό βάρος των φερτών:

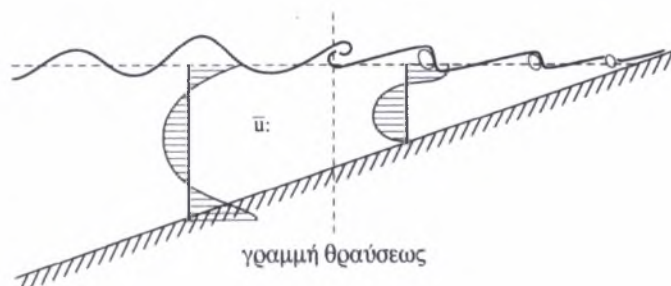


Εικόνα 4.7: Όριο επίδρασης των κυματισμών προς τη θάλασσα και όριο γραμμής θραύσεως.

Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου (<http://huron.lre.usace.army.mil>)

$$U_{0_{cr}} = \frac{\pi H}{T \sin(kd)} = \left(8 \frac{\Delta \rho}{\rho} g D_{50}\right)^{0.5}$$

Η σχέση αυτή δίνει τους συνδυασμούς H , T για τους οποίους βρίσκεται το οριακό βάθος d επίδρασης των κυματισμών. Η εγκάρσια μεταφορά βασίζεται στην αποσταθεροποιητική δράση των κυματισμών και τα δευτερογενή ρεύματα εγκάρσια στην ακτή. Ενώ η μέση κατά το βάθος τιμή του ρεύματος είναι μηδέν, αναπτύσσονται προφίλ ταχύτητας, που σχηματικά παρουσιάζονται στην εικόνα 4.8. Αποτέλεσμα της δράσης κυματισμών και κυματογενών ρευμάτων εγκάρσια στην ακτή, είναι η διαμόρφωση δύο διακεκριμένων προφίλ, του χειμερινού και του θερινού (Εικόνα 4.9α και 4.9β).



Εικόνα 4.8: Προφίλ ταχύτητας παράκτιου ρεύματος.

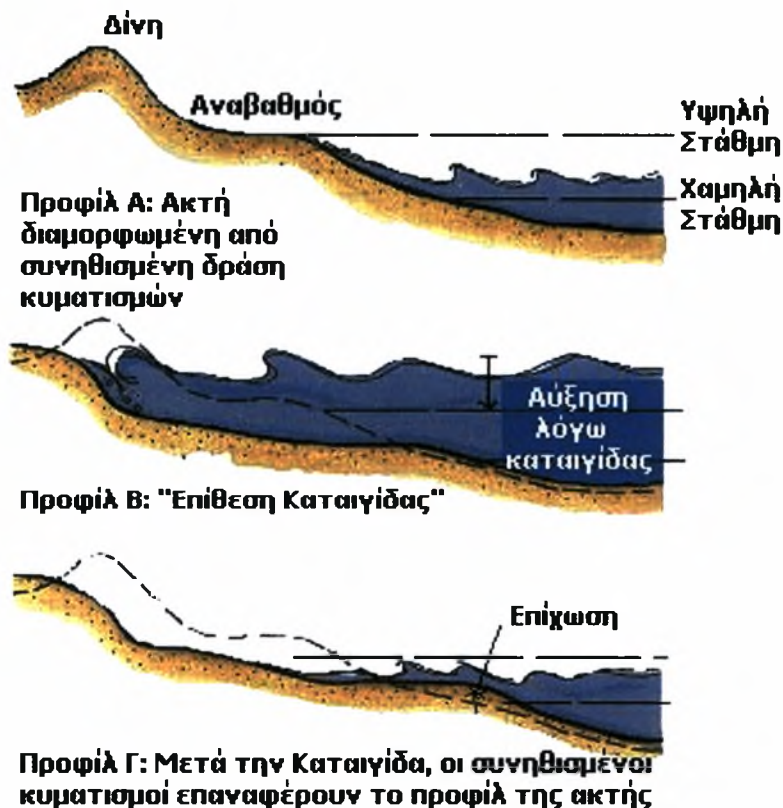
Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.7

Το χειμερινό προφίλ:

Οι κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας H_0/L_0 , διαβρώνουν μέρος του υλικού του «μετώπου» της ακτής και του τμήματος του βυθού μεταξύ γραμμής θραύσεως και ακτογραμμής και το μεταφέρουν στην περιοχή θραύσεως, δημιουργώντας έναν επιμήκη ύφαλο (longshore bar) παράλληλο προς την ακτή που έχει αποστολή τη θραύση των κυματισμών και τη μείωση του ύψους των διαδιδόμενων, πίσω από αυτόν, κυμάτων, αποτελώντας μια προφυλακή της ακτής.

Το θερινό προφίλ:

Οι θερινοί κυματισμοί μικρής καμπυλότητας επαναφέρουν υλικό στο έξαλο μέτωπο της ακτής, μειώνοντας το ύψος του υφάλου και εμπλουτίζοντας σε κοκκώδες υλικό την ακτή.



Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα της δράσης κυματισμών και κυματογενών ρευμάτων εγκάρσια στην ακτή.

Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου.

Η σύγχρονη πειραματική και υπολογιστική τεχνική έχει κατορθώσει να προσομοιώσει και να περιγράψει ποσοτικά τις διεργασίες διάβρωσης και εναπόθεσης. Απλουστευμένη προσέγγιση αποτελούν οι σχέσεις Dean και Sunamura-Horikawa για την αποτίμηση των συνθηκών διαβρώσεως και εναποθέσεως, συναρτήσει των κυματικών συνθηκών και της κοκκομετρίας.

Στη σχέση Dean, ανάλογα με την τιμή του μονώνυμου:

$$F_0 = \frac{H_0}{w_f T}$$

διακρίνονται δύο περιπτώσεις: Για $F_0 > 1$ λαμβάνει χώρα διάβρωση και για $F_0 < 1$ λαμβάνει χώρα εναπόθεση υλικού.

Στη σχέση Sunamura – Horikawa, ανάλογα με την τιμή του μονώνυμου:

$$G_0 = \frac{H_0}{L_0} (\tan \theta)^{0.27} \left(\frac{D_{50}}{L_0} \right)^{-0.67}$$

διακρίνονται δύο περιπτώσεις: Για $G_0 > 18$ συμβαίνει διάβρωση, ενώ για $G_0 < 9$ συμβαίνει εναπόθεση υλικού στην ακτή.

Τέλος, στις Η.Π.Α. έγινε συστηματική συσχέτιση της κλίσης του μετώπου των ακτών με τη μέση διάμετρο κόκκων. Αποτιμήθηκαν καμπύλες, που διαφοροποιούνται από ακτή σε ακτή, πιθανότατα λόγω της διαφοροποίησεως του κυματολογικού κλίματος από ακτή σε ακτή.

4.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ

Η παράκτια συνιστώσα της μεταφοράς φερτών υλών εκτείνεται σε όλο το πλάτος της ζώνης επιδράσεως των κυματισμών στο υλικό της ακτής, αλλά μεγιστοποιείται στη ζώνη θραύσεως, όπου και η τύρβη του νερού αποκτά τους μέγιστους ρυθμούς γενέσεως και αποσβέσεως, συνεπαγόμενη πέρα από το φορτίο πυθμένα και μεγάλο φορτίο σε αιώρηση, αλλά και όπου διαμορφώνεται το παράκτιο ρεύμα λόγω λοξής θραύσεως.

Συστηματικές έρευνες στις ακτές των Η.Π.Α. και της Δυτικής και Βόρειας Ευρώπης (Β. Θάλασσα και Βαλτική), έχουν οριστικοποιήσει τη

συσχέτιση ανάμεσα στην κατά μήκος της ακτής ροή της κυματικής ενέργειας (μέρος της οποίας μορφοποιείται σε παράκτιο ρεύμα και μέρος της αναλίσκεται σε τυρβώδη κινητική ενέργεια), και της παροχής σε βυθισμένο βάρος φερτών υλών κατά μήκος της ακτής.

Η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής, στο σύνολο της ζώνης θραύσεως, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{ls} = \frac{\rho g}{16} H_{sb}^2 c_{gb} \sin 2a_b$$

Σύμφωνα με την σχετική πειραματική καμπύλη, η ροή αυτή συσχετίζεται με την παροχή σε βυθισμένο βάρος ή όγκος φερτών

$$G_l = 15 \cdot 10^6 P_{ls} \quad \text{ή} \quad Q_l = 1290 P_{ls}$$

με μονάδες $G_l (N/Ετος)$, $P_{ls} (J/m/s)$, $Q_l (m^3/Ετος)$

Η διασπορά των πειραματικών δεδομένων δείχνει ότι η εκτίμηση της ολικής παροχής φερτών G ή Q γίνεται με ακρίβεια $\pm 50\%$, και κατά συνέπεια, χρειάζεται επιφύλαξη στην εφαρμογή της, ή υποστήριξη από παρατηρήσεις πεδίου.

Η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης υπολογισμού της ροής ενέργειας P_{ls} , για την περίπτωση πειραματικής συχνότητας εμφανίσεως του σημαντικού ύψους κύματος H_{sb} ακτή, ίσης προς $f(\%)$, απαιτεί τον πολλαπλασιασμό του δεξιού μέλους με τη συχνότητα αυτή. Κατά αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό σε μια ακτή στην οποία κατά τη διάρκεια του έτους επικρατούν διάφορες κυματικές συνθήκες (H_s, a_b), να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι όγκοι φερτών υλικών που κινούνται κατά μήκος της ακτής και οι κατευθύνσεις τους ανάλογα με το πρόσημο της γωνίας θραύσης a_b .

4.5 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ

Όπως περιγράφηκε η παράκτια και η εγκάρσια μεταφορά φερτών υλών, σε μικρό πλάτος της παράκτιας θαλάσσιας ζώνης, είναι σημαντική μεσοβαρά μορφολογικά επακόλουθα για τις ακτές. Αποτελεί σοβαρό τεχνικό πρόβλημα η εκτίμηση του ετησίου ισοζυγίου φερτών υλών σε ένα τμήμα

της ακτής, που είτε είναι εκ φύσεως προβληματικό είτε κινδυνεύει από τις αναδράσεις της φύσεως πάνω σε σχεδιαζόμενο τεχνικό έργο.

Ορίζεται σαν παράκτια φυσιογραφική μονάδα ένα τμήμα της ακτής, το οποίο εξελίσσεται λόγω στερεομεταφορών ανεξάρτητα από την υπόλοιπη ακτή. Στο τμήμα αυτό είναι δυνατό να περιέχονται πολλές πηγές (sources) και πολλές παγίδες (sinks) φερτών υλών.

Οι κυριότερες πηγές και παγίδες φερτών υλών είναι οι εξής:

Πηγές: Τα υδατορρεύματα αποτελούν την κυριότερη πηγή φερτών, καθώς παγκοσμίως μεταφέρουν περί τα 14 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φερτών υλών ετησίως. Το υλικό αυτό προέρχεται από τη διάβρωση χερσαίων εκτάσεων της γης, και ένα μεγάλο μέρος του είναι αργιλώδες και ιλυώδες, ενώ ένα ποσοστό < 5% είναι άμμος. Τα πλέον χονδρόκοκκα παραμένουν στις ακτές, ενώ τα υπόλοιπα καθιζάνουν σε μεγαλύτερα βάθη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί, ότι όλα τα έργα που γίνονται διεθνώς και στη χώρα μας για την αντιδιαβρωτική προστασία, όπως τα έργα ορεινής υδρονομίας, οι φυτοκαλύψεις, τα αντιπλημμυρικά έργα και κατά κύριο λόγο τα φράγματα (ενεργειακά και αρδευτικά) στερούν τις ακτές από μεγάλες παροχές φερτών υλών, που άλλοτε τις εμπλούτιζαν, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα συστηματικών διαβρώσεων σε πολλές ακτές της χώρας μας.

Η διάβρωση γαιωδών όγκων σε ακτές αποτελεί μια δεύτερη πηγή φερτών υλών.

Τέλος, η μεταφορά κόκκων από τους ανέμους, η βιογενής απόθεση από κελύφη νεκρών θαλάσσιων οργανισμών (κοράλλια τροπικών θαλασσών), και η τεχνητή τροφοδοσία ακτών είναι συμπληρωματικές πηγές φερτών υλών.

Παγίδες φερτών υλών: Οι κυριότερες παγίδες φερτών υλών είναι διεθνώς τα παλιρροιακά στόμια, στα οποία οι προς τα έσω στερεοπαροχές κατά την πλημμυρίδα είναι μεγαλύτερες από αυτές προς τα έξω κατά την άμπωτη, και τα υφαλοπρανή και τα υποβρύχια φαράγγια, στα οποία

παγιδεύονται, οδηγούμενα προς τα ανοιχτά μεγάλες ποσότητες φερτών υλών.

Η ανεμογενής ή κυματογενής μεταφορά προς την εσωτερική ζώνη των αμμοθινών, η λείανση από τριβή ανθρακικών υλικών της ακτής (όχι χαλαζιακών) και τέλος οι αμμοληψίες είναι επίσης περιοχές αφαιρέσεως φερτών υλών σε φυσικές συνθήκες. Σημαντικές παγίδες φερτών υλών αποτελούν και τα παράκτια τεχνικά έργα, τα οποία προβάλλουν μέσα στη ζώνη θραύσεως της κυρίαρχης στερεομεταφοράς, με αποτέλεσμα την κατακράτηση μέρους των κατά μήκος της ακτής κινούμενων μαζών ιζημάτων. Εάν, βέβαια η αποστολή των έργων είναι να εμπλουτίσουν μία ακτή που διαβρώνεται, έχει καλώς. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, τέτοιες παγιδεύσεις είναι άχρηστες (π.χ. παγίδευση φερτών και ρήχωση λιμενολεκάνης) ή επιβλαβείς για άλλες περιοχές, όπως θα περιγραφεί πιο κάτω.

Με βάση τη σχέση παράκτιας στερεοπαροχής είναι δυνατό να γίνει ποσοτική ανάλυση του ισοζυγίου φερτών υλών, κατά τη διάρκεια του έτους κατά μήκος μιας ακτής. Ξεκινώντας από ένα όριο της φυσιογραφικής μονάδας, χωρίζεται η ακτή σε τμήματα και υπολογίζεται το αλγεβρικό άθροισμα των όγκων φερτών που μεταφέρονται προς τη μία και την άλλη κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να εξακριβωθεί αν το ισοζύγιο ισορροπεί ή παρουσιάζεται έλλειμμα ή περίσσειμα φερτών υλών κατά τη διάρκεια του έτους.

Η ανάλυση μπορεί να είναι με βάση ένα ιστόγραμμα συχνότητας εμφανίσεως των διαφόρων κυματολογικών συνθηκών και τον υπολογισμό του αθροίσματος:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i Q_i f_i$$

όπου $i = 1, \dots, N$ οι διάφορες διακεκριμένες καταστάσεις (H_{si}, a_{bi}), ε_i το πρόσημο \pm ανάλογα με τη φορά κινήσεως. Q_i ο αντίστοιχος ετήσιος

όγκος φερτών και f_i η συχνότητα εμφανίσεως της καταστάσεως. Επίσης, μπορεί να γίνει και με διακεκριμενοποίηση του χρόνου σε βήματα Δt (6 ώρες π.χ.) εφαρμογή μιας χρονοσειράς αντιστοιχών κυματικών καταστάσεων, και άθροιση αντίστοιχη της παραπάνω, όπου βέβαια για $\Delta t=6$ ώρες, το $f = \frac{6}{(365 \cdot 24)}$.

Στα τμήματα όπου εμφανίζεται έλλειμμα προβλέπεται διάβρωση της ακτής, ενώ στα τμήματα με περίσσειμα πρόσχωση της ακτής.

Άμεση ένδειξη της υπάρξεως ανοιχτού ισοζυγίου φερτών υλών σε μια ακτή με υπεροχή της μιας από τις δύο κατευθύνσεις παράκτιας στερεομεταφοράς είναι δυνατόν να αποτελέσουν και μια σειρά από μορφολογικά αποτυπώματα που φαίνονται με προσεκτική παρατήρηση. Στην εικόνα 4.10 μορφοποιείται η ακτογραμμή σε ακτή όπου υπερέχει η προς τα δεξιά συνιστώσα στερεοπαροχής παρουσία σειράς τεχνικών έργων ή φυσικών εμποδίων (βραχιόνων, μόλων, κυματοθραυστών, βραχωδών ακρωτηρίων, εκβολής υδατορρεύματος).

Κατά αυτόν τον τρόπο και με την παραδοχή παράλληλης μετατοπίσεως του επιπέδου του πυθμένα από την ακτογραμμή ως το βάθος d της επιδράσεως των κυματισμών, είναι δυνατό να υπολογιστεί για το μήκος Δl της ακτής που διαπιστώθηκε το ανισοζύγιο όγκου Ω , το εύρος υποχωρήσεως (διαβρώσεως) ή προωθήσεως της ακτογραμμής Δy

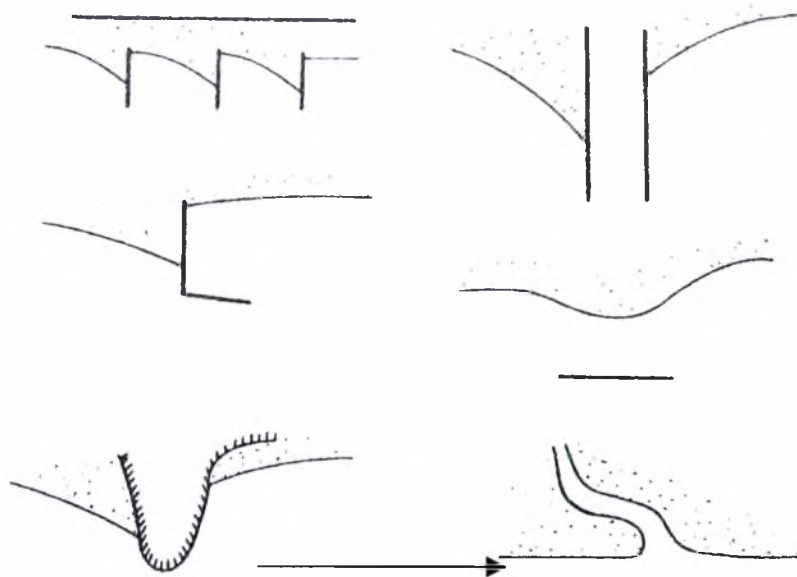
$$\Delta y = \frac{\Omega}{\Delta l \cdot d}$$

Πάνω στη λογική αυτή, στηρίζεται και η διαφορική εξίσωση μεταβολής της ακτογραμμής ανάντη και κατόντη μίας παγίδας φερτών υλών (π.χ. ενός εγκάρσιου μόλου ή βραχίονα), γνωστή σαν εξίσωση Pelnard-Considerere.

