



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΒΟΛΩΝ**

Φραγκίσκα – Καρμέλα Γαδ

**ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ**

Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



# Περιεχόμενα

Σελίδα

<i>Περιεχόμενα</i> .....	1
<i>Ευρετήριο Σχημάτων</i> .....	5
<i>Ευρετήριο Πινάκων</i> .....	11
<i>Ορισμός Βασικών Συμβόλων</i> .....	13
<i>Περίληψη</i> .....	17
<i>Extended Abstract</i> .....	19
<i>Εισαγωγή</i> .....	27
<i>Κεφάλαιο 1. Παράκτια Ζώνη</i> .....	29
<i>1.1 Εισαγωγή</i> .....	29
<i>1.2 Παράκτια ρεύματα</i> .....	30
1.2.1 Ζώνη πριν τη θραύση.....	30
1.2.2 Ζώνη θραύσης - Ζώνη μετά τη θραύση.....	31
<i>1.3 Παράκτια ιζημάτα</i> .....	33
<i>1.4 Μεταφορά ιζημάτων στην παράκτια ζώνη</i> .....	35
1.4.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής (longshore sediment transport).....	37
1.4.1.1 Υπολογισμός Στερεοπαροχής κατά μήκος της ακτής.....	38
1.4.1.2 Κατανομή στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής.....	39
1.4.2 Εγκάρσια στερεομεταφορά (cross-shore sediment transport).....	42

1.4.2.1 Υπολογισμός Εγκάρσιας Στερεοπαροχής.....	44
<b>1.5 Παράκτιο κελί (coastal cell) – Ισοζύγιο μεταφοράς φερτών υλών.....</b>	<b>46</b>
<b>Κεφάλαιο 2. Έργα Προστασίας της Ακτής – Πρόβολοι.....</b>	<b>49</b>
<b>2.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>49</b>
<b>2.2 Πρόβολοι.....</b>	<b>50</b>
2.2.1 Λειτουργία προβόλων.....	52
2.2.2 Βασικές αρχές σχεδιασμού.....	54
<b>Κεφάλαιο 3. Σύστημα Προβόλων Μεταβλητού Μήκους.....</b>	<b>61</b>
<b>3.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2 Παράμετροι σχεδιασμού.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3 Πορεία υπολογισμών.....</b>	<b>64</b>
3.3.1 Υπολογισμός θραύσης.....	65
3.3.2 Υπολογισμός ρυθμού στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής.....	66
3.3.3 Υπολογισμός ρυθμού εγκάρσιας στερεομεταφοράς.....	67
3.3.4 Υπολογισμός κατανομής στερεομεταφοράς.....	68
<b>Κεφάλαιο 4. Υπολογιστικό Μοντέλο MIKE 21.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2 Κυματικό μοντέλο – MIKE21 Parabolic Mild Slope Module (PMS).....</b>	<b>74</b>
4.2.1 Παραβολική προσέγγιση.....	75

4.2.2 Βασική εξίσωση.....	75
4.2.3 Οριακές συνθήκες.....	78
4.2.4 Θραύση κυματισμών.....	79
4.2.5 Υπολογισμός κυματικών παραμέτρων.....	80
4.2.4 Εφαρμογή μοντέλου.....	81
<b>4.3 Υδροδυναμικό μοντέλο – MIKE21 Flow Model/Hydrodynamic Module (HD).....</b>	<b>82</b>
4.3.1 Βασικές εξισώσεις.....	82
4.3.2 Οριακές συνθήκες.....	84
4.3.3 Εφαρμογή μοντέλου.....	84
<b>4.4 Μοντέλο στερεομεταφοράς – MIKE21 Non - Cohesive Sediment Transport Module (ST).....</b>	<b>86</b>
4.4.1 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος.....	86
4.4.2 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες ρεύματος-κύματος.....	89
4.4.3 Εφαρμογή μοντέλου.....	90
<b>Κεφάλαιο 5. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....</b>	<b>93</b>
<b>5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης MIKE21.....</b>	<b>93</b>
5.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων.....	94
<b>5.2 Σύγκριση συμβατικής με βελτιωμένη διάταξη.....</b>	<b>97</b>
<b>5.3 Σύγκριση διατάξεων για διαφορετικά κυματικά σενάρια.....</b>	<b>101</b>
5.3.1 Γωνία πρόσπτωσης.....	101