Σύμφωνα με τους συμβολισμούς του 4.11 ισχύει

$$\frac{\partial y}{\partial t} h + \frac{\partial \Omega}{\partial x} = 0$$

Με αρχικές συνθήκες $t = 0 \rightarrow y = 0$ και οριακές συνθήκες $x = 0 \rightarrow Q = 0, \frac{dy}{dx} = a_0, x = -\infty \rightarrow Q = Q_0, \frac{dy}{dx} = 0, y = 0$, όπου a_0 η γωνία προσπτώσεως των κυματισμών και Q_0 η φυσική στερεοπαροχή, η λύση της εξίσωσης είναι



κατεύθυνση μεταφοράς φερτών

Εικόνα 4.10: Μορφοποίηση της ακτογραμμής παρουσίας σειράς τεχνικών έργων ή φυσικών εμποδίων. Στην ακτή υπερέχει η προς τα δεξιά συνιστώσα στερεοπαροχής.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.11

όπου,

$$u = -2x \left(\frac{a_0 \cdot h}{Q_0 \cdot t} \right)^{1/2}$$

και

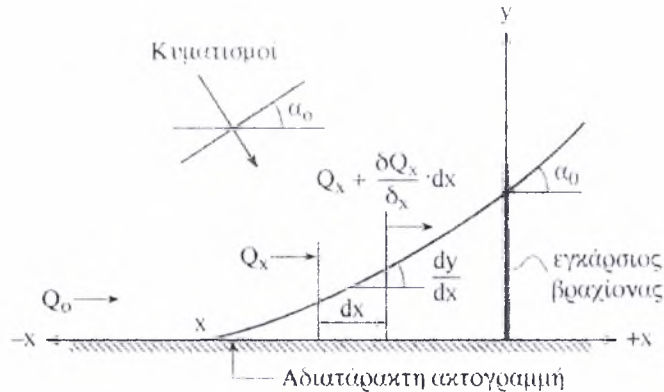
$$\xi = 1 - 2 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du \right]$$

Για $x=0$ ο ρυθμός προσχώσεως της ακτογραμμής είναι

$$y \cdot l_{x=0} = 2 \cdot \left(\frac{Q_0 \cdot t \cdot a_0}{\pi \cdot h} \right)^{1/2}$$

Επίσης, η ανάντη επίδραση της προσαμώσεως εκτείνεται ως ένα μήκος

$$x \approx \frac{3}{a_0} \cdot y \cdot l_{x=0}$$



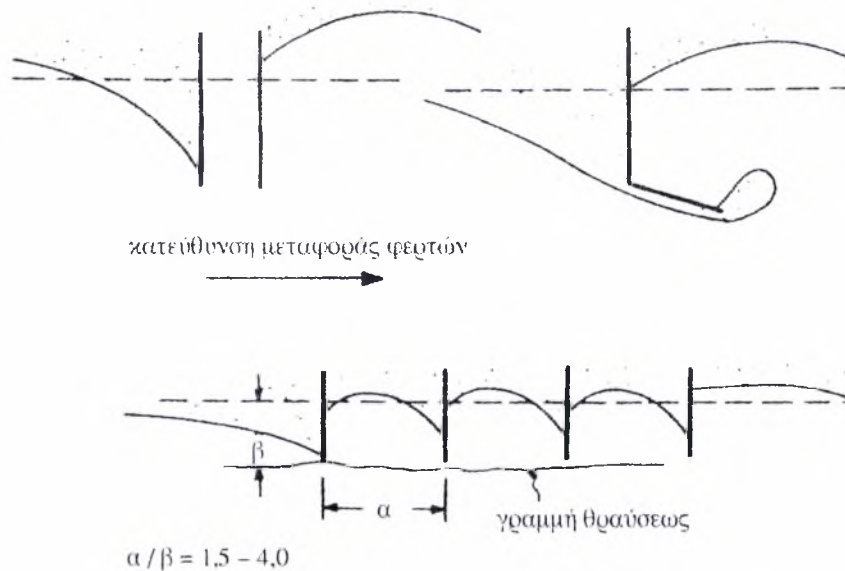
Εικόνα 4.11: Σχήμα για τις επεξηγήσεις των συμβολισμών.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.12

4.6 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΚΤΩΝ – ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

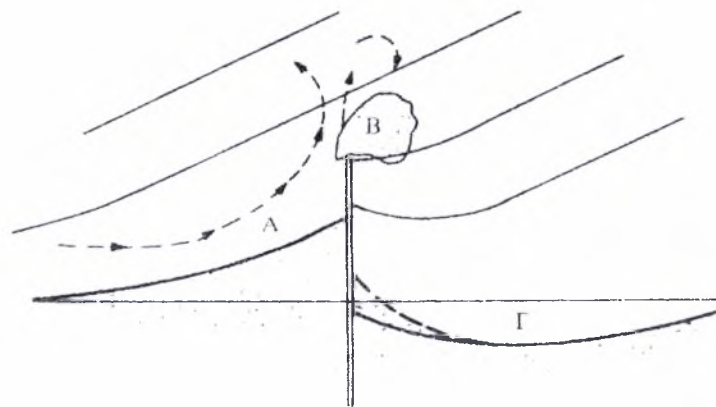
Η παρουσία των παράκτιων έργων στο φυσικό χώρο, όπου συνήθως είχε ήδη αποκατασταθεί μία δυναμική ισορροπία με ισορροπημένο ισοζύγιο φερτών υλών ή με συστηματικές διαβρώσεις ή προσαμώσεις με ήπιους ρυθμούς, κυριολεκτικά αναστατώνουν το φυσικό περιβάλλον, καθώς αναμορφώνουν τα κυματολογικά δεδομένα με την προκαλούμενη ανάκλαση, περίθλαση ή και θραύση, σε περιοχές όπου δεν συνέβαινε πριν, αλλά και καθώς παρεμβαίνουν μέσα στη ζώνη θραύσεως στην παράκτια στερεομεταφορά. Σε ακτές όπου το ισοζύγιο φερτών υλών δεν είναι κλεισμένο, προκαλείται προσάμμωση προς την ανάντη πλευρά, δηλαδή την πλευρά επικρατούσας προέλευσης στερεοπαροχής και διάβρωση κατάντη (εικόνα 4.12).

Μεταξύ των παράλληλων κυματοθραυστών και της ακτής συμβαίνει αλλαγή της κατεύθυνσεως και του ύψους των κυματισμών λόγω περιθλάσεως, και ποσότητες φερτών οδηγούνται και παγιδεύονται στο τμήμα της ζώνης θραύσεως πίσω από το έργο, προκαλώντας προσάμμωση και την εμφάνιση «tombolo» που τείνει να ενώσει το έργο με την ακτή(εικόνα 4.13 και 4.17).



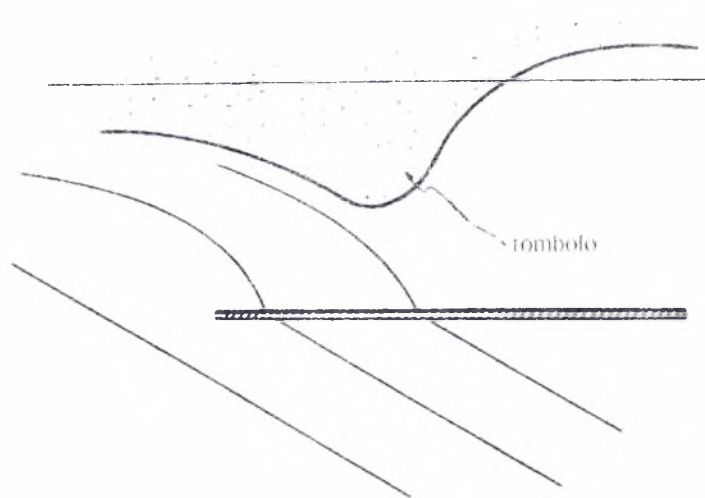
Εικόνα 4.12: Προσάμμωση στην ανάντη πλευρά, που είναι η πλευρά με την επικρατούσα προέλευσης στερεοπαροχής και διάβρωση στα κατόντη.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.13α



Εικόνα 4.13: Προσάμμωση πίσω από ένα λιμενικό έργο και η εμφάνιση tombolo.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.13β.



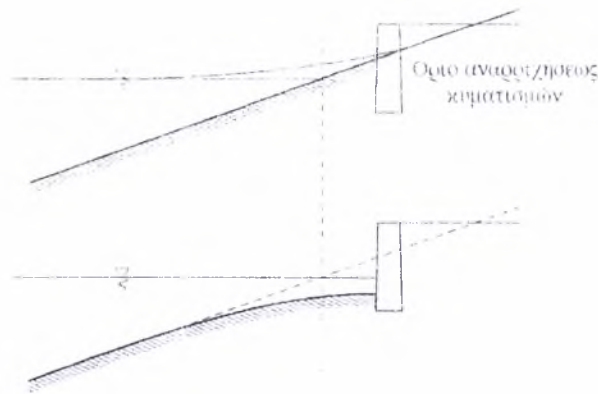
Εικόνα 4.14: Περιοχή παγιδεύσεως φερτών υλών και προσαμμώσεων στο άκρο μόλου, λόγω αδρανειακής αποκολλήσεως από το άκρο των μόλων που αναμορφώνει το παράκτιο ρεύμα.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.13γ.

Στρόβιλοι λόγω αδρανειακής αποκολλήσεως από το άκρο μόλων που αναμορφώνουν το παράκτιο ρεύμα, είναι επίσης περιοχές παγιδεύσεως φερτών υλών και προσαμμώσεων (εικόνα 4.14).

Είσοδοι λιμενολεκανών προσανατολισμένες προς τους κυματισμούς επίσης παγιδεύουν φερτές ύλες, που μπαίνουν από το κυματικά διαταραγμένο περιβάλλον και αποθέτονται στο αδιατάρακτο χώρο της λιμενολεκάνης. Τέλος, παράλληλοι προς την ακτογραμμή τοίχοι αντιστηρίξεως, που είναι μέσα στη ζώνη αναρριχήσεως των κυματισμών, προκαλούν ανάκλαση του κύματος και διάβρωση της ακτής μπροστά τους, με κίνδυνο υποσκαφής τους εάν η θεμελίωσή τους δε γίνει σε επαρκές βάθος ή δε θωρακιστούν προς τη μεριά της θάλασσας, με πρηνή λιθορριπών θωρακίσεως (εικόνα 4.15).

Για την αποφυγή των ανεπιθύμητων μεταβολών της μορφής των ακτών απαιτείται κατά πρώτο, σωστή πρόβλεψη των γεωμορφολογικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνεπάγονται τα παράκτια τεχνικά έργα, που γίνεται με τη βοήθεια φυσικών και υπολογιστικών μοντέλων, και σε συνέχεια λήψη τεχνικών μέτρων, όπως:



Αναδιαμόρφωση βιθών από την κατασκευή παράκτιων τοίχων μέσα στη ζώνη αναρροχίσεως

Εικόνα 4.15: Υποσκαφή τοίχου αντιστήριξης, μέσα στη ζώνη αναρροχίσεως των κυματισμών.

Πηγή: Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα- Χ. Γ. Κουτίτα – Σχ. 10.14.

α. Παράκαμψη των εγκάρσιων έργων που παγιδεύουν τα φερτά, με αποτέλεσμα ανάντη εναπόθεση και κατόντη διάβρωση. Η παράκαμψη γίνεται είτε με χερσαία μεταφορικά μέσα, είτε με υδραυλικές μεθόδους με πλωτές βυθοκόρους που αναρροφούν μίγμα νερού και άμμου (1/10 αναλογίες όγκων) και το μεταφέρουν με αντλίες και αγωγούς.

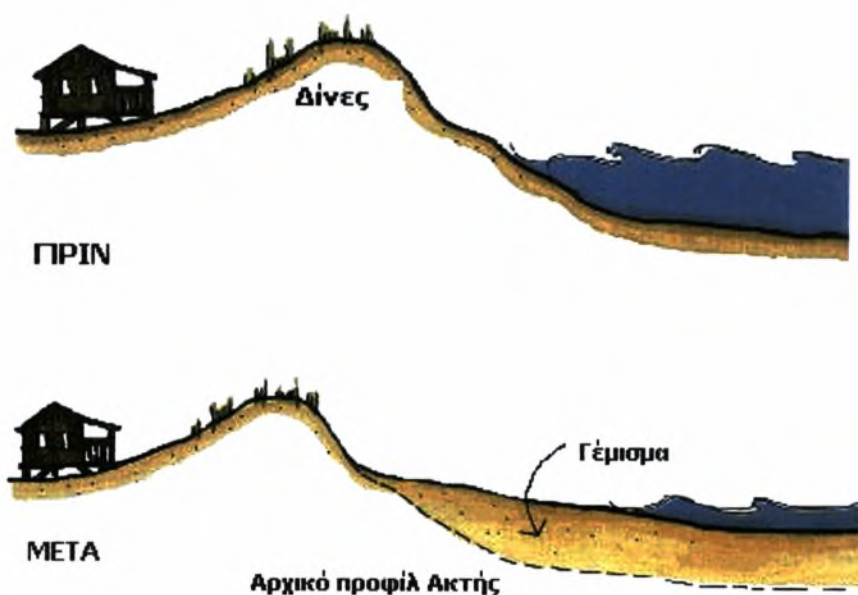
β. Κατασκευή των παραλλήλων κυματοθραυστών, σε απόσταση από την ακτή μεγαλύτερη του μήκους τους ή την τμηματική κατασκευή τους με μεταξύ κενά (ημιδιαφανείς στο κύμα), ώστε να μειωθούν οι αποθέσεις tombolo.

γ. Βέλτιστη χωροθέτηση και προσανατολισμό της εισόδου των λιμενολεκανών , ώστε να ελαχιστοποιείται η παγίδευση φερτών υλών .

δ. Περιοδικό εμπλουτισμό τμημάτων της ακτής, που διαβρώνονται λόγω της υπάρξεως τεχνικών έργων ανάντη ή λόγω γενικότερης ελλείψεως φερτών υλών (εικόνα 4.16), με υλικό κατάλληλης κοκκομετρικής διαβαθμίσεως και σε ποσοστό υπερπληρώσεως (λόγω αναμενόμενων απωλειών υλικών από τους κυματισμούς) που μπορεί να εκτιμηθεί με τη

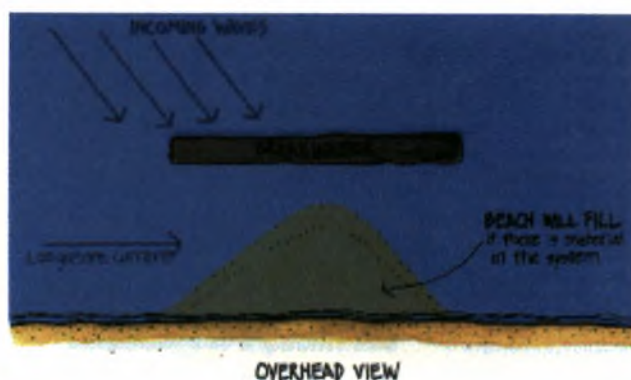
βοήθεια των παραμέτρων $\mu = \frac{(\phi_{84} + \phi_{16})}{2}$ και $\sigma = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{2}$ του υλικού της ακτής (δείκτης n) και του υλικού πληρώσεως (δείκτης b) με τη βοήθεια γραφημάτων.

Στη συνέχεια ακολουθούν κάποιες φωτογραφίες και σχέδια που δείχνουν την επίδραση κυματισμών στις ακτές και το πώς μπορούν κάποια έργα να επηρεάσουν την ακτογραμμή αλλά και να την προστατέψουν:



Εικόνα 4.16: Εμπλουτισμός τμημάτων της ακτής με υλικό που πρέπει να είναι κατάλληλης κοκκομετρικής διαβαθμίσεως.

Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου.

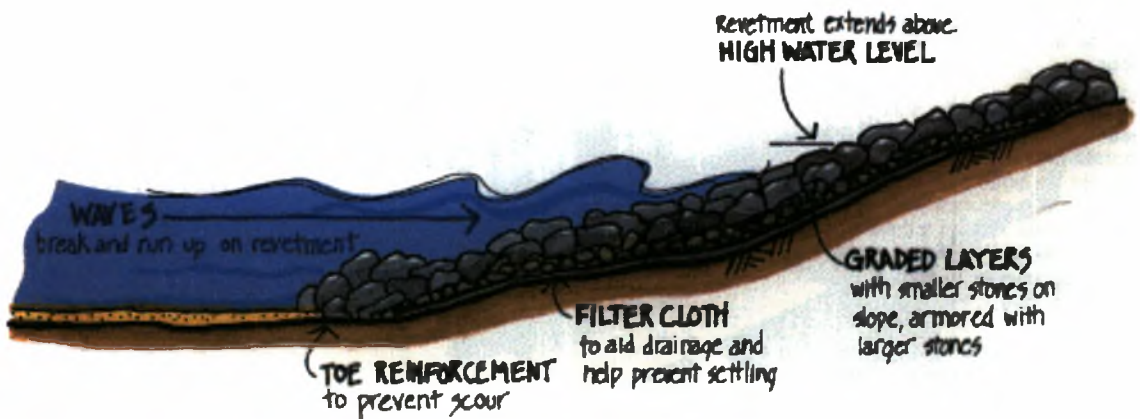


Εικόνα 4.17: Προσάμμιση πίσω από ένα λιμενικό έργο και η εμφάνιση tombolo.

Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου.

ΕΡΓΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΩΝ

(Εικόνες 4.18 – 4.21)



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΑΚΤΕΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**
(Εικόνες 4.22 – 4.37)

ΠΡΙΝ



ΜΕΤΑ



BEFORE

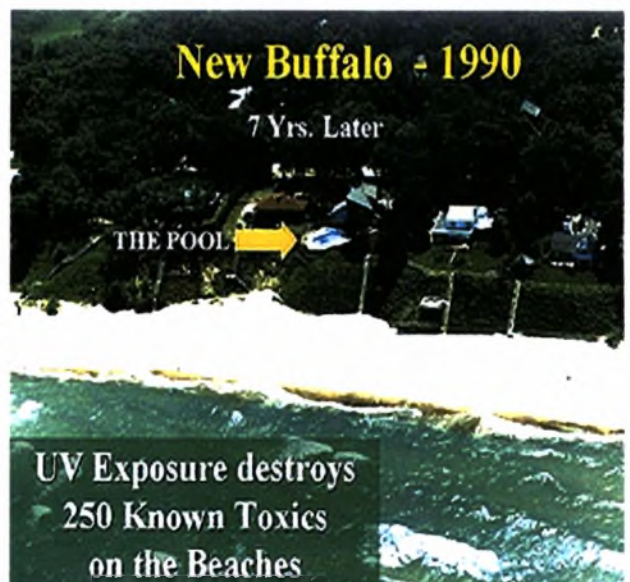


AFTER



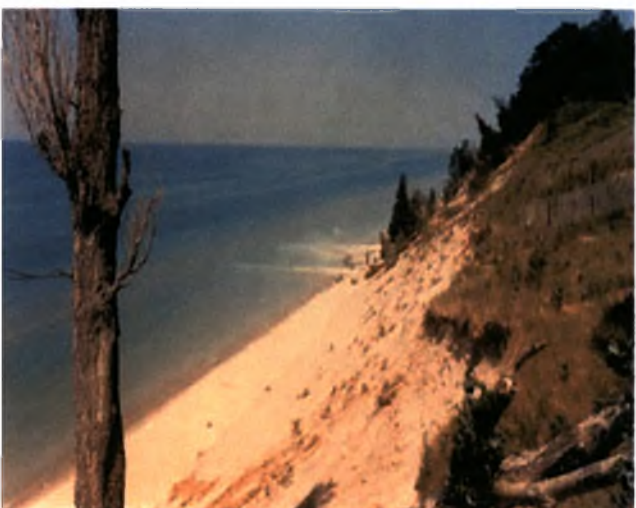
ΠΡΙΝ

ΜΕΤΑ



ΠΡΙΝ

ΜΕΤΑ





στην παραλία και μια εναπόθεση υλικού στον πυθμένα της θάλασσας προς τα ανοιχτά.

Το παραπάνω θέμα έχει αποδειχτεί θεωρητικά, (Hallermeier, 1972 – Allison, 1980 – Brunn, 1980) αλλά και με παρατηρήσεις στο πεδίο (Brunn, 1954, 1962, 1980 – Dubois, 1976 – Rosen, 1978, 1980 – Weggel, 1979 – Fischer, 1980 – Hands, 1980). Ο κανόνας αυτός έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές χωρίς να είναι συνειδητοί οι περιορισμοί του. Θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του, ότι ο κανόνας είναι βασικά δυσδιάστατος, αλλά σχεδόν πάντα εφαρμόζεται στις τρεις διαστάσεις.

5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΚΦΡΑΣΗ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΑ ΤΟΥ BRUNN

Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια αύξηση της στάθμης κατά a , στο θεωρητικό προφίλ ακτής με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχήματος 5.1, αυτό συνεπάγεται, με έναν γεωμορφολογικό τρόπο, μια προέκταση του προφίλ κατά a . Αν το προφίλ ακολουθεί την μορφή της εξίσωσης $y = f(x)$, απαιτείται μια απόθεση υλικού για την αποκατάσταση του παλιού προφίλ της μορφής:

$$\Delta = \int_0^l [f(x) + a] dx - \int_0^l f(x) dx = l \cdot a \quad (5.1)$$

Για να δημιουργηθεί έτσι ένα ποσοτικό ισοζύγιο πρέπει:

Το μέγιστο ποσοτικό ισοζύγιο του προφίλ, δηλαδή ο συνδυασμός του προφίλ της παραλίας και της ζώνης της ανοιχτής θάλασσας να διατηρούν ένα ισορροπημένο σχήμα, ακόμη και ένα υπάρξουν εποχικές επιδράσεις. Ο όρος εποχικές σημαίνει σε βραχυχρόνια κλίμακα. Ωστόσο η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στην μακροχρόνια εξέλιξη της ακτογραμμής.

Η ακτή ή το τμήμα της ακτής όπου εφαρμόζεται ο κανόνας, βρίσκεται σε συνθήκες ποσοτικής ισορροπίας υλικών, δηλαδή το M ολοκληρωμένο στο προφίλ είναι ίσο με μηδέν, όπου $M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$ που είναι η συνολική ποσότητα φερτών υλών εν κινήσει, που μπαίνει ή βγαίνει από το προφίλ προς όλες τις διευθύνσεις υπό τη δράση κυματισμών, ρευμάτων και



ανέμου. Στα παραπάνω μπορεί να προστεθεί και η βυθοκόρηση (Allison, 1981).

Αφού το σύστημα των προφίλ υποτίθεται ότι βρίσκεται σε ισορροπία σε όλες τις διατομές, ο μόνος αναμενόμενος τρόπος που είναι αναμενόμενη η κίνηση του υλικού για απόθεση, είναι προς τα ανοιχτά. Αρκετά προσεγγιστικά και πρακτικά, μπορεί να περιγραφεί μια τέτοια κίνηση από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta = \int_0^l f(x)dx + hs - \int_0^l f(x)dx = hs \quad (5.2)$$

όπου, h είναι το μέγιστο βάθος που γίνεται ανταλλαγή υλικού μεταξύ της ζώνης κοντά στην ακτή (nearshore) και της ζώνης προς τα ανοιχτά (offshore), ενώ l είναι το μήκος του προφίλ όπου γίνεται η ανταλλαγή.

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$s = \frac{l \cdot a}{h} \quad (5.3)$$

Όπως τόνισε και ο Brunh, για την εξαγωγή της παραπάνω απλής σχέσης δεν χρησιμοποιήθηκαν, η κλίση του προφίλ, το σημείο τομής του νέου με το παλιό προφίλ, ούτε η θέση ή η γωνία κλίσης του υποθαλάσσιου αναβαθμού στα ανοιχτά. Αυτό θεωρείται ένα προτέρημα της θεωρίας. Όπως δήλωσε και ο Allison (1980), η ακρίβεια της θεωρίας, εξαρτάται μόνο από τον λόγο s/l (σχήμα 5.1) και ο λόγος αυτός είναι πάντα πολύ μικρός.

Συγκεκριμένα ο Allison αναφέρει ότι, για μικρούς λόγους $s/l \ll 1$, δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζει κανείς κανένα στοιχείο για την μορφή του πυθμένα και ο κανόνας του Brunh, το δείχνει αυτό, αφού δεν συμπεριλαμβάνει καμία παράμετρο που να περιγράφει το σχήμα του πυθμένα. Άρα, η μεταβλητή h/l στη σχέση, που δεν έχει καμία σχέση με τη μορφή του πυθμένα, είναι, με μια μηδενική προσέγγιση, μια σταθερά που ισχύει για κάθε προφίλ, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του λόγου a/s . Αυτός ο λόγος είναι γνωστός ως σταθερά του Brunh ή *αριθμός Brunh*.



Τα παραπάνω, ωστόσο, δεν πρέπει να ερμηνευτούν πολύ αυστηρά. Ισχύουν για απλά γεωμετρικά προφίλ ακτών (Brunn, 1954, 1962, 1980) και πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί όσο αφορά το είδος των υλικών της ακτής.

5.3 ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η θεωρία έχει δοκιμαστεί και δοκιμάζεται εκτεταμένα στο πεδίο με πραγματικές μετρήσεις, για παράδειγμα από τους Schwartz (1967), DuBois (1976), Fischer (1980), Hands (1980), Rosen (1978,1980) και άλλους. Η ισχύ της θεωρίας είναι αναμφισβήτητη όταν οι οριακές συνθήκες ορίζονται σωστά, κάτι που δεν συμβαίνει πάντα. Για δυσδιάστατες συνθήκες, ο κανόνας έχει αποδειχτεί μαθηματικά σωστός (Allison, 1980). Η δυσκολία βρίσκεται στον σαφή προσδιορισμό των ορίων για τους παράγοντες h και l (εικόνα 5.1), και στη σύνθεση των υλικών από τα οποία αποτελούνται οι ακτές, που είναι συνήθως άμμος που το μέγεθός του κόκκου της, αυξάνει με το βάθος προς τα ανοιχτά, ωστόσο αρχίζει να παρουσιάζεται σε μέγεθος ιλύος ή και αργίλου. Τέτοια λεπτόκοκα υλικά μπορεί να προέρχονται από την διάβρωση των ακτών, από ποτάμια ή να είναι και φερμένα από τον άνεμο, συμπεριλαμβάνοντας σκόνη από την έρημο και από ηφαιστεια (Brunn, 1980 – Hands, 1980).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η θεωρία υποθέτει ότι η επίδραση της αύξησης της στάθμης της θάλασσας στη διάβρωση των ακτών είναι δυσδιάστατη, αλλά η φύση είναι τρισδιάστατη. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη πρέπει να λάβει κανείς υπόψη του ένα μεμονωμένο συνεχές μήκος προς τα ανοιχτά. Υποθέτουμε ότι η μεταφορά της ύλης γίνεται σε έναν κύβο, x y z , όπου x είναι το μήκος προς τα ανοιχτά αρχίζοντας από ένα καθορισμένο σημείο της ακτής, y είναι το μήκος του κύβου στην ακτή και z το βάθος του νερού από ένα καθορισμένο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας. Η διαφορά στην αριθμητική ποσότητα που περνά από δύο διατομές x - z κατά μήκος του y υποτίθεται αρχικά ότι είναι μηδέν. Εάν δεν υπάρχει ισορροπία μεταξύ των δύο διατομών, αυτό θα πρέπει να ληφθεί



υπόψη στις εξισώσεις της υλικής ισορροπίας. Υπάρχουν δύο οριακά επίπεδα $y-z$, το ένα είναι στην παραλία ή στις θίνες, το άλλο σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος, όπου διαχωρίζεται, η προς την ακτή από την προς τα ανοιχτά απόθεση των υλικών, κατά τη διεύθυνση x .

Στην παραλία θα πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη και να προστεθεί στο ισοζύγιο, το φαινόμενο της απόθεσης υλικού από τον αέρα. Συνήθως το ποσό αυτό είναι αμελητέο, αλλά σε μερικές περιπτώσεις μπορεί η ποσότητα αυτή να παίζει σημαντικό ρόλο.

Το εξωτερικό επίπεδο $y-z$ είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστεί, αφού δεν μπορεί να γίνει ξεκάθαρα ο προσδιορισμός του ορίου ανταλλαγής υλικού της ακτής με τα ανοιχτά. Θεωρητικά το h και το l , του σχήματος 5.1, έχουν ένα όριο, στην πράξη όμως αυτά τα όρια είναι «όρια εξασθένησης».

Ο όρος «βάση του κύματος», αναφέρεται στην ανάδευση υλικού στον πυθμένα της θάλασσας. Έρευνες από τους Hands (1980) και Hallermeier (1972), προσπάθησαν να προσδιορίσουν ορθολογικές μεθόδους για τον υπολογισμό των ορίων όπου γίνεται η ανάδευση της άμμου του πυθμένα και της μακροχρόνιας διάβρωσης, λόγω της μακροχρόνιας αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Το βραχυχρόνιο (εποχιακό) όριο είναι περίπου όσο το $2H_b$, όπου το H_b είναι ύψος κύματος του υψηλότερου θραυόμενου κύματος. Η «βάση του κύματος» είναι λοιπόν, σχετική με το όριο δράσης του κύματος που αναδύει το υλικό του πυθμένα, που υπό την στατιστική έννοια εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που έχει ληφθεί υπόψη (Hallermeier - 1972). Έτσι δεν είναι ή βάση ενός κύματος με περίοδο επανεμφάνισης τα πέντε χρόνια η ίδια με αυτή ενός κύματος με περίοδο επανεμφάνισης τα πενήντα χρόνια. Επιπλέον υπάρχει και το φαινόμενο της διάχυσης του υλικού στον πυθμένα και άλλα φαινόμενα οριακών στρωμάτων (Brunn - 1980).

Ο κανόνας του Brunn, τέλος πάντων, βασίζεται σε μια ποσοτική δυσδιάστατη ισορροπία μεταξύ της παραλίας και του πυθμένα, στην οποία υπάρχει σίγουρα μια μεταβατική περιοχή μεταξύ των ρηχών νερών και τα ανοιχτά. Εάν οι φυσικές δυνάμεις δεν αλλάξουν την περιοχή στα ρηχά νερά,



το ισοζύγιο θα διατηρηθεί. Ωστόσο η κατάσταση στα ανοιχτά ίσος να είναι διαφορετική, όπου δυνάμεις που ασκούνται και τα χαρακτηριστικά των υλικών είναι πολύ διαφορετικά από αυτά στα ρηχά νερά. Δεν είναι ανάγκη να υπάρχει κατάσταση ισορροπίας του ισοζυγίου στα ανοιχτά, όπου τα θαλάσσια ρεύματα προέρχονται από τα βαθύτερα νερά. Τα υλικά του πυθμένα που βρίσκονται εν κινήσει είναι άργιλος και ιλύς, ορισμένες φορές και λεπτή άμμος που είναι εύκολο να μεταφερθούν από ρεύματα αρκετά δυνατά. Αμμοκυμάτια που έχουν δημιουργηθεί από ρεύματα, έχουν βρεθεί και σε πολύ μεγάλα βάθη, όπως στα 1500 μέτρα στο Blake Plateau, που περιελάμβαναν ενδείξεις υποσκαφής από ρεύματα σε κοχύλια. Εξαρτώμενη από το μέγεθος του κόκκου του πυθμένα, ή «βάση του κύματος» μπορεί να επεκταθεί από τα ρηχά έως τα βαθύτερα νερά. Αυτό αναφέρεται σε ακτές ανοιχτές προς τη θάλασσα, όπου τα υλικά με μέγεθος κόκκου αργίλου και ιλύος, μπορούν να μεταφερθούν εν αιώρηση σε μεγάλες αποστάσεις έως ότου να εναποτεθούν.

Για να προσδιορίσει κανείς το όριο της ανταλλαγής υλικού μεταξύ της περιοχής κοντά στην ακτή και των ανοιχτών, πρέπει να λάβει υπόψη του το μέγεθος των κόκκων και τα χαρακτηριστικά των υλικών που υπάρχουν στην περιοχή. Τα πιο λεπτόκοκα υλικά που ίσος βρίσκονται εν αιώρηση, πρέπει να συμπεριληφθούν στις εξισώσεις ισορροπίας. Αυτό αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο βάθος προς τα ανοιχτά όπου τα λεπτόκοκα ίσος μεταφέρονται στα πιο βαθιά νερά και εναποτίθενται εκεί (Brunn – 1980, Hands – 1982). Τότε η εξίσωση $s = l \cdot a/h$ πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα. Ο παράγοντας r , είναι ο λόγος του ποσοστού επί τις εκατό του υλικού που διαβρώνεται με διάμετρο μικρότερη των 0.06 χιλ., προς το συνολικό υλικό που διαβρώνεται. Έτσι η εξίσωση γίνεται:

$$s = l \cdot a(1 + r/100)/h \quad (5.4)$$

Ωστόσο δεν μπορεί να προσδιοριστεί μια διαχωριστική γραμμή μεταξύ των ρηχών νερών και των ανοιχτών. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι υπάρχει, όπως προαναφέρθηκε, μια διαχωριστική περιοχή συγκεκριμένου πλάτους, που μπορεί να προσδιοριστεί συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά

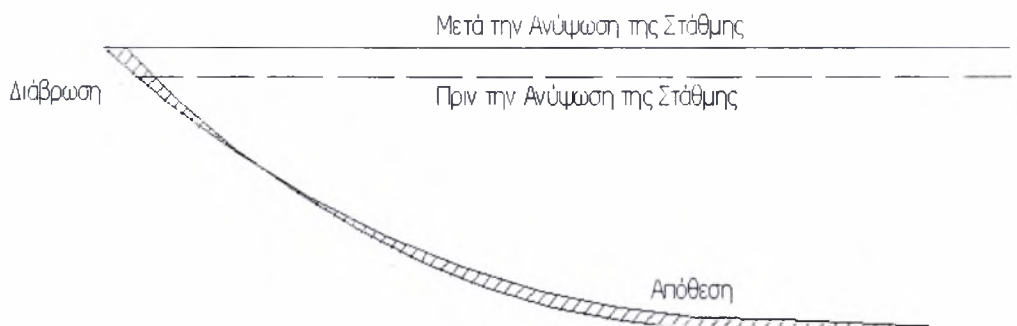
των υλικών του πυθμένα προς τα ανοιχτά και προς την ακτή, ερευνώντας της διακυμάνσεις του πυθμένα ή προσδιορίζοντας τις κινήσεις των υλικών που μεταφέρονται. Ο προσδιορισμός των κινήσεων του υλικού θα πρέπει να γίνει για μια αρκετά μακρά διάρκεια, ώστε το συμπέρασμα για το πλάτος της ζώνης να είναι ακριβές. Ωστόσο για την εξαγωγή ενός ποιοτικά ισορροπημένου και καλού ισοζυγίου δεν είναι απαραίτητο να πάει κανείς σε τόσο λεπτομερή ανάλυση της μεταφοράς των υλικών. Η περιοχή ανταλλαγής στα ανοιχτά μπορεί να προσδιοριστεί, από μια μακροχρόνια μελέτη του βάθους του πυθμένα και της μορφής του. Μπορεί να λάβει κανείς υπόψη του τις βέβαιες, πολύ περιορισμένες δε, απώλειες λεπτόκοκκων, εάν υπάρχουν, στην παραλία και στα ρηχά νερά. Ένα άλλο πρόβλημα μπορεί να είναι η μεταφορά στα ανοιχτά υλικού με τη βοήθεια ρευμάτων.

Στις επόμενες εικόνες περιγράφονται διάφορες περιπτώσεις:



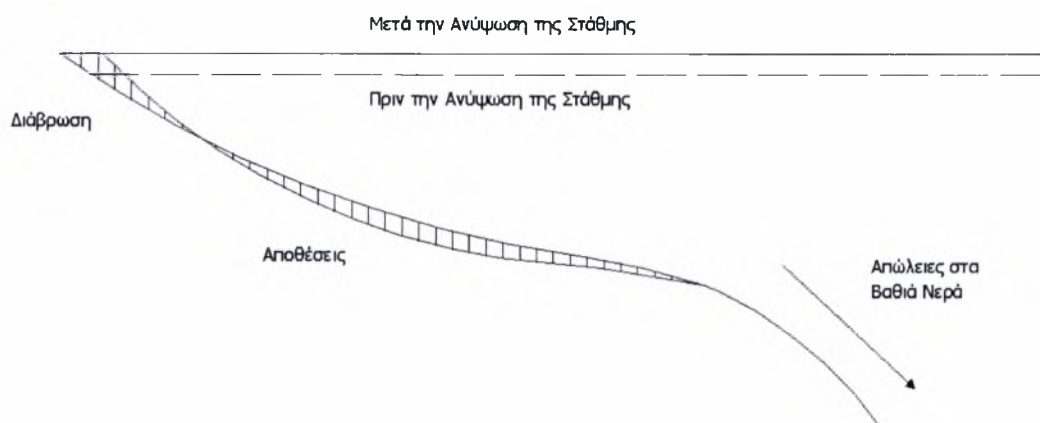
Σχήμα 5.2: Εδώ φαίνεται μια κλειστή λεκάνη, για παράδειγμα μια λίμνη, όπου μπορεί να υπολογιστεί η απόθεση υλικών, όταν είναι γνωστή η διάβρωση και μεταφορά υλικού από ποταμούς. Στην περίπτωση της αύξησης της στάθμης της λίμνης θα διαβρωθούν οι όχθες της και αποτεθεί υλικό στον πυθμένα της. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται στις μεγάλες λίμνες των Η.Π.Α.

Πηγή: Brunn, P. -1983- Review of conditions for uses of the Brunn Rule of erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89.



Σχήμα 5.3: Εδώ φαίνεται μια διατομή όπου όλα τα υλικά από τη διάβρωση λόγω της αύξησης της στάθμης εναποτίθενται στον πυθμένα, όπου προστίθενται και τα άλλα υλικά απόθεση, για παράδειγμα από ποταμούς.

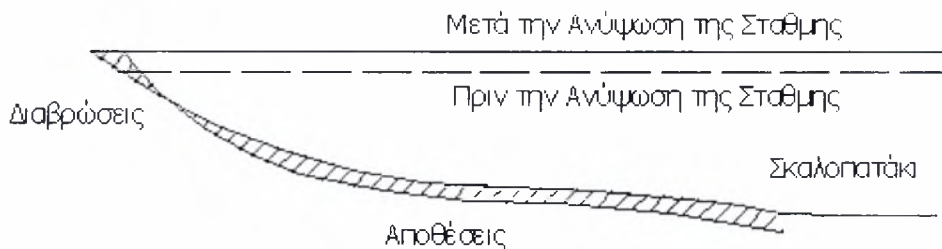
Πηγή: Brunn, P. -1983- Review of conditions for uses of the Brunn Rule of erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89.



Σχήμα 5.4: Εδώ απεικονίζεται μια διατομή που προς τα ανοιχτά βαθιάειν απότομα. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απώλεια υλικού προς τα ανοιχτά προσθέτοντας κάποιον όρο στην εξίσωση. Η απώλεια υλικού σε χαράδρες είναι ένα γνωστό φαινόμενο. Εάν η απώλεια μπορεί να προσδιοριστεί, θα πρέπει κανείς, να προσθέσει μια παράμετρο στη εξίσωση: $s = l \cdot a (1 + r/100)/h$ που θα

γίνει έτσι: $s = \frac{l \cdot a}{h} (1 + \frac{r}{100})(1 + \frac{R}{100})$, όπου R είναι το ποσοστό του υλικού που χάνεται. Βέβαια είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί αυτός ο όρος.

Πηγή: Brunn, P. -1983- Review of conditions for uses of the Brunn Rule of erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89.



Σχήμα 5.5: Εδώ απεικονίζεται μια διατομή συνηθισμένη στις περιπτώσεις όπου το προφίλ της έχει δημιουργηθεί σε περίοδο με χαμηλότερη στάθμη. Φαίνεται ένα μικρό σκαλοπατάκι προς τα ανοιχτά, που γίνεται έτσι μια περιοχή απόθεσης υλικού που έρπει προς τα ανοιχτά. Αυτό σημαίνει ότι ίσως κάποια λεπτόκκοκα θα δραπετεύσουν προς τα ακόμη βαθύτερα νερά. Στην περίπτωση αμμωδών ακτών το φαινόμενο αυτό είναι ήσσονος σημασίας. Με άλλα λόγια αυτό σημαίνει ότι το ίδιο το σκαλοπατάκι αποτελεί όριο ανταλλαγής υλικού, όμως οι αποθέσεις στο ίδιο αυτό το σημείο μπορεί να είναι μεγάλου μεγέθους.

Πηγή: Brunn, P. -1983- Review of conditions for uses of the Brunn Rule of erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89.

Συνήθως, είναι δυνατών να προσδιοριστεί το εξωτερικό όριο της περιοχής ανταλλαγής υλικών με περισσότερες από μια μεθόδους. Έτσι για παράδειγμα αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την τοπογραφία του πυθμένα και αποτελέσματα από έρευνες για την απόθεση των υλικών καταλήγοντας έτσι σε ένα λογικό αποτέλεσμα που είναι χρήσιμο για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την διάβρωση και απόθεση των υλικών.

Περιοχή	0 – 6 m	6 – 9 m
Tokai – Ιαπωνία	0.0 m	0.15 m
Mission Bay - Καλιφόρνια	0.25 m	0.45 m
Ακτή Βόρειας Θάλασσας Bovbjerg – Δανία	0.40 m	0.70 m

Πίνακας 5.1: Ο πίνακας αυτός δείχνει τις τιμές της κάθετης, βραχυχρόνιας διακύμανσης του πυθμένα.

Πηγή: Brunn, P. -1983- Review of conditions for uses of the Brunn Rule of erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89.

Το πόσο βαθιά βρίσκεται η περιοχή ανταλλαγής υλικών, εξαρτάται κυρίως από την έκθεσή της στους κυματισμούς. Χωρίζοντας τον πυθμένα σε μικρά χαρακτηριστικά βάθη, μπορεί κανείς να φτάσει σε αποτελέσματα για την διαφοροποίηση, στο βάθος της ζώνης, για τρεις διαφορετικές περιοχές (πίνακας 5.1), ξεκινώντας από περιοχές με σχετικά μικρή



(Ιαπωνία), με μέτρια (Καλιφόρνια) και μεγάλη (Δανία) έκθεση σε κυματισμούς (Brunn – 1973).

Έρευνες στη Δανία έδειξαν ότι η διακύμανση του πυθμένα, εποχικά εξαρτώμενη, σε ακτές της Βόρειας Θάλασσας, κοντά στο Thyboron, γίνεται και σε βάθος 16 m, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση περίπου $3H_b$ (Brunn - 1973).

Ο παραπάνω πίνακας (πίνακας 5.1) δείχνει ότι οι εποχικές διακυμάνσεις του πυθμένα φτάνουν σε βαθύτερα νερά. Για παραδείγματα μετρήσεις πεδίου στην La Jolla Beach στην Νότια Καλιφόρνια, κοντά στη Mission Bay, έδωσαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 5.2). Εδώ φαίνεται ότι η διακύμανση του πυθμένα επηρεάζεται ακόμη και σε βάθος 21 m και ίσως και βαθύτερα. Ωστόσο ο Trask (1955), αναφερόμενος στην ακτή της Νότιας Καλιφόρνιας, υπολόγισε ότι τα 9 m είναι το βάθος – όριο για εποχιακές διακυμάνσεις του πυθμένα κοντά στην ακτή, και τα 18 m, το βάθος – όριο για εποχιακές διακυμάνσεις του πυθμένα στα ανοιχτά. Η ζώνη ανταλλαγής υλικών του πυθμένα στην περίπτωση μιας αύξησης της στάθμης της θάλασσας ίσος να βρίσκεται και βαθύτερα.

Βάθος (m)	Αύξηση Στάθμης (m)	Sand level occurrence in% of obs. time
21	0.04	61
17	0.05	88
9	0.10	100
5.5	0.20	100

Πίνακας 5.2: Ο πίνακας αυτός δείχνει την διακύμανση του πυθμένα στην La Jolla, Καλιφόρνια (Inman – 1956).

Πηγή: Brunn, P. -1983- Review of conditions for uses of the Brunn Rule of erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89.

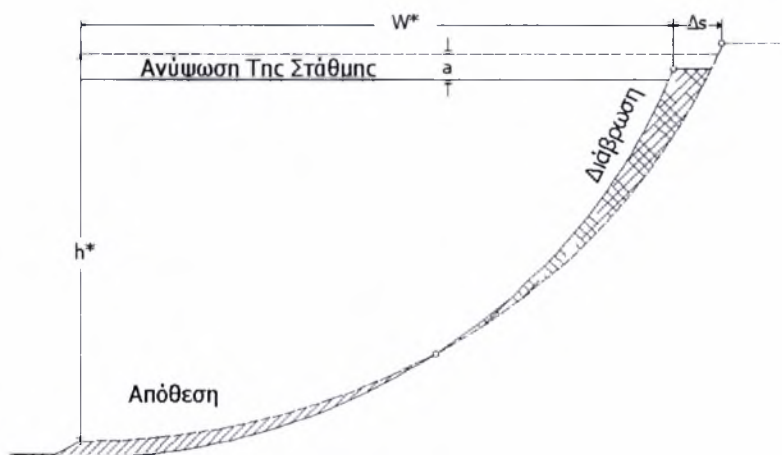
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η διακύμανση του πυθμένα μετά το βάθος των 17 m, είναι πολύ μικρή. Ακόμη και εάν η ζώνη ανταλλαγής υλικού εκτείνεται πέρα από τα 21 m, η ανταλλαγή είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα και δεν επηρεάζει την ισχύ του κανόνα του Brunn.

5.4 ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΑ ΤΟΥ BRUNN

5.4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Κατά καιρούς έχουν γίνει προσπάθειες για την πιστοποίηση του κανόνα του Brunn με πραγματικές μετρήσεις και με μαθηματικά μοντέλα. Μια από αυτές τις προσπάθειες είναι αυτή των N. Mimura και H. Nobuoka. Ο N. Mimura και ο H. Nobuoka μελέτησαν την υποχώρηση της ακτογραμμής στην περιοχή Niigata στην Ιαπωνία που αντιμετωπίζει μεγάλα προβλήματα λόγω της σχετικής αύξησης της στάθμης. Στην περιοχή έγιναν και τοπογραφικές μελέτες και αναλύθηκαν ιστορικά δεδομένα έτσι ώστε να συγκριθούν οι παρατηρούμενες με τις υπολογιστικές τιμές.

Εδώ θα εξεταστεί πόσο καλά μπορεί να αποδώσει ο κανόνας του Brunn την υποχώρηση της ακτογραμμής λόγω της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας ή την αντίστοιχη σχετική ανύψωση λόγω της καθίζησης του εδάφους. Για να γίνει η σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα από το πεδίο που μετρήθηκαν, υπολογίστηκαν με τον κανόνα του Brunn οι διάφορες θέσεις της ακτογραμμής για την μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.



Σχήμα 5.6: Αντίδραση του προφίλ της ακτής στην ανύψωση της στάθμης της θάλασσας.

Πηγή: N. Mimura and H. Nobuoka – Verification of the Brunn Rule for the estimation of shoreline retreat caused by sea level rise - 1995, Coastal Dynamics, 607-616.



Μια βασική υπόθεση του Brunn είναι η ύπαρξη του ισοζυγίου στο προφίλ της ακτής. Υπάρχουν πολλές μελέτες για τον προσδιορισμό της εξίσωσης που να περιγράφει το φαινόμενο. Εδώ χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση που βασίζεται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5.6):

$$h = A \cdot s^{2/3} \quad (5.5)$$

όπου, το s είναι το μήκος προς τα ανοιχτά, h το βάθος του νερού σε απόσταση s από την ακτή και το A είναι μια παράμετρος που αντιπροσωπεύει την κλίση της ακτής. Ως γνωστόν η παράμετρος αυτή είναι σχετική και με τις συνθήκες κυματισμών και το είδος των υλικών της ακτής.

Η υποχώρηση της ακτογραμμής μπορεί να υπολογιστεί γενικά με την παραπάνω εξίσωση, εξισώνοντας την ποσότητα του διαβρωμένου υλικού της ακτής με αυτό που έχει μεταφερθεί και εναποτεθεί προς τα ανοιχτά. Σχηματικά αυτό φαίνεται στην Εικόνα 5.6. Στο παρελθόν έχουν προταθεί, από ερευνητές, πολλές σχέσεις για τον υπολογισμό της υποχώρησης αυτής όπως αυτές του Brunn(1962), Hands(1980) και Dean(1991). Οι Mimura et al. (1993), πρότειναν μια νέα εξίσωση που λαμβάνει υπόψη την κλίση της ακτής στην περιοχή αναρρίχησης των κυματισμών. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές που προέκυψαν σε σχέση με την εξίσωση που πρότεινε ο Dean, είναι πολύ μικρές.

5.4.2 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΗΣ NIIGATA ΣΤΗΝ ΙΑΠΩΝΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε η περιοχή για την οποία έγινε η πιστοποίηση του κανόνα είναι η ακτή Niigata στην Ιαπωνία. Αυτή η ακτή βρίσκεται στην πόλη της Niigata, και βλέπει προς τη θάλασσα της Ιαπωνίας. Υποφέρει εδώ και πολλές δεκαετίες από την διάβρωση. Εντυποσιακή είναι η υποχώρηση της ακτής, που παρατηρήθηκε σε κάποια σημεία και φτάνει τα 350 μέτρα τα τελευταία 80 χρόνια. Από έρευνες έχουν προσδιοριστεί διάφοροι λόγοι στους οποίους οφείλεται η διάβρωση.

Το 1909 κατασκευάστηκε ο κυματοθραύστης για την προστασία του λιμένα της Niigata που προκάλλεσε την διακοπή της παράκτιας μεταφοράς φερτών. Επίσης προκλήθηκε δραματική μείωση στην στερεομεταφορά του

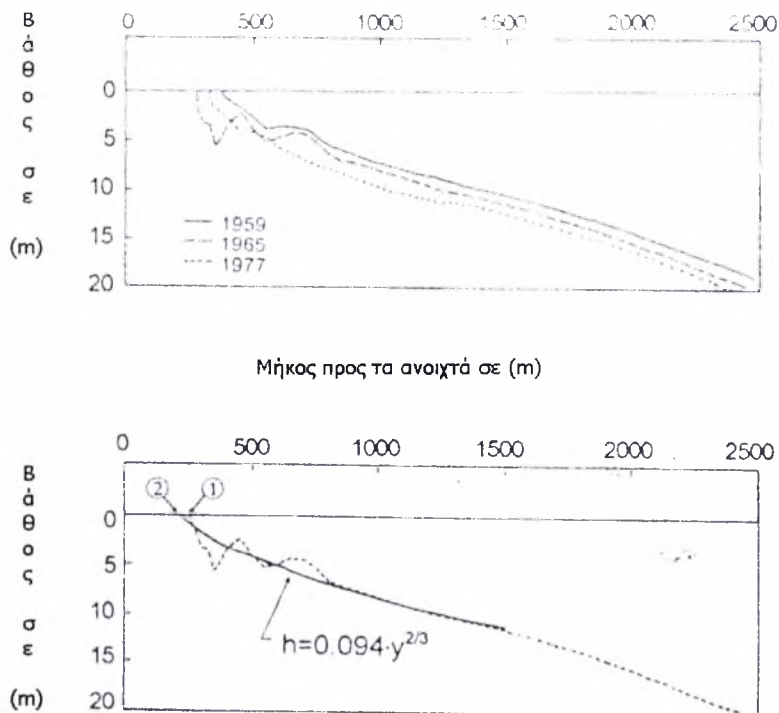
ποταμού Shinano, του μεγαλύτερου ποταμού της Ιαπωνίας, μετά την κατασκευή του αγωγού Okoyu το 1922. Τέλος σημαντικό ρόλο έπαιξε η δραματική καθίζηση του εδάφους της περιοχής με αποτέλεσμα την σχετική ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Η καθίζηση κυμάνθηκε από το 1930 έως το 1980 μεταξύ 30 εκατοστών και 1.35 μέτρων!

Η έρευνα του Mimura επικεντρώνεται λοιπόν στην υποχώρηση της ακτογραμμής λόγω της καθίζησης του εδάφους. Η καθίζηση αυτή προκλήθηκε από την αλόγιστη άντληση υπόγειων υδάτων. Ο αριθμός των γεωτρήσεων ανήρχετο σε 400 έως το 1973 οπότε και λήφθηκαν δρακόντεια μέτρα με αποτέλεσμα την μείωσή τους. Μετά την λήψη αυτών των μέτρων η καθίζηση άρχισε να επιβραδύνεται.

5.4.3 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ

Για να γίνουν αντιληπτές οι αλλαγές στο προφίλ της ακτής έγιναν τοπογραφικές μελέτες στην περιοχή από το 1959 έως το 1979 που επαναλαμβάνονταν κάθε ένα με δύο χρόνια. Μελετήθηκε η τοπογραφία του βυθού από την ακτή μέχρι και 2500 μέτρα προς τα ανοιχτά, όπου το βάθος του νερού φτάνει τα 200 μέτρα.

Αφού ο κανόνας του Brunh αναφέρεται σε φυσικές αμμώδεις ακτές είναι απαραίτητο να επιλεγεί ένα μη διαταραγμένο τμήμα της ακτής για την πιστοποίηση του μοντέλου. Το τμήμα της ακτή που επιλέγηκε για την πιστοποίηση είναι περίπου ευθύγραμμο και οι ισοβαθείς που ξεκινούν από εκεί είναι πάντα παράλληλες με την ακτογραμμή. Έτσι μπορεί να θεωρήσει κανείς ότι η τοπογραφία είναι δύο διαστάσεων. Στο τμήμα της μελέτης υπάρχει ένα ακόμη κανάλι εκτροπής του ποταμού Shinano, η λεγόμενη εκτροπή Sekiya, που ολοκληρώθηκε το 1972 και έτσι το τμήμα αυτό της ακτής, από τότε και μετά, έχει δεχτεί την ανθρώπινη παρέμβαση. Ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί ότι το τμήμα αυτό είναι φυσικό χωρίς να την ανθρώπινη παρέμβαση, μέχρι την κατασκευή του κυματοθραύστη του λιμανιού το 1979, όπου και τελειώνει η περίοδος μελέτης.



Σχήμα 5.7: Στο πρώτο σχήμα απεικονίζονται οι αλλαγές του προφίλ της ακτής την περίοδο της μελέτης όπως αυτές έχουν μετρηθεί από τις τοπογραφικές μελέτες. Στο δεύτερο σχήμα γίνεται μια σύγκριση μεταξύ μετρούμενων και των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων για το προφίλ της ακτής.

Πηγή: N. Mimura and H. Nobuoka – Verification of the Brunn Rule for the estimation of shoreline retreat caused by sea level rise - 1995, Coastal Dynamics, 607-616.

5.4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε στην έρευνα των Mimura et al. χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτική η σχέση που πρότειναν το 1993. Για την εξίσωση αυτή είναι απαραίτητο να υπολογιστούν ή να μετρηθούν στο πεδίο το ύψος του αναβαθμού, η κλίση της ακτής και το βάθος ανταλλαγής υλικών προς τα ανοιχτά. Για αυτή την έρευνα δεν ήταν διαθέσιμα το βάθος του αναβαθμού και η κλίση της ακτής σε όλα τα σημεία της περιοχής μελέτης. Η εκτίμηση που βασίζεται στις έρευνες των Sanamura (1984) and Takeda(1983), δίνει ότι το ύψος του αναβαθμού και η κλίση της ακτής παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις λόγω της ομοιομορφίας της περιοχής μελέτης. Έτσι λαμβάνονται σταθερά κατά μήκος της ακτογραμμής, δηλ. 2 μέτρα και 0.056, αντίστοιχα.

Προσδιορίστηκε ότι το βάθος ανταλλαγής υλικών στο προφίλ της συγκεκριμένης ακτής (h^*), κυμαίνεται μεταξύ 7 και 8 μέτρα. Ωστόσο από τότε που όλο και μεγαλύτερα κύματα συνέβαλλαν σε αλλαγές του προφίλ της ακτής, το h^* υπολογιζόταν από τη σχέση Hallermeir (1978) που βασίζεται στο μέγιστο κύμα αντί του μέσου. Έτσι υπολογίστηκε τελικά ότι το βάθος είναι 10 μέτρα. Ο Nicholls(1993), πρότεινε να χρησιμοποιείται το 1.75 του βάθους για να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο μακράς διάρκειας. Εντέλει χρησιμοποιήθηκε λοιπόν το $h=17.5$ m.

5.4.5 ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Γενικά πρέπει να αναφερθεί, πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου για τον υπολογισμό της ακτογραμμής είναι περίπου ίδια με αυτή που συνέβησαν στην πραγματικότητα.

Στην περίπτωση όμως όπου χρησιμοποιήθηκε το 1.75 του h στις εξισώσεις τα αποτελέσματα του μοντέλου υπερεκτιμούν και δίνουν μια υποχώρηση της ακτογραμμής μεγαλύτερη από ότι αυτή που συνέβη. Αυτό ίσως σημαίνει ότι το 1.75 είναι δίνει ένα πολύ μεγάλο βάθος και δεν μπορεί να αποδώσει την μακρά κλίμακα, που εδώ είναι μερικές δεκαετίες. Αυτό ίσως να αποτελεί και ένα άλλο θέμα για μελέτη στο μέλλον.

5.4.6 ΝΕΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών εξαρτώνται από τη χρονική στιγμή που επιλέγεται σαν στιγμή έναρξης των υπολογισμών, από τη στιγμή που διακύμανση της ακτογραμμής είναι σημαντική. Η θέση της ακτογραμμής στο προφίλ είναι η υποθετική μέση τιμή, στη χρονική διάρκεια ενός έτους. Η υπολογισμένη ακτογραμμή είναι αυτή που προκύπτει από τη μέση θέση της, που προσδιορίζεται από τους κυματισμούς που δρουν στην ακτή πριν την τοπογραφική μελέτη. Έτσι, για να πιστοποιηθεί η επάρκεια του μοντέλου του κανόνα του Brunn, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η αλλαγή της θέσης της ακτογραμμής εντός μιας περιόδου μικρής διάρκειας.



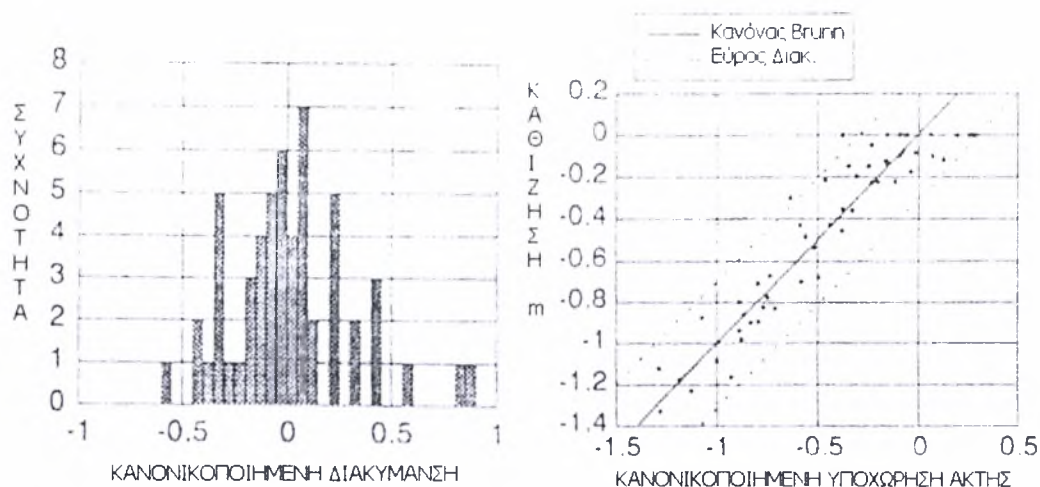
Η διακύμανση της ακτογραμμής ποικίλει ανάλογα με την παράκτια θέση. Για την ανάλυση της διακύμανσης, η απόκλιση της μετρούμενης ακτογραμμής από την ισορροπημένη θέση, Δy , κανονικοποιήθηκε με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta y = \frac{y_{μετρ.} - y_{ισορ.}}{\Delta y_{100}} \quad (5.6)$$

όπου, $y_{μετρ.}$ και $y_{ισορ.}$ είναι η μετρημένη θέση της ακτογραμμής και η θέση της στην ισορροπία, αντίστοιχα και Δy_{100} η υποχώρηση της ακτογραμμής υπολογισμένη από τον κανόνα του Brunh, στην περίπτωση της ανύψωσης της στάθμης κατά 1 μέτρο.

Η κατανομή του Δy μπορεί να αποδοθεί με την κατανομή του Gauss. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η τυπική απόκλιση για να αποδοθεί το εύρος της διακύμανσης της θέσης της ακτογραμμής. Η τυπική απόκλιση του Δy είναι η ίδια στην αδιάστατη μορφή και η πραγματικά τιμή διαφέρει για κάθε μετρημένη γραμμή. Είναι φανερό ότι η μετρημένη υποχώρηση της ακτογραμμής, είναι μέσα στα όρια διακύμανσης ακτογραμμής. Στην παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.8), φαίνεται η σύγκριση της μετρημένης με υπολογισμένη θέση της ακτογραμμής σε κανονικοποιημένη μορφή. Οι περισσότερες διακυμάνσεις της ακτογραμμής και εδώ, είναι εντός των εκτιμημένων ορίων. Από τα παραπάνω και τις παρακάτω εικόνες μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι, αν ληφθεί υπόψη η εποχική διακύμανση της ακτογραμμής, το μοντέλο με τον κανόνα του Brunh, μπορεί να προβλεφθεί η υποχώρηση της ακτογραμμής σε μακροχρόνια βάση.

Επίσης έχει ληφθεί υπόψη η μεταφορά φερτών υλικών προς τα ανοιχτά. Ωστόσο κατά τη διάρκεια της έρευνας διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό των μεταφερόμενων υλικών ήταν ανομοιόμορφα κατανομημένο κατά μήκος της ακτογραμμής και η επιρροή του, στη διάβρωση της ακτής, ήταν πολύ μικρή.



Σχήμα 5.8: Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται η κατανομή της διακύμανσης της θέσης της ακτογραμμής. Στο δεύτερο σχήμα γίνεται μια σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενων των υπολογιζόμενων υποχωρήσεων της ακτογραμμής.

Πηγή: N. Mimura and H. Nobuoka – Verification of the Brunn Rule for the estimation of shoreline retreat caused by sea level rise - 1995, Coastal Dynamics, 607-616.

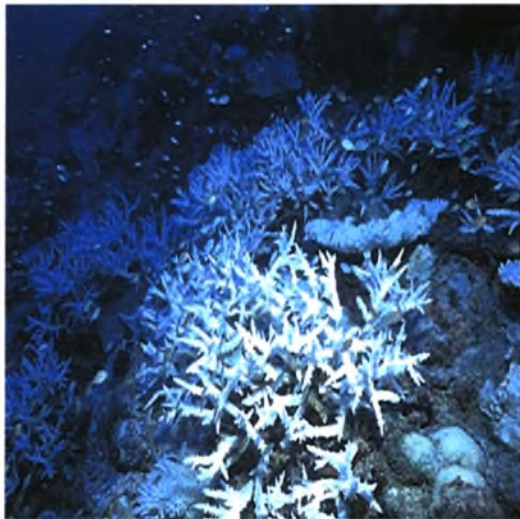
5.5 ΚΟΡΑΛΛΙΟΓΕΝΕΙΣ ΥΦΑΛΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΚΤΩΝ

Σήμερα οι ζωντανοί κοραλλιογενείς ύφαλοι καλύπτουν μόλις 930.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα, έκταση μικρότερη από την Αίγυπτο, αλλά φιλοξενούν το 25% των θαλάσσιων ειδών που γνωρίζουμε.

Οι οικογένεια των κνιδόζων περιλαμβάνει τα μαλακά κοράλλια (Alcyonaria), τις γοργόνιες (Gorgonia) και τα μονήρη κοράλλια, τα υδροκοράλλια και ερυθρά κοράλλια, τα μαύρα κοράλλια (Antipatharia) με κερατοειδείς σκελετούς και, βέβαια, τα λοθοκοράλλια (Madreporaria) που οικοδομούν υφάλους. Όλες αυτές οι μορφές είναι στην πραγματικότητα αποικίες από χιλιάδες πολύποδα που εκκρίνουν ασβεστόλιθο για προστασία.

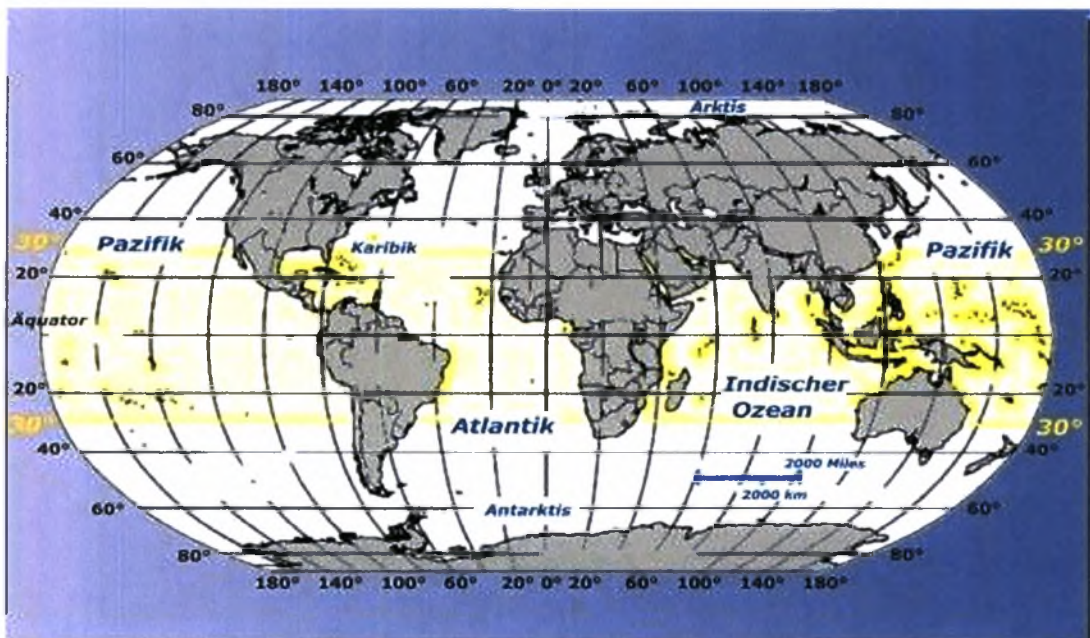
Οι αποικίες αναπτύσσονται αργά, σπανίως περισσότερο από ένα εκατοστό το χρόνο. Ορισμένες απόλλες που μεγαλώνουν εδώ και 50 εκατομμύρια χρόνια, έχουν σήμερα πάχος 1500 μέτρα

Τις τελευταίες δεκαετίες η ρύπανση, η εντατική αλιεία, η υπερβολική ανάπτυξη κατά μήκος των ακτών και άλλοι παράγοντες, όπως η αλλαγή του



Εικόνες 5.9 – 5.11 Εδώ απεικονίζονται διάφοροι κοραλλιογενείς ύφαλοι και ένα από τα κοραλλιογενή νησιά του Ειρηνικού όπου φαίνεται ξεκάθαρα η προστασία που του προσφέρει η κοραλλιογενής ζώνη που το περιβάλλει.

Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου.



Εικόνα 5.12: Εδώ φαίνεται η εξάπλωση των κοραλλιογενών υφάλων στη γη.
Πηγή: Ιστοσελίδα διαδικτύου.



κλίματος, έχουν καταστρέψει το ένα δέκατο των κοραλλιογενών υφάλων της γης και αλλοίωσαν σημαντικά το ένα τρίτο. Οι επιστήμονες προειδοποιούν ότι με αυτόν το ρυθμό σε πενήντα χρόνια τα τρία τέταρτα των κοραλλιογενών υφάλων θα έχουν καταστραφεί.

Επειδή οι ύφαλοι αναπτύσσονται συχνά κοντά στην επιφάνεια απορροφούν ενέργεια από τους προσπίπτοντες κυματισμούς στην ακτή, προστατεύοντας έτσι την ακτή από τη διάβρωση. Με αυτό τον τρόπο έχουν δημιουργηθεί αναρίθμητα μικρά νησιά και ατόλλες στους μεγάλους ωκεανούς της γης. Τα νησιά αυτά είναι πολύ επιρρεπή στους κυματισμούς ίδιος αν καταστραφεί αυτή η προστατευτική αυτή ζώνη από τα κοράλλια που τα περιβάλλει.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας της γης αυξάνει με αποτέλεσμα να αυξάνει και η μέση θερμοκρασία του νερού των ωκεανών. Τα κοράλλια είναι πολύ ευαίσθητα στην αλλαγή της θερμοκρασίας του νερού στο οποίο ζουν, με αποτέλεσμα να πεθαίνουν κατά χιλιάδες ή και να «αρρωσταίνουν», αποβάλλοντας τα φανταχτερά τους χρώματα, εξασθενώντας και όντας έτσι εκτεθειμένα στη μανία των κυμάτων.

Πολλά νησιά στον Ινδικό και Ειρηνικό Ωκεανό αντιμετωπίζουν είδη την μανία των κυμάτων λόγω της εξαφάνισης των κοραλλιών και της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας. Τα νησιά Κιριμπάτι, που είναι γνωστά από τη δημοσιότητα που πήραν στους εορτασμούς του ερχομού της δεύτερης χιλιετίας, ανακοίνωσαν πρόσφατα ότι σε 25 χρόνια, τουλάχιστο, θα έχουν εξαφανιστεί από το χάρτη. Παρόμοια προβλήματα αντιμετωπίζουν και άλλα πολλά νησιά της Πολυνησίας και της Καραϊβικής.

Ίσως οι κοραλλιογενείς ύφαλοι μας προειδοποιούν ότι πρέπει να δώσουμε περισσότερη προσοχή στην προστασία του περιβάλλοντος, όπως ακριβώς μας δείχνουν πόσο μεγάλη πίεση ασκεί ο σύγχρονος άνθρωπος στους φυσικούς πόρους των τροπικών περιοχών.



Αλλά ταυτόχρονα, αυτά τα πλάσματα που βοήθησαν να «χτιστεί» ο κόσμος, μας δείχνουν με ξεκάθαρο τρόπο ότι η προστασία του περιβάλλοντος δεν είναι αντίθετη προς τις ανάγκες του ανθρώπου.



6. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Το μοντέλο πρόγνωσης υποχώρησης της ακτογραμμής αποτελείται από τρία υπομοντέλα:

1. Κυματικό υπομοντέλο
2. Υπομοντέλο εκτίμησης στερεομεταφοράς
3. Υπομοντέλο μεταβολής μορφολογίας πυθμένα

Στο πρώτο υπομοντέλο υπολογίζονται οι υδροδυναμικές συνιστώσες της κυματικής κίνησης. Στο δεύτερο υπομοντέλο εκτιμάται η στερεοπαροχή, η οποία είναι και το δεδομένο του τρίτου υπομοντέλου για την πρόβλεψη της διάβρωσης και της πρόσχωσης της ακτής.

6.1 ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ

Το υδροδυναμικό κυματικό υπομοντέλο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων μετάδοσης μη γραμμικών διασπειρομένων κυματισμών τύπου Boussinesq (Karambas and Koutitas, 2002). Οι εξισώσεις γράφονται:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} = 0 \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial M_u}{\partial x} - \frac{1}{h} U \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = & \frac{(d^2 + 2d\zeta)}{3} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} + d_x h \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} + \\ & + \frac{d^2}{3} \left(U \frac{\partial^3 U}{\partial x^3} - \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + d \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} + d d_x U \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + d_x \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial t} - \\ & - d \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left(\delta \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (6.2) \\ & + \frac{1}{15} d^2 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} + g \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 \left(U \frac{\partial U}{\partial x} \right)}{\partial x^2} \right) + 2 \frac{1}{15} d d_x \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} + g \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right) \end{aligned}$$



όπου U είναι η μέση ως προς το βάθος ταχύτητα, d είναι το βάθος, ζ η ανύψωση της θάλασσας, δ είναι το πάχος του στρώματος του επιφανειακού κυλίνδρου του θραυόμενου κυματισμού, $h=d+\zeta$ και

$$M_u = (d + \zeta) u_o^2 + \delta (c^2 - u_o^2) \quad (6.3)$$

όπου c η ταχύτητα μετάδοσης και u_o η ταχύτητα στον πυθμένα (Karambas and Koutitas, 2002).

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για θραυόμενους και μη θραυόμενους κυματισμούς και έχουν πεδίο εφαρμογής τα ενδιάμεσα και ρηχά νερά.

Η τριβή πυθμένα προσομοιώνεται από:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{1}{2} f_w u_o |u_o| \quad (6.4)$$

όπου f_w είναι ο συντελεστής τριβής πυθμένα:

$$f_w = 0.3 \quad \text{για} \quad \frac{A_b}{K_N} \leq 1.57 \quad \text{και} \quad (6.5)$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log \frac{1}{4\sqrt{f_w}} = -0.08 + \log \frac{A_b}{K_N} \quad \text{για} \quad \frac{A_b}{K_N} > 1.57 \quad (6.6)$$

με A_b το εύρος της μετατόπισης του υλικού σημείου στο πυθμένα και K_N την τραχύτητα του πυθμένα που σχετίζεται με το ύψος η_r και το μήκος λ_r των αμμοκυματιών:

$$K_N = 170 \sqrt{\theta_{2.5} - 0.05} d_{50} + 8\eta_r^2 / \lambda_r \quad (6.7)$$

όπου d_{50} είναι η μέση διάμετρος των κόκκων και $\theta_{2.5}$ η παράμετρος

Shields που βασίζεται στην τραχύτητα $K_N = 2.5 d_{50}$:

$$\theta_{2.5} = \frac{1}{2} f_{2.5} \frac{u_{ow-\max}^2}{(s-1)g d_{50}} \quad (6.8)$$



όπου u_{ow-max} είναι το εύρος της κυματικής ταχύτητας στον πυθμένα, $f_{2.5}$ είναι ο συντελεστής τριβής για $K_N=2.5d_{50}$ και s είναι η ειδική πυκνότητα των ιζημάτων: $s = (\rho_s - \rho) / \rho$ (ρ και ρ_s είναι οι πυκνότητες του νερού και των φερτών, αντίστοιχα).

Το ύψος η_r και το μήκος λ_r των αμμοκυματιών υπολογίζονται από τις σχέσεις που προτείνονται από τον Nielsen (1992) για τυχαίους κυματισμούς:

$$\eta_r = 21 A_b \psi^{-1.85} \quad \text{for } \psi > 10 \quad \text{και} \quad \frac{\eta_r}{\lambda_r} = 0.342 - 0.34 \sqrt[4]{\theta_{2.5}} \quad (6.9) \ \& \ (6.10)$$

όπου

$$\psi = \frac{u_{ow-max}^2}{(s-1) g d_{50}} \quad (6.11)$$

Ο όρος $-\tau_b/\rho h$ ενσωματώνεται στο δεξιό μέρος της εξίσωσης της ορμής.

Στη ζώνη αναρρίχησης των κυματισμών η κυματική κίνηση προσομοιώνεται με την προσθήκη ενός όρου διασποράς στο δεξιό μέρος της εξίσωσης της ορμής:

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_s h \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (6.12)$$

όπου v_s είναι ο συντελεστής τυρβώδους ιξώδους:

$$v_s = \ell^2 \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \quad (6.13)$$

όπου ℓ είναι η χαρακτηριστική διάσταση που σχετίζεται με το συνολικό βάθος: $\ell = 2h$.

Κοντά στην ακτή όπου το ℓ είναι μικρότερο από το χωρικό βήμα dx $\ell = 2 dx$.



Η οριακή συνθήκη 'ξηρού πυθμένα' εφαρμόζεται για την προσομοίωση της αναρρίχησης. Η συνθήκη γράφεται:

$$\text{εάν } (d+\zeta)_{i-1} < 0.00001 \text{ και } U_i > 0 \quad \text{τότε } \zeta_i = -d \text{ και } U_i = 0 \quad (6.14)$$

και

$$\text{εάν } (d+\zeta)_i < 0.00001 \text{ και } U_i < 0 \quad \text{τότε } \zeta_i = -d \text{ και } U_i = 0 \quad (6.15)$$

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται με το αριθμητικό σχήμα πρόβλεψης-διόρθωσης Πεπερασμένων Διαφορών Adams-Bashforth-Moulton με ακρίβεια τετάρτης τάξεως σε τέσσερα επίπεδα χρόνου (Wei and Kirby, 1995). Οι εξισώσεις γράφονται με τη μορφή:

$$\zeta_t = E(\zeta, U) \quad P_t = F(\zeta, U) \quad (6.16) \text{ \& } (6.17)$$

με

$$P_t = U_t + (1/3 + 1/15)d^2 (U_{xxt}) \quad (6.18)$$

και

$$E = -((d+\zeta)U)_x \quad (6.19)$$

$$F = -UU_x - g\zeta_x + g(1/15)d^2 (\zeta_{xxx}) - ns \quad (6.20)$$

όπου ns οι υπόλοιποι ανώτερης τάξης μη γραμμικοί όροι και οι όροι κλίσης πυθμένα.

Στο πρώτο βήμα γίνεται η πρόβλεψη των τιμών του νέου χρονικού βήματος n+1:

$$\zeta^{n+1} = \zeta^n + dt/12 (23E_i^n - 16E_i^{n-1} + 5E_i^{n-2}) \quad (6.21)$$

$$Q^{n+1} = Q^n + dt/12 (23F_i^n - 16F_i^{n-1} + 5F_i^{n-2}) \quad (6.22)$$

όπου dt είναι το χρονικό βήμα και n, n-1, n-2 είναι τα προηγούμενα επίπεδα χρόνου.

Στο δεύτερο βήμα γίνεται η διόρθωση σύμφωνα με:



$$\zeta^{n+1} = \zeta^n + dt/24 (9E_i^{n+1} + 19E_i^{n+1} - 5E_i^{n-1} + E_i^{n-2}) \quad (6.23)$$

$$Q^{n+1} = Q^n + dt/24 (9F_i^{n+1} + 19F_i^{n+1} - 5F_i^{n-1} + F_i^{n-2}) \quad (6.24)$$

Οι παράγωγοι ως προς x (και y) προσεγγίζονται με την κεντρική διαφορά:

$$(w_x)_i^n = (-w_{i+2}^n + 8w_{i+1}^n - 8w_{i-1}^n + w_{i-2}^n) / (12dx) \quad (6.25)$$

όπου $w = (\zeta, U, V)$ και dx και το χωρικό βήμα.

Με το σχήμα διόρθωσης εκτελούνται προσεγγίσεις μέχρι το σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών προσεγγίσεων να γίνει μικρότερο από μία προκαθορισμένη τιμή. Το σφάλμα f υπολογίζεται για κάθε μία από τις δύο μεταβλητές ζ, U ($f = \{\zeta, U\}$) και ορίζεται από τη σχέση :

$$\Delta f = \frac{\sum_{ij} |f_{ij}^{n+1} - f_{ij}^{(n+1)*}|}{\sum_{ij} |f_{ij}^{n+1}|} \quad (6.26)$$

με το σύμβολο $*$ στον εκθέτη να αναφέρεται στην προηγούμενη προσέγγιση.

Αυτή η διακριτοποίηση εξαφανίζει αυτόματα όρους σφαλμάτων που είναι της ίδιας τάξης με τους όρους ανώτερης τάξης και που θα έπρεπε να διορθωθούν εάν χρησιμοποιηθούν σχήματα χαμηλότερης τάξης.

Το σύστημα διεγείρεται από μία χρονοσειρά $\zeta^*(t)$ ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας που εφαρμόζεται σε ένα σημείο στο εσωτερικό του πεδίου. Η ανύψωση $\zeta^*(t)$ προστίθεται στην υπολογισμένη ανύψωση που υπολογίζεται από το αριθμητικό σχήμα (Larsen and Dancy, 1983). Στα πρώτα 20 σημεία επιβάλλεται η συνθήκη ορίου απορρόφησης sponge layer ώστε να απορροφώνται οι ανακλώμενοι κυματισμοί από το εσωτερικό του υπολογιστικού πεδίου.

Με δεδομένο ένα ενεργειακό φάσμα στην είσοδο του λιμενικού έργου η χρονοσειρά ζ^* υπολογίζεται από την αποσύνθεσή του:

$$\zeta^* = \sum 2a_i c_i dt/dx \quad \text{με} \quad a_i = (2E(\omega_i)d\omega)^{1/2} \quad (6.27)$$

όπου c_i η ταχύτητα μετάδοσης, dt και dx το χρονικό και το χωρικό βήμα, $E(\omega_i)$ η ανηγμένη φασματική πυκνότητα ενέργειας (λόγος της φασματικής πυκνότητας ενέργειας προς την ποσότητα rg), a_i το πλάτος του κυματισμού και ω_i συχνότητα.

6.2 Υπομοντέλο εκτίμησης στερεομεταφοράς

Ο συνολικός (χρονικά μέσος) ρυθμός μεταφοράς φερτών υλικών στην ακτή q_t υπολογίζεται από:

$$q_t = \overline{q_b} + q_s \quad (6.28)$$

όπου, q_b είναι η μεταφορά φορτίου πυθμένα και q_s η μεταφορά φορτίου αιώρησης κάτω από θραυόμενα κύματα.

Το φορτίο πυθμένα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση των Dibajnia and Watanabe (1998). Η σχέση για μη περιοδικά κύματα είναι:

$$\frac{q_b}{w_s \cdot d_{50}} = 0.0038 \frac{u_c \cdot T_c (\Omega_c + \Omega_t') - u_t \cdot T_t (\Omega_t + \Omega_c')}{(T_c + T_t) \sqrt{sg \cdot d_{50}}} \quad (6.29)$$

όπου w_s είναι η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων, d_{50} είναι η μέση διάμετρος κόκκου και u_c και u_t είναι η ενεργώς ισοδύναμη τιμή του εύρους της ταχύτητας για τα θετικά και τα αρνητικά τμήματά της και T_c και T_t είναι οι αντίστοιχες διάρκειες. Οι τιμές προσδιορίζονται από:



$$u_c^2 = \frac{2}{T_c} \int_{t_0}^{t_0+T_c} u^2 dt \quad u_t^2 = \frac{2}{T_t} \int_{t_0+T_c}^{t_0+T_c+T_t} u^2 dt \quad (6.30) \text{ \& } (6.31)$$

όπου u είναι η ταχύτητα του πυθμένα.

Οι τιμές του Ω_i δίνονται από:

$$\text{αν } \omega_i \leq \omega_{cr} \text{ τότε, } \Omega_i = \omega_i T_i \sqrt{\frac{sg}{d_{50}}}, \quad \Omega_i' = 0 \quad (6.32)$$

$$\text{αν } \omega_i > \omega_{cr} \text{ τότε, } \Omega_i = [\omega_{cr} + (1 - \gamma_i)(\omega_i - \omega_{cr})] T_i \sqrt{\frac{sg}{d_{50}}},$$

$$\Omega_i' = \gamma_i (\omega_i - \omega_{cr}) T_i \sqrt{\frac{sg}{d_{50}}} \quad (6.33)$$

με την προϋπόθεση για το Ω_i ότι,

$$\text{αν } \theta_i < \theta_{sheet} \text{ τότε, } \Omega_i = \left(\frac{\theta_i - \theta_{cr}}{\theta_{sheet} - \theta_{cr}} \right)^3 \Omega_i \quad (6.34)$$

όπου το θ_i είναι ο αριθμός Shields και

$$\omega_i = \left(\frac{1}{2} \frac{u_i^2}{sgd_{50}} - 5 \right) \frac{d_{50}}{w_s T_i}, \quad \gamma_i = \beta_i^* \beta_i' \quad (6.35)$$

όπου,

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_c' = 1 \\ \beta_c' = 4 \frac{u_t}{u_c} \end{array} \right. \quad \text{αν } \frac{u_t}{u_c} \geq \frac{1}{4} \quad (6.36) \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta_t' = 1 \\ \beta_t' = 4 \frac{u_c}{u_t} \end{array} \right. \quad \text{αν } \frac{u_c}{u_t} \geq \frac{1}{4} \quad (6.37)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_c' = 1 \\ \beta_c' = 4 \frac{u_t}{u_c} \end{array} \right. \quad \text{αν } \frac{u_t}{u_c} < \frac{1}{4}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_t' = 1 \\ \beta_t' = 4 \frac{u_c}{u_t} \end{array} \right. \quad \text{αν } \frac{u_c}{u_t} < \frac{1}{4}$$

και

$$\beta_i^* = 1 \quad \text{αν } \frac{T_{pi}}{T_i} \geq \frac{1}{2}, \quad (6.38)$$



$$\beta_i^* = \frac{6T_{pi}}{T_i} - 2 \quad \text{αν} \quad \frac{1}{3} < \frac{T_{pi}}{T_i} < \frac{1}{2}, \quad (6.39)$$

$$\beta_i^* = 0 \quad \text{αν} \quad \frac{T_{pi}}{T_i} \leq \frac{1}{3} \quad (6.40)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, το θ_{sheet} είναι ο κρίσιμος αριθμός Shields για την έναρξη στρωματοποιημένης ροής, $\theta_{sheet} = 0.8$, θ_{cr} είναι ο κρίσιμος αριθμός Shields για την έναρξη της κίνησης, $\theta_{cr} = 0.05$ και $\omega_{cr} = 1.2$ για στρωματοποιημένη ροή. Ο δείκτης i αντικαθιστάται από το c ή το t , που αναφέρονται στην κορυφή (crest) και την κοιλιά (trough) αντίστοιχα.

Το φορτίο εν αιώρηση q_s προκαλούμενο από τη θραύση κυμάτων λαμβάνεται από τη σχέση:

$$q_s = \frac{1}{a} \frac{0.2 \varepsilon_s \overline{DU}_b}{w_s} \quad (6.41)$$

όπου D είναι η απώλεια ενέργειας λόγω της θραύσης των κυμάτων, ε_s είναι ο συντελεστής απόδοσης της μεταφοράς φερτών εν αιώρηση και λαμβάνεται ίσος με 0.01 και $a = (1 - \lambda) s \rho g$ όπου, λ είναι το πορώδες του υλικού.

Η αδιάστατη στερεοπαροχή Q στη ζώνη αναρρίχησης υπολογίζεται από τον τροποποιημένο τύπο Meyer-Peter και Müller:

$$Q = \frac{q_b (1 - \lambda)}{\sqrt{(s - 1) g d_{50}^3}} = \frac{C}{1 + \frac{\tan \beta}{\tan \phi}} \theta^{3/2} \frac{U}{|U|} \quad (6.41)$$

όπου C είναι ένα πολλαπλασιαστής, ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής, και $\tan \beta$ είναι η κλίση του πυθμένα.

Ο πολλαπλασιαστής C θα πρέπει να έχει διαφορετική τιμή κατά την αναρρίχηση του κυματισμού στην ακτή από ότι κατά την κάθοδό του (Nielsen, 2002). Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αναρρίχηση



τα φερτά αιωρούνται ήδη από την τύρβη που προκλήθηκε από την έντονη θραύση του κύματος πάνω στην ακτή, με συνέπεια την αυξημένη στερεοπαροχή. Οι παρακάτω τιμές προτείνονται από τον Nielsen (2002): $C_{\text{αναρρίχησης}}=20$ and $C_{\text{καθόδου}}=9$.

6.3 Υπομοντέλο μεταβολής μορφολογίας πυθμένα.

Το εκτιμώμενο φορτίο q_t αποτελεί το δεδομένο εισαγωγής του μοντέλου της μορφολογίας για την εκτίμηση της βαθυμετρίας. Ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία: Το μορφολογικό μοντέλο εφαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έπειτα εφαρμόζεται πάλι το μοντέλο Boussinesq με τη νέα μορφολογία, ώστε να εξαχθεί η νέα στερεομεταφορά. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως τον τελικό χρόνο.

Οι αλλαγές στην διατομή του προφίλ της ακτής υπολογίζονται από την αριθμητική επίλυση της αρχής διατήρησης της μάζας των φερτών:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_t - \varepsilon_m |q_t| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) \quad (6.42)$$

όπου z_b , είναι η μεταβολή της στάθμης του πυθμένα και η τιμή του συντελεστή ε_m , είναι ίση με 2.0. Ο όρος της διάχυσης είναι ένας συμπληρωματικός όρος που αντικατοπτρίζει την επίδραση της τοπικής κλίσης πυθμένα στην μεταφορά υλικών (Horikawa, 1988). Η μεταφορά υλικού επηρεάζεται από την κλίση πυθμένα λόγω της επίδρασης του βάρους. Η θετική κλίση μειώνει την αντίδραση στην κίνηση και η αρνητική κλίση την αυξάνει. Η μεταφορά αυτή, είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός που δεν επιτρέπει τη συνεχιζόμενη αύξηση της κλίσης του πυθμένα και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα στο προφίλ να τείνει σε δυναμική ισορροπία.



6.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Το αριθμητικό μοντέλο επιβεβαιώθηκε σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα (Karambas and Koutitas, 2002). Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε το μοντέλο στη βελτιωμένη του μορφή, όπως περιγράφηκε παραπάνω, δίνοντας σε όλες τις περιπτώσεις σχετικά καλύτερα αποτελέσματα.

Ένα από τα πειράματα που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που εφαρμόστηκε στην πειραματική διάταξη για μεγάλα κύματα στο Ανόβερο (Dette H. H., Peters K. and Newe J. - 1998). Ο σκοπός των δοκιμών ήταν η συνεισφορά στην έρευνα για την προστασία των ακτών με τη μέθοδο της τεχνητής ανάπλασης (beach nourishment) και η ρύθμιση και πιστοποίηση των μοντέλων. Κάτω από τη στάθμη του νερού διαμορφώθηκε ως αρχικό προφίλ το θεωρητικό προφίλ ισορροπίας του Bruhn με τη βοήθεια της εξίσωσης $d = A \cdot y^r$, όπου, το y είναι η απόσταση προς τα ανοιχτά από την ακτογραμμή, d είναι το βάθος του νερού στην απόσταση y και A είναι ο συντελεστής για την κλίση της ακτής. Ο συντελεστής A λήφθηκε ίσος με 0.12 και ο r ίσος με 2/3. Η κλίση της παραλίας πάνω από τη στάθμη του νερού, στη ζώνη αναρρίχησης, ορίστηκε ως μεταβλητή. Το φάσμα TMA επιλέχθηκε ως φάσμα εισόδου για όλες τις σειρές δοκιμών. Το ύψος κύματος λήφθηκε $H_{mo} = 1.20m$ και η περίοδος $T_m = 5sec$. Το υλικό της ακτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν καλά διαβαθμισμένο με μέση διάμετρο κόκκου $d_{50} = 0.3mm$. Το προφίλ που υιοθετήθηκε είναι παρόμοιο με εκείνα των ελληνικών θαλασσών (Pyököri and Lehtovaara, 1993). Άλλωστε η μέση διάμετρος των κόκκων αλλά και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που διαμορφώνουν αυτό το προφίλ είναι τυπικά του Αιγαίου.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 6.2), γίνεται μια σύγκριση μεταξύ προφίλ που έχουν υπολογιστεί και προφίλ που έχουν εξαχθεί από μετρήσεις πεδίου, για το τεστ A9 (με κλίση 1:20 ξηρής ακτής). Η διάβρωση στη ζώνη αναρρίχησης και η δημιουργία αναβαθμού προβλέπονται σε πολύ καλό βαθμό.



Το παραπάνω τελικό, εργαστηριακό προφίλ ισορροπίας είναι το αρχικό προφίλ για τα επόμενα τεστ. Το προφίλ αυτό εκτίθεται στις ίδιες συνθήκες κυματισμών, υποθέτοντας μια ανύψωση της στάθμης της θάλασσας κατά 25 εκατ. Το πείραμα διαρκεί ωσότου το προφίλ φτάσει σε ισορροπία στη ζώνη αναρρίχησης. Στο αμέσως επόμενο σχήμα (σχήμα 6.3), φαίνεται το νέο προφίλ του πυθμένα μαζί με αυτό, πριν την αύξηση της στάθμης. Λόγω της μετακίνησης της γραμμής θραύσης στην ακτή, ο αναβαθμός στον πυθμένα τείνει να μετακινηθεί προς τα ανοιχτά. Άρα έτσι δημιουργείται ένας νέος αναβαθμός, προς τα ανοιχτά σε σχέση με τον προϋπάρχοντα. Η διαμόρφωση της ακτογραμμής γίνεται με την διάβρωση μεγάλων ποσοτήτων υλικού από την ακτή που μεταφέρονται προς τα ανοιχτά. Η εκτιμώμενη υποχώρηση της ακτογραμμής είναι $s=7.5$ m. Η αντίστοιχη αποχώρηση που εξάγεται από τον κανόνα του Brunh είναι $s=6.6$ m . Αυτή η υποχώρηση έχει υπολογιστεί από την εξίσωση του προηγούμενου κεφαλαίου:

$$s = \frac{l \cdot a}{h} \quad (6.43)$$

χρησιμοποιώντας $H_{s0.137} = 1.2$ m, το βάθος h , είναι ίσο με: $h=d+e$ (όπου d είναι το βάθος επίδρασης των κυματισμών και e το ύψος μετώπου της ακτής (berm height).

Το βάθος επίδρασης των κυματισμών d λαμβάνεται (CUR, 1987):

$$h = 1.75 \cdot H_{s0.137} = 2.1\text{m} \quad (6.44)$$

Το ύψος μετώπου e θεωρείται ίσο με το ύψος αναρρίχησης R :

$$R/H_b = \xi_b \quad (6.45)$$



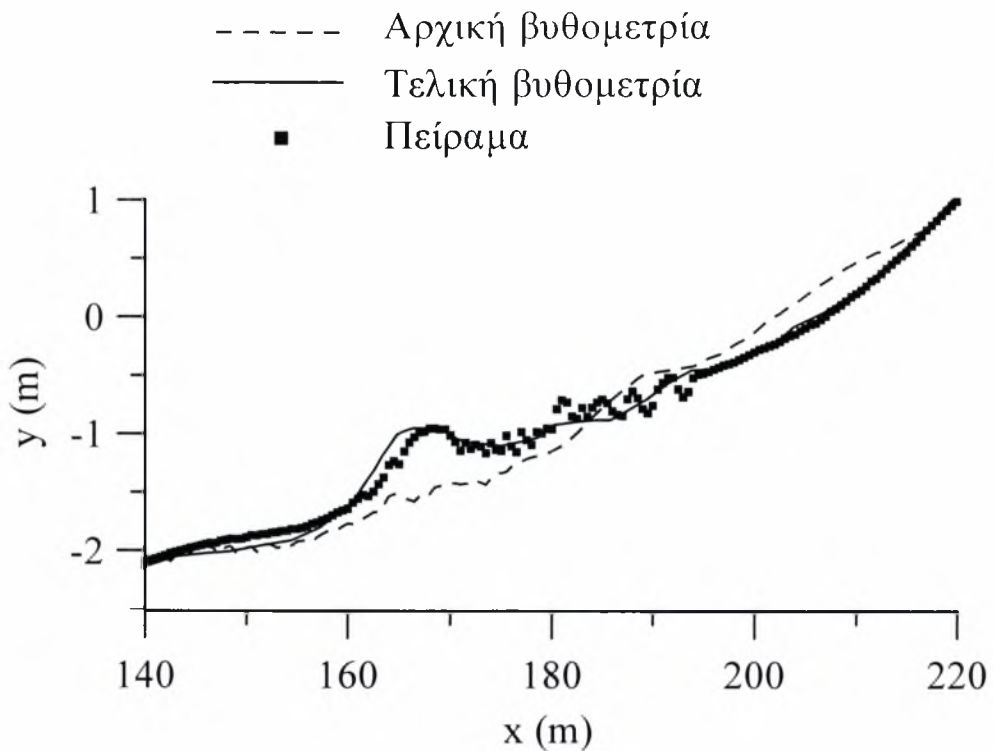
όπου:

H_b = ύψος θραύσης

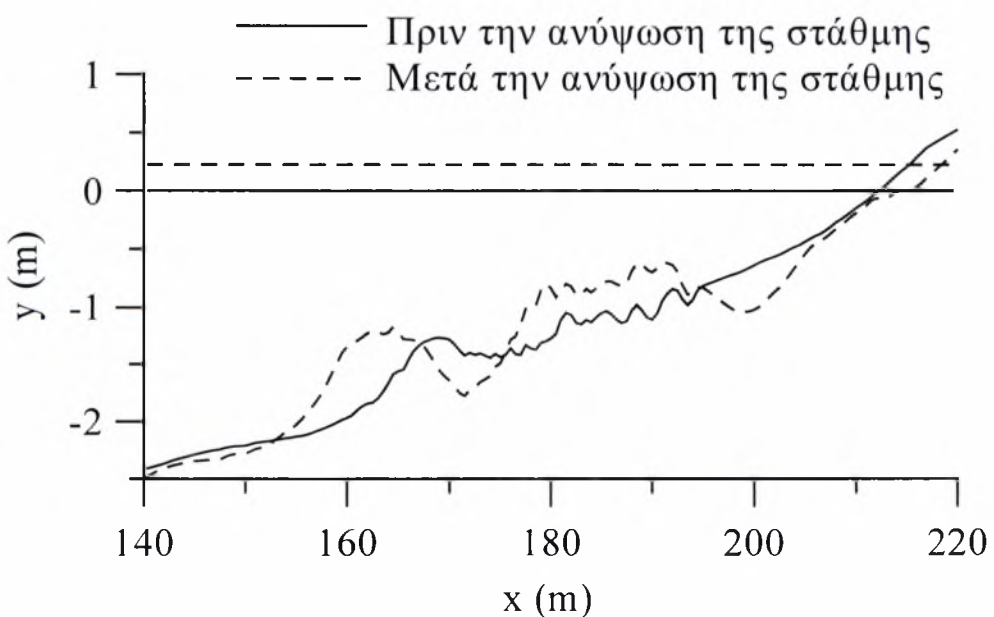
$\xi_b = \tan\beta / (H_o / L_o)$ (H_o είναι το ύψος κύματος, L_o είναι το μήκος στα βαθιά νερά και $\tan\beta$ είναι η κλίση του πυθμένα)

Το ύψος θραύσης H_b υπολογίστηκε από το μοντέλο Boussinesq.

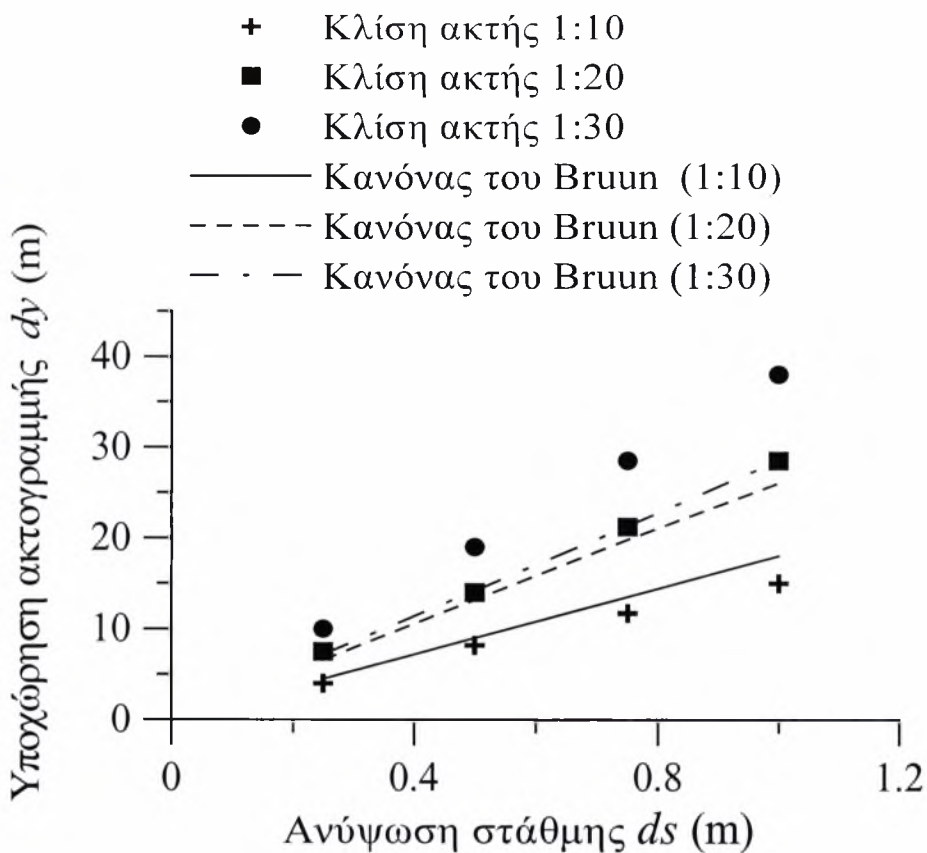
Το πειραματικό ισορροπημένο προφίλ από το τεστ εκτέθηκε επίσης στις παραπάνω συνθήκες κυματισμών λαμβάνοντας υπόψη μια αύξηση της στάθμης κατά $ds = 0.5m, 0.75m$ και $1.0m$, που αντιστοιχεί σε μια μικρή, μεσαία και μεγάλη ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Στις αριθμητικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο άλλες κλίσεις πυθμένα της ακτής, 1:10 και 1:30. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 5.8), τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του κανόνα του Brunh. Όπως ήταν αναμενόμενο για πιο απότομες κλίσεις η υποχώρηση της ακτογραμμής είναι μικρότερη από ότι αυτή για ηπιότερες κλίσεις. Ο κανόνας του Brunh δίνει παρόμοια αποτελέσματα με το μοντέλο μόνο στην περίπτωση όπου η κλίση πυθμένα είναι 1:10 και 1:20, ενώ αδυνατεί να προβλέψει ικανοποιητικά την υποχώρηση για κλίση 1:30. Ο κύριος περιορισμός του κανόνα του Brunh, είναι ότι, για την εξαγωγή της σχέσης δεν έχει ληφθεί υπόψη ούτε η κλίση της ακτής στη ζώνη αναρρίχησης, ούτε η κλίση του πυθμένα προς τα ανοιχτά. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στις ήπιες κλίσεις όπου ο κανόνας υποεκτιμά σημαντικά την υποχώρηση. Επίσης το προφίλ ισορροπίας κοντά στην ακτή, που αντιπροσωπεύεται από τη σχέση $d = A \cdot y^r$, μεταβάλλεται μονότονα και δεν μπορεί να συμπεριλάβει σημαντικά χαρακτηριστικά των ακτών όπως αναβαθμούς, που είναι και πολύ συνηθισμένοι στις ελληνικές ακτές. Το τελευταίο όμως δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα για την υποχώρηση της ακτογραμμής.



Σχήμα 6.1: Προφίλ που έχουν υπολογιστεί και προφίλ που έχουν μετρηθεί στο πείραμα A9.



Σχήμα 6.2: Υποχώρηση Ακτογραμμής για το τεστ A9, λόγω της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας.



Σχήμα 6.3: Υπολογισμένες υποχωρήσεις της ακτογραμμής για διάφορες κλίσεις της ζώνης αναρρίχησης, με τον κανόνα του Bruun και το παρόν μοντέλο.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας θα προκαλέσει αναμφισβήτητα πολλά προβλήματα, τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστούν κατάλληλα. Τα προβλήματα αυτά, με την πάροδο του χρόνου, θα πολλαπλασιαστούν με ρυθμούς γεωμετρικής προόδου. Όπως αναφέρθηκε, ακόμη και αν αυτή τη στιγμή σταματήσουν οι εκπομπές βλαβερών αερίων στην ατμόσφαιρα, το φαινόμενο δεν θα εξαφανιστεί αλλά αντιθέτως θα συνεχίσει να συμβαίνει.

Το ζητούμενο αυτή τη στιγμή είναι να προσδιοριστεί που και πότε αναμένεται μια υποχώρηση της ακτογραμμής ούτως ώστε να αρχίσει η έρευνα για τρόπους προστασίας της.

Επίσης θα πρέπει να περιοριστεί όσο το δυνατόν το φαινόμενο της σχετικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας, που οφείλεται κυρίως στην υπεράντληση υπόγειων υδάτων. Το φαινόμενο αυτό αφορά πολλά κράτη σήμερα και σίγουρα θα αφορά πολύ περισσότερα στο μέλλον, αν λάβει κανείς υπόψη του τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση νερού και την αναζήτηση νέων υδατικών αποθεμάτων πέραν των επιφανειακών που έχουν αρχίσει να εξαντλούνται ή είναι πια ακατάλληλα.

Σίγουρα σημαντικό ρόλο για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ανύψωσης θα παίξουν έρευνες και εξαγωγή νόμων, εξισώσεων και μαθηματικών μοντέλων όπως αυτών του Brunn και των Karambas & Koutitas. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μοντέλα και τους παραπάνω κανόνες είναι δυνατό να γίνει έγκαιρη πρόγνωση των αποτελεσμάτων που θα έχει η ανύψωση της στάθμης σε μια ακτή ώστε να αντιμετωπιστούν κατάλληλα.

Ο κανόνας του Brunn, παρότι απλοποιημένος, δίνει παρόμοια αποτελέσματα με το μοντέλο για σχετικά απότομες κλίσεις στη ζώνη αναρρίχησης των κυματισμών. Στις ήπιες κλίσεις (π.χ. 1:30), ο κανόνας υποεκτιμά σημαντικά την υποχώρηση. Φαίνεται ότι αυτή είναι και η μοναδική αδυναμία του κανόνα, εφόσον η μη δυνατότητα να δεχθεί μη

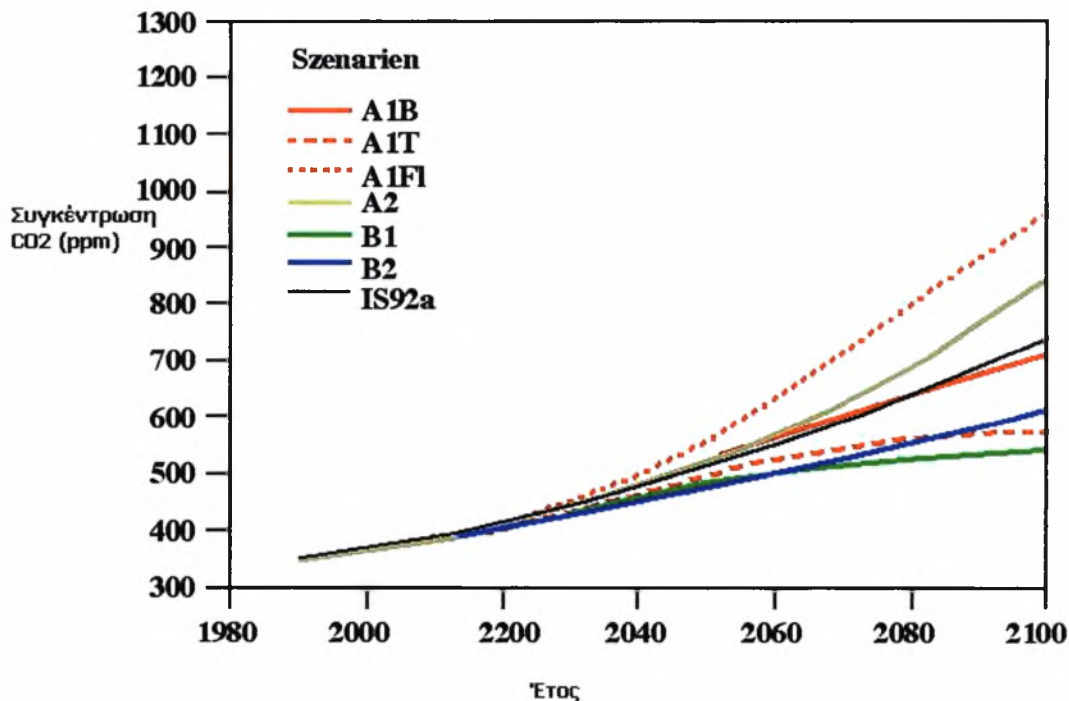


μονότονα προφίλ (δηλ. αναβαθμούς), δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα.

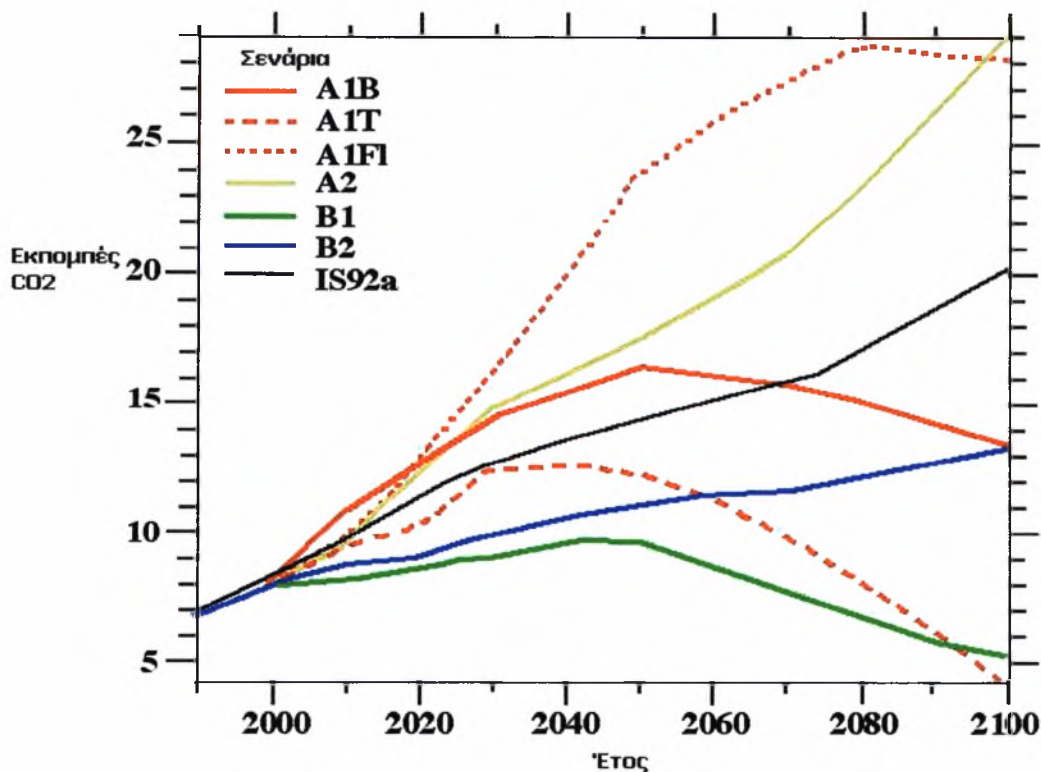


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

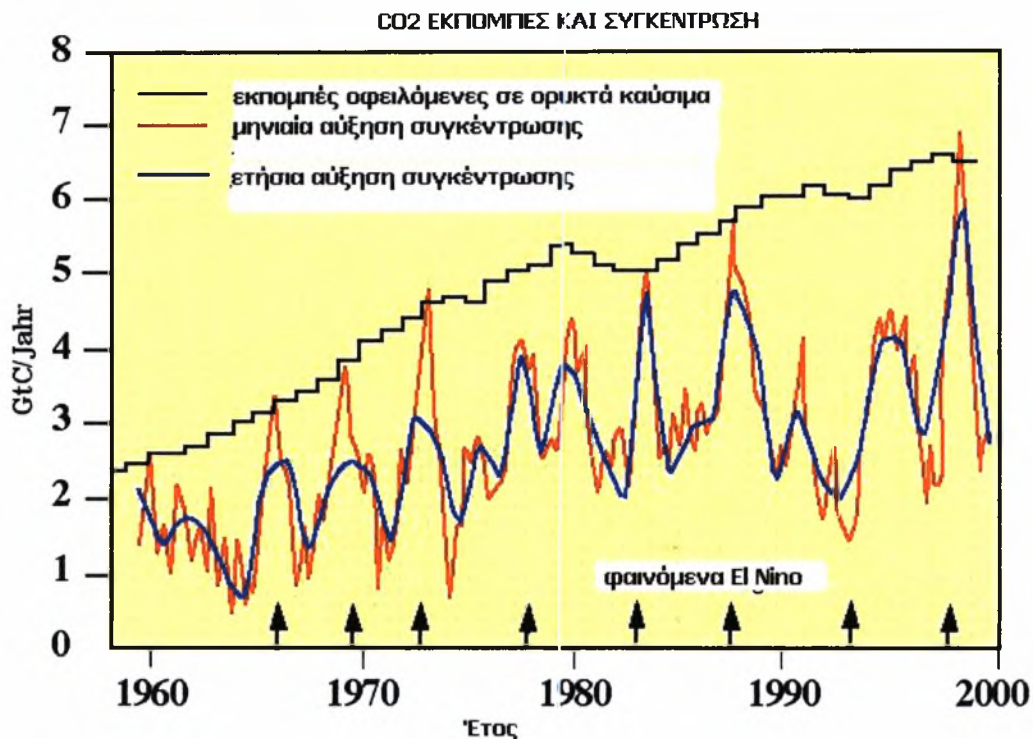
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO₂ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ 1990-2100



Π1.1: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα για τα διάφορα σενάρια της IPCC από το 1990 – 2100. Πηγή: IPCC



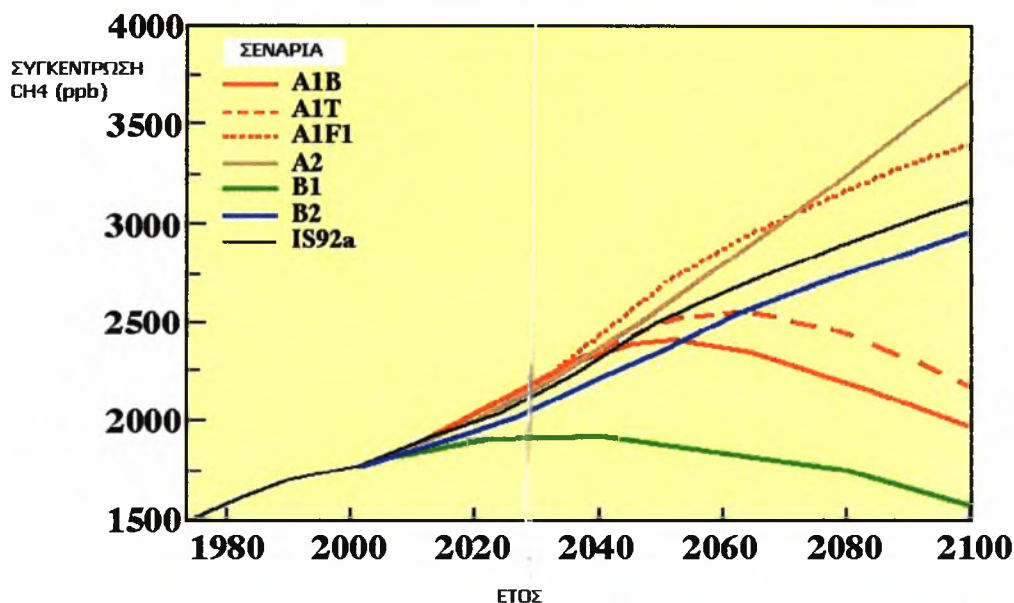
Π1.2: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα για τα διάφορα σενάρια της IPCC από το 1990 – 2100. Πηγή: IPCC



Π1.3: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή στην εκπομπή διοξειδίου και η μεταβολή στην συγκέντρωση του άνθρακα στην ατμόσφαιρα από το 1960 έως το 2000 σε συνάρτηση με τις εκπομπές οφειλόμενες σε ορυκτά καύσιμα. Επίσης σημειώνονται και τα διάφορα γεγονότα EL NINO όπου φαίνεται πως αυτά επηρέασαν ή επηρεάστηκαν.

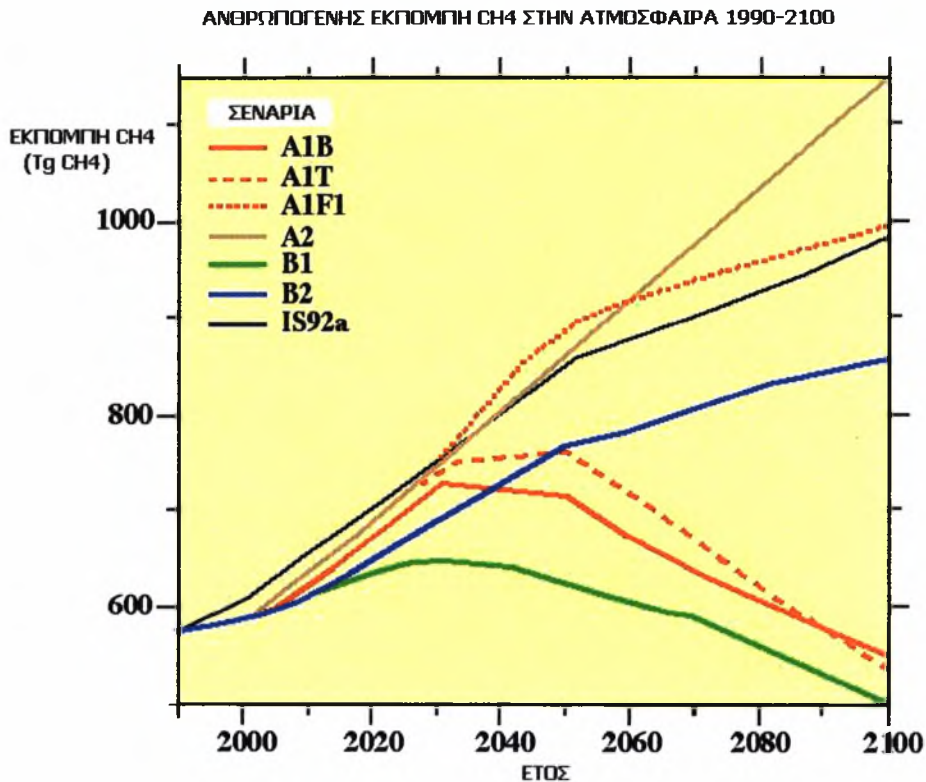
Πηγή: IPCC

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΜΕΘΑΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ 1980-2100



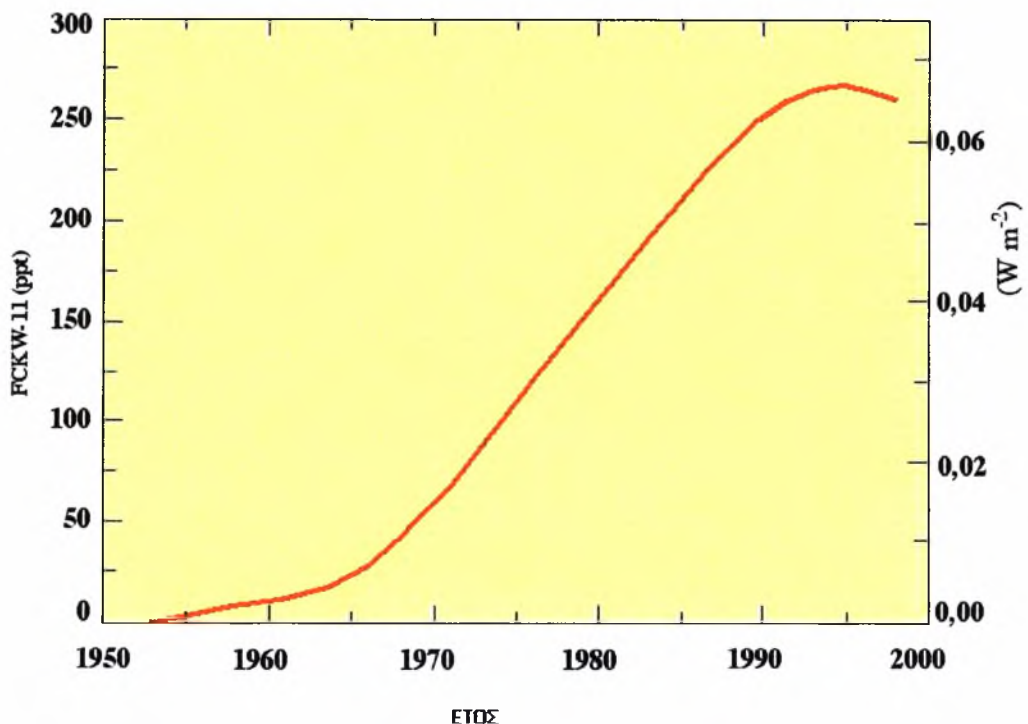
Π1.4: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή στην συγκέντρωση του μεθανίου στην ατμόσφαιρα για τα διάφορα σενάρια της IPCC από το 1980 – 2100.

Πηγή: IPCC



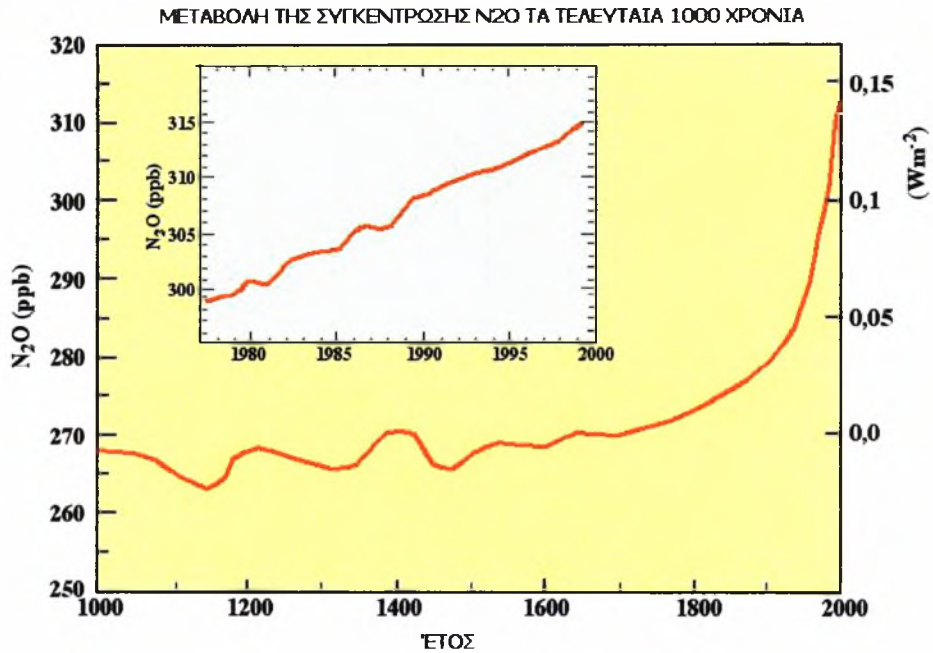
Π1.5: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή στην εκπομπή μεθανίου στην ατμόσφαιρα από ανθρωπογενής αίτια για τα διάφορα σενάρια της IPCC από το 1990 – 2100.

Πηγή: IPCC

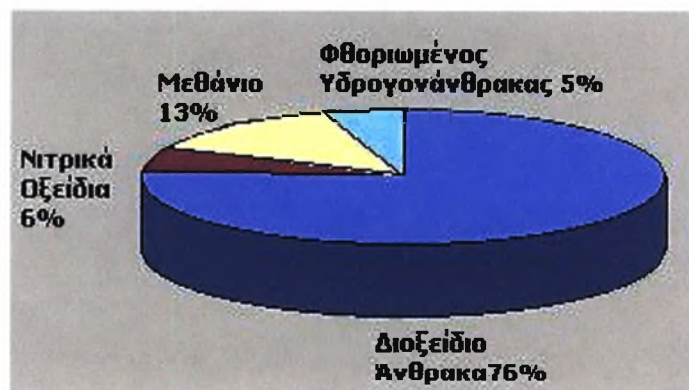


Π1.6: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή στην συγκέντρωση FCKW (χλωροφθοράνθρακα) στην ατμόσφαιρα από το 1950 – 2000.

Πηγή: IPCC

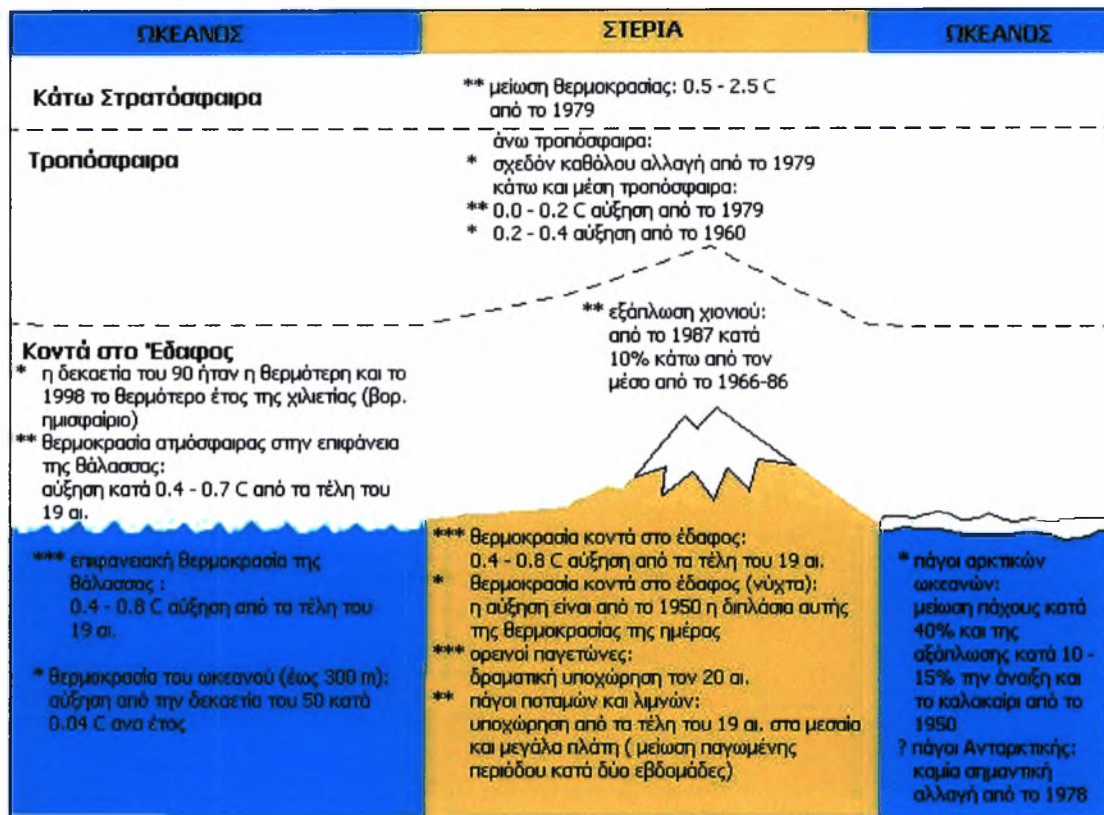


Π1.7: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή στην συγκέντρωση N₂O στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 1000 χρόνια και αναλυτικότερα τα τελευταία 20 χρόνια.
Πηγή: IPCC



Π1.8: Στο διάγραμμα φαίνεται η κατανομή των διάφορων αερίων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.
Πηγή: IPCC

ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

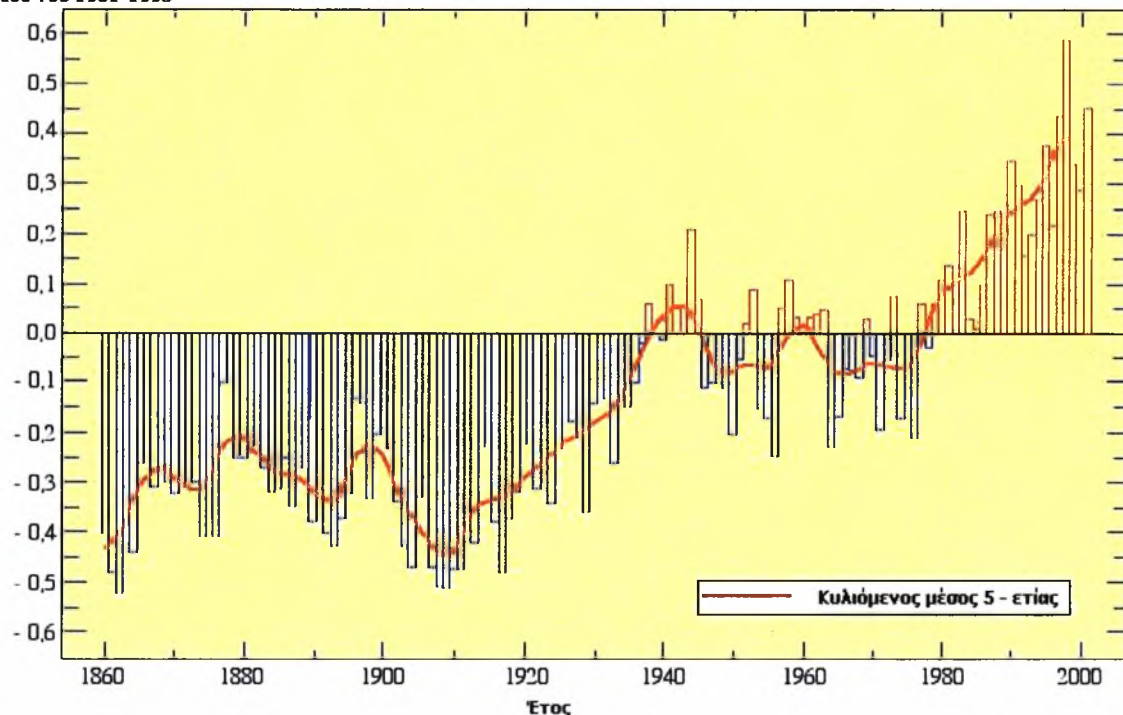


Πιθανότητα: *** σίγουρα (πιθανότητα >99%) * πιθανό (>66% έως <90%)
 ** πολύ πιθανό (>90% έως 99%) ? μέση πιθανότητα (33% έως 66%)

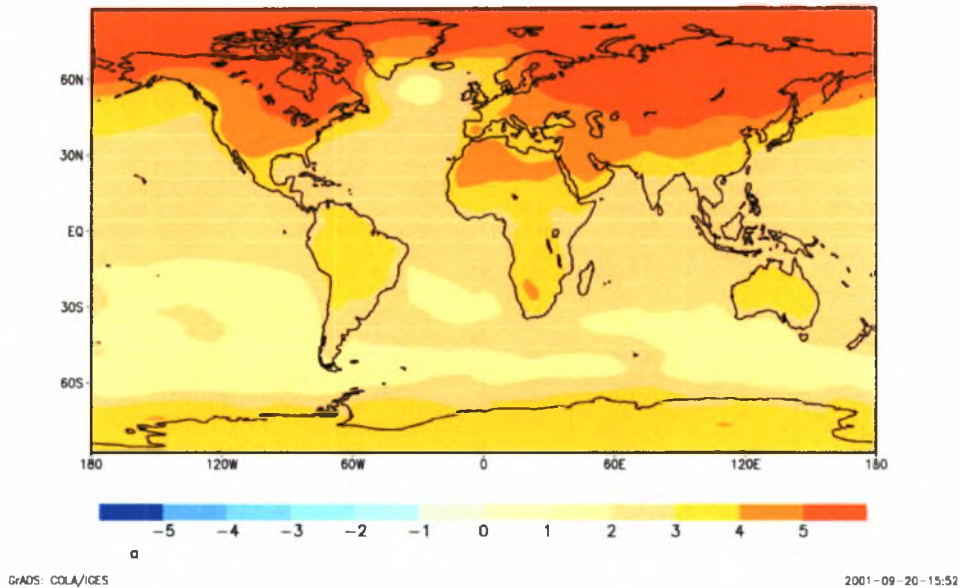
Π1.9: Στο διάγραμμα φαίνονται οι διάφορες αλλαγές σε δείκτες θερμοκρασίας.
 Πηγή: IPCC

Απόκλιση από τον μέσο του 1961-1990

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

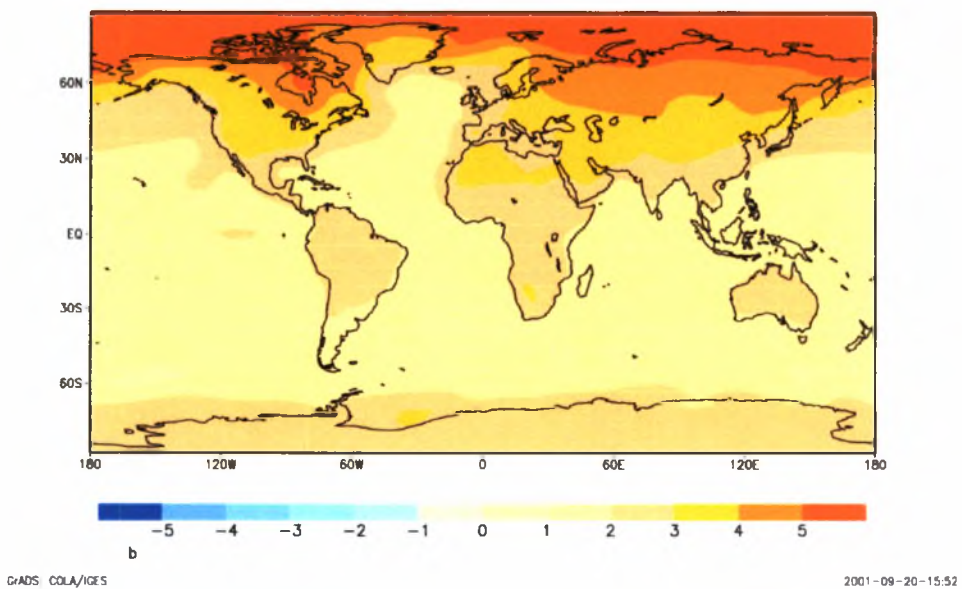


Π1.10: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας κοντά στο έδαφος, και η απόκλισή της από την μέση από το 1961-1990.
 Πηγή: IPCC



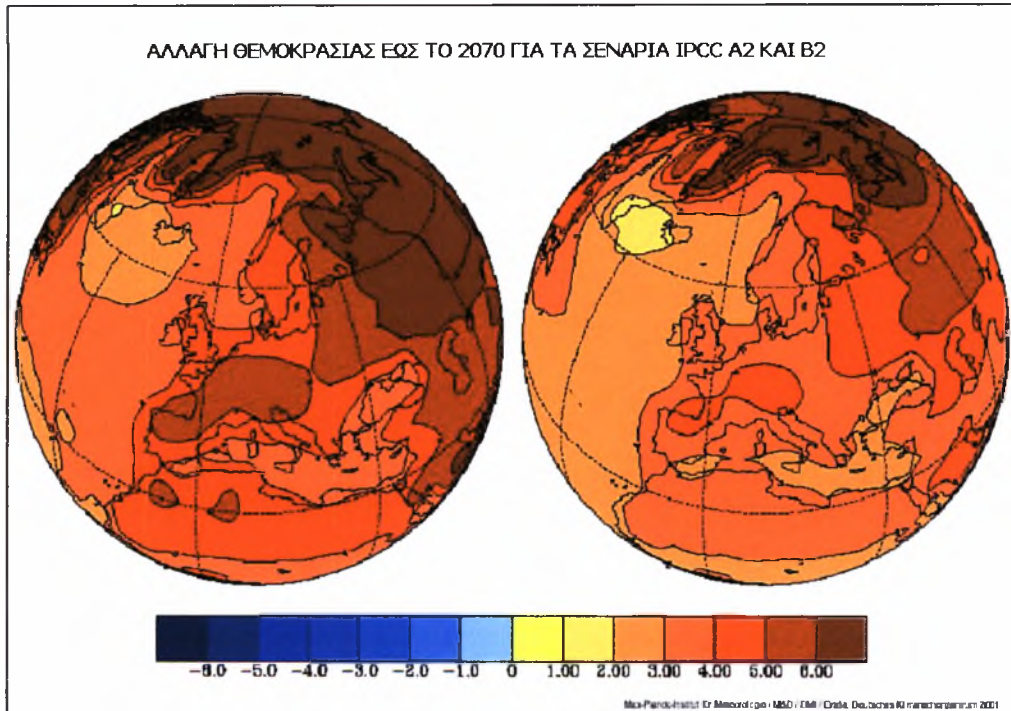
Π1.11: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας για το σενάριο A2 της IPCC έως το 2100.

Πηγή: IPCC



Π1.12: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας για το σενάριο B2 της IPCC έως το 2100.

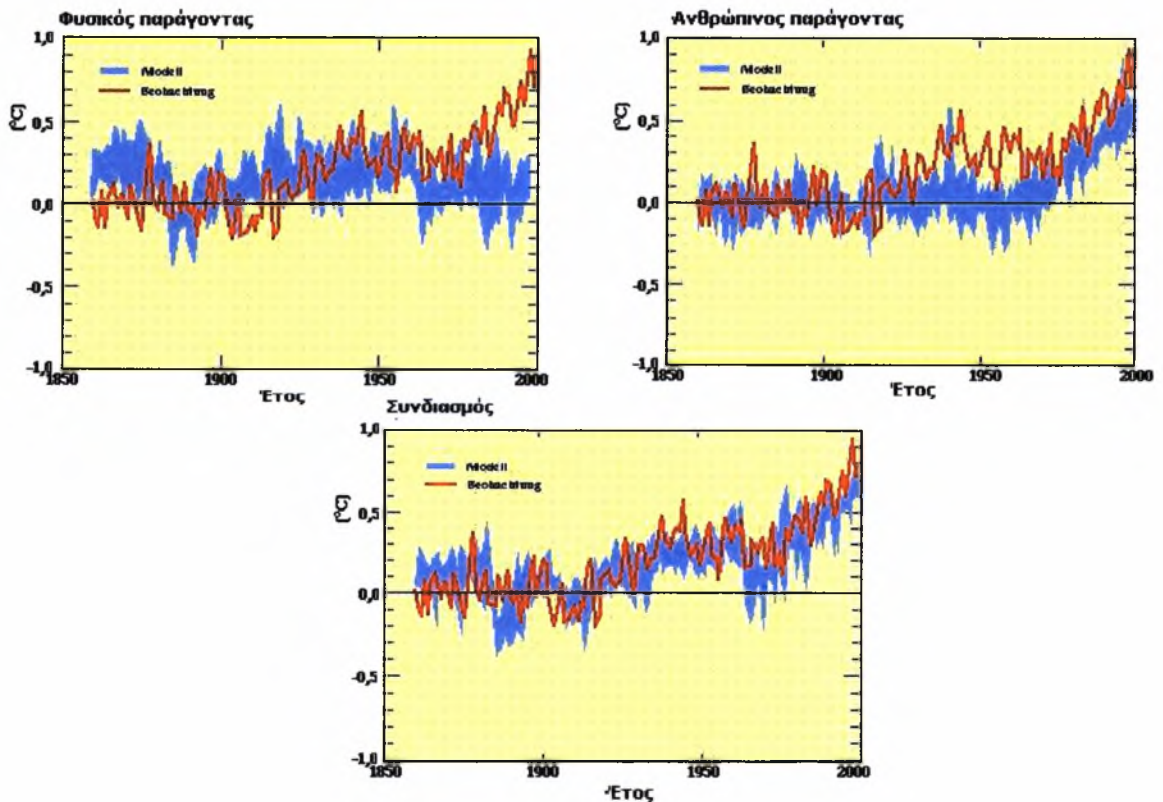
Πηγή: IPCC



Π1.13: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας για τα σενάρια A2 και B2 της IPCC το 2070.

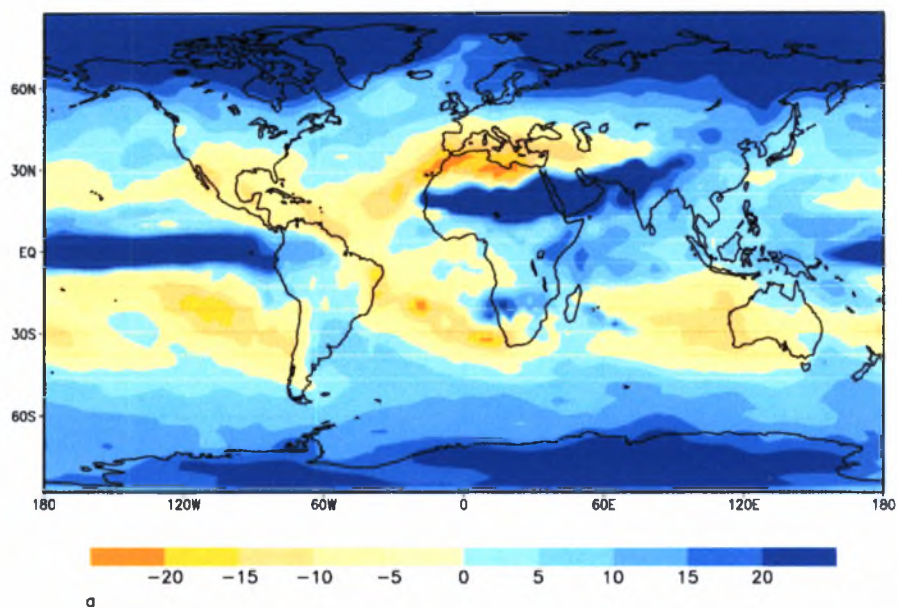
Πηγή: IPCC

Προσμοιωμένη μέση τιμή της θερμοκρασίας του Πλανήτη

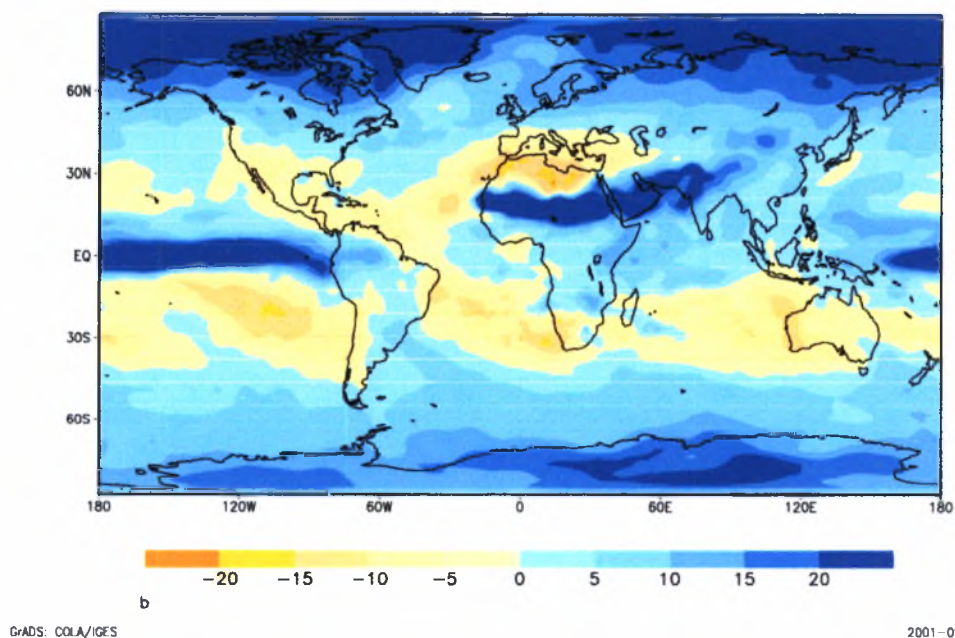


Π1.13: Στο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας οφειλόμενη στον φυσικό και στον ανθρώπινο παράγοντα, καθώς και ο συνδυασμός τους

Πηγή: IPCC



GrADS: COLA/IGES 2001-09-20-15:53
Π1.14: Στο διάγραμμα φαίνεται η χωρική και ποσοτική μεταβολή στους κατακρυσμους για το σενάριο A2 της IPCC έως το 2100.
Πηγή: IPCC



GrADS: COLA/IGES 2001-09-20-15:53
Π1.15: Στο διάγραμμα φαίνεται η χωρική και ποσοτική μεταβολή στους κατακρυσμους για το σενάριο B2 της IPCC έως το 2100.
Πηγή: IPCC



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ali, A. – *Climate Change Impacts and Adaption Assessment in Bangladesh*, Climate Research, 12, 109-116, 1999.
- Bindschalder, R. – *Future of Westantarctic Ice Sheet*, Science, 282, 428-429, 1998.
- Brunn, P. – Review of Conditions for Uses of the Brunn Rule of Erosion, Coastal Engineering, 7, 77-89, 1983.
- Brunn, P. – *Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion*. Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Waterways and Harbors Div., 88, 117-130, 1962.
- Brunn, P. – *The History and Philosophy of Coastal Protection*, 13th Conf. Coastal Engineering, Vancouver, 33-74, 1973.
- Church, J. A. and Gregory, J. M. – *Changes in Sea Level*, 2001.
- Conway, H., Hall, B. L., Denton, G. H. and Gades, A. M. – *Past and Future Grounding-Line Retreat of the West Antarctic Ice Sheet*, Science, 286, 280-283, 1999.
- CUR (1987) *Manual on artificial beach*, Delft Hydraulics.
- Dahl-Jensen, D. – *Enhanced: The Greenland Ice Sheet Reacts*, Science, 289, 404-405, 2000.
- Detle, H. H., Peters, K. and Newe, J. – *Large Wave Flume Experiment 96/97*, Mast III-SAFE Project, Report No. 825, 1998.
- Douglas H. Chadwick - *Εν Κίνδυνο*, Βήμα Terra, 25-29, Το Βήμα, 15 Αυγούστου 2002.
- Doukakis, Ef. – *The Greenhouse Effect on Greek Airports*, 6th Conf. Protection and Restoration of the Environment, Skiathos, 2002.
- El Raey, K., Dewidar, K. and El Hattab, M. – *Adaption to the Impacts of Sea Level Rise in Egypt*, Climate Research, 12, 117-128, 1999.
- Gregory, J. M. and Oerlemans, J. – *Simulated Future Sea Level Rise due to Glacier Melt Based on Regionally and Seasonally Resolved Temperature Changes*, Nature, 391, 29. Jan. 1998, 1998.



- Horikawa, K. (1988) '*Nearshore Dynamics and Coastal Processes*', University Tokyo Press, p.522.
- Huybrechts, P. and De Wolde, J. – *The Dynamic response of the Greenland and Antarctic Ice Sheets to Multiple-Century Climatic Warming*, Journal of Climate, 12, 2169-2188, 1999.
- Jackett, T.J., McDougall, M.H. England and A.C. Hirst – *Thermal Expansion in Ocean and Coupled General Circulation Models*, Journal of Climate, 13, 1384-1405, 2000.
- Jallow, B. P., Toure, S., Barrow, M. M. K. and Mathieu, A. A. – *Coastal Zone of the Gambia and Abidjan Region n Cote d' Ivoire: Sea Level Rise Vulnerability, Response Strategies and Adaptation Options*, Climate Research, 12, 129-136, 1999.
- Joyce, T. M., R. S. Pickart and R. C. Millard – *Long-term Hydrographic Changes at 52nd and 66th W in North Atlantic Subtropical Gyre & Caribbean*, Deep-Sea Research II 46, 245-278, 1999.
- Karambas Th. V. and Koutitas C. (2002). Surf and swash zone morphology evolution induced by non-linear waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* **128**, no 3, pp.102-113.
- Karambas, Th. and Koutitas, Ch. – *Surf and Swash Zone Morphology Evolution Induced by Nonlinear Waves*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2002.
- Karambas, Th., Koutantos, E. and Koutitas, Ch. – *Sea Level Rise Effects on Coastal Erosion*, 6th Conf. Protection and Restoration of the Environment, Skiathos, 2002.
- Krabill, W., Abdalati, W., Frederick, E., Manizada, S., Martin, C., Sonntag, J., Thomas, R., Wright, W., Yungel, J. – *Greenland Ice Sheet: High-Elevation Balance and Peripheral Thinning*, Science, 289, 428-430, 2000.
- Larsen J. and Dancy H., (1983). "Open boundaries in short wave simulations a new approach", *Coastal Engineering*, 7, 285-297.
- McLean, R. F. and Tsyban, A. - *Coastal Zones and Marines Ecosystems*, IPCC, 2001.



- Mimura, N. – *Vulnerability of Islands Countries in the South Pacific to Sea Level Rise and Climate Change*, *Climate Research*, 12, 137-143, 1999.
- Nicholls, J. R. and Mimura, N. – *Increasing Flood Risk and Wetland Losses due to Global Sea Level Rise: Regional and Global Analyses*, *Global Environmental Change*, 9, 69-87, 1999.
- Nicholls, J. R. and Mimura, N. – *Regional Issues Raised by Sea Level Rise and their Policy Implications*, *Climate Research*, 11, 5-18, 1998.
- Nicholls, J. R., Hoozemans, F. M. J. and Marchand, M. – *Increasing Risk and Wetland Loss Due to Global Sea Level Rise: Regional and Global Analyses*, *Global Environmental Change*, 9, 69-87, 1999.
- Nielsen, P. (1992). Coastal bottom boundary layers and sediment transport. World Sci. Singapore, 324 pp.
- Nielsen, P. (2002). Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modeling. *Coastal Engineering* 45, pp.53-60.
- Nurse, L. A. and Sem, G. – *Small Island States*, IPCC, 2001.
- Oppenheimer, M. – *Global Warming and the Stability of the West Antarctic Ice Sheet*, *Nature*, 393, 325-332, 1998.
- Pyoekaeri, M. and Lehtovaara, J. J. – *Beach Material and its Transport in Accordance with the Predominant and Prevailing Wave Directions on Shores in Northern Greece*, *Journal of Coastal Research*, 93, 609-627, 1993.
- Pyökäri M. and J.J. Lehtovaara (1993) 'Beach material and its transport in accordance with the predominant and prevailing wave directions on some shores in Northern Greece', *Journal of Coastal Research*, 9 (3), pp. 609-627.
- Sahagian, D. – *Global Physical Effects of Anthropogenic Hydrological Alterations: Sea Level and Water Redistribution*, *Global and Planetary Change*, 25, 39-48, 2000.
- Second Report on Emissions Scenarios, Intergovernmental Panel for Climatic Change – IPCC, 2001.
- Singh, B. – *Climate-Related Global Changes in Southern Caribbean: Trinidad and Tobago*, *Global and Planetary Change*, 15, 93-111, 1997.



- Special Report on Emissions Scenarios, Intergovernmental Panel for Climatic Change – IPCC, 1996.
- Titus, J. G. – *Greenhouse Effect and Coastal Wetland Policy: How Americans Could Abandon an Area the Size of Massachusetts at Minimum Coast*, Environmental Management, 15, 39-58,1991.
- Titus, J. G. – *Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Barrier Islands*, Coastal Management, 18, 65-90,1990.
- Titus, J. G. – *Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Coastal Management*, Coastal Management, 14, 146-171,1986.
- Titus, J. G. and Narayanan, V. K. – *The Probability of Sea Level Rise*, Washington, D. C., Environmental Protection Agency, 1995.
- Wei G. and Kirby J. T. (1995). "Time-Dependent Numerical Code for Extended Boussinesq Equations", *Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division ASCE*, WW5, 121, 251-261 (1995).
- Wong, A.P.S. et al. – *Large-scale Freshening of Intermediate Waters in the Pacific and Indian Oceans*, 400, 440-443, 1999.
- Zerefos, Ch. - *Πλανήτης Γη 2050 μ. Χ.*, Γεωτρόπιο, 53-61, Ελευθεροτυπία, 115, 22 Ιουνίου 2002.
- Zuo, Z. and J. Oerlemans – *Contribution of Glacier Melt to Sea Level Rise since AD 1865: A Regionally Differentiated Calculation*, Climate Dynamics, 13, 835-845, 1997.
- Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα*, Κουτίτας Γ. Χριστόφορος, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1998.
- Λιμενικά Έργα, Στοιχεία Σχεδιασμού Μελέτης Κατασκευαστικών Μεθόδων*, Κουτίτας Γ. Χριστόφορος, Υπηρεσία Δημοσιεύσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1987.
- Μηχανική των Ποταμών*, Τσόγκας Ερ. Χρήστος, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 1993.
- Πρακτικά 6^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου για την Προστασία και την Αποκατάσταση του Περιβάλλοντος*, 1-5 Ιουλίου, Σκιάθος, Ελλάδα, 2002.