5.3.2 Ύψος και περίοδος κυματισμών.....	103
<i>5.4 Σύγκριση διατάξεων με διαφορετικό μήκος πρώτου προβόλου.....</i>	<i>105</i>
<i>5.5 Σύγκριση διατάξεων σε διαφορετικές ακτές.....</i>	<i>107</i>
5.5.1 Κλίση πυθμένα ακτής.....	107
5.5.2 Ίζημα πυθμένα.....	109
<i>Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα.....</i>	<i>111</i>
<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>115</i>
<i>Παράρτημα Α. Διαγράμματα Αποτελεσμάτων MIKE21 .....</i>	<i>117</i>
<i>Παράρτημα Β. Γραφική Απεικόνιση Αποτελεσμάτων MIKE21 .....</i>	<i>127</i>
<i>Παράρτημα Γ. Υπολογισμό Εγκάρσιας Στερομεταφοράς.....</i>	<i>147</i>
<i>Παράρτημα Δ. Ταξινόμηση Ιζημάτων.....</i>	<i>149</i>

## Ευρετήριο Σχημάτων

---

Σελίδα

<b>Σχήμα 1.1:</b> Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής.....	29
<b>Σχήμα 1.2:</b> Παράκτια Ζώνη.....	30
<b>Σχήμα 1.3:</b> Εγκάρσιο προφίλ του κατά μήκος της ακτής ρεύματος.....	32
<b>Σχήμα 1.4:</b> Διαμόρφωση των παράκτιων ρευμάτων στη ζώνη θραύσης.....	33
<b>Σχήμα 1.5:</b> Δυνάμεις που επιδρούν στον κόκκο μη συνεκτικού υλικού.....	36
<b>Σχήμα 1.6:</b> Συνιστώσες στερεομεταφοράς: παράλληλη (qx) και κάθετη (qy) στην ακτή.....	36
<b>Σχήμα 1.7:</b> Κατανομές στερεοπαροχών: συνολική, πυθμένα, αιωρούμενων (πείραμα IQ)...	40
<b>Σχήμα 1.8:</b> Εγκάρσιο προφίλ ταχύτητας του κατά μήκος της ακτής ρεύματος για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης P.....	41
<b>Σχήμα 1.9:</b> Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ ακτής ανάλογα με την καμπυλότητα του κύματος.....	43
<b>Σχήμα 1.10:</b> Παράκτιο κελί (Coastal cell).....	46
<b>Σχήμα 2.1:</b> Τυπική μηκοτομή προβόλου με ενδιάμεσο κεκλιμένο τμήμα.....	56
<b>Σχήμα 2.2:</b> Σύστημα καμπύλων προβόλων.....	57
<b>Σχήμα 2.3:</b> Πιθανά σχήματα προβόλων.....	57
<b>Σχήμα 2.4:</b> Απόσταση μεταξύ διαδοχικών προβόλων.....	58
<b>Σχήμα 3.1:</b> Μέτρα έναντι της κατάντη διάβρωσης.....	61
<b>Σχήμα 3.2:</b> Μεταβατική περιοχή (transition section) μεταξύ συστήματος προβόλων και παρακείμενης παραλίας.....	62
<b>Σχήμα 3.3:</b> Εγκάρσια κατανομή κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς.....	68
<b>Σχήμα 3.4:</b> Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής.....	68

<b>Σχήμα 3.5:</b> Εγκάρσιο προφίλ ταχύτητας του κατά μήκος της ακτής ρεύματος στη ζώνη θραύσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης P .....	69
<b>Σχήμα 3.6:</b> Εγκάρσια κατανομή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης P .....	70
<b>Σχήμα 3.7:</b> Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος ακτής για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης P .....	70
<b>Σχήμα 3.8:</b> Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής (παραμέτρος ανάμειξης $P=0.10$ ).....	71
<b>Σχήμα 3.9:</b> Διάγραμμα διερχόμενου ποσοστού κατόντη του συστήματος τεσσάρων προβόλων μεταβλητού μήκους .....	72
<b>Σχήμα 5.1:</b> Διάγραμμα διερχόμενου ποσοστού κατόντη του συστήματος τεσσάρων προβόλων (μήκος πρώτου προβόλου $L_1=0.8x_b$ ) .....	94
<b>Σχήμα 5.2:</b> Αποτελέσματα αναλύσεων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων(λόγος απόστασης διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους $R=2.0$ ) .....	95
<b>Σχήμα 5.3:</b> Αποτελέσματα αναλύσεων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους $R=2.5$ ).....	96
<b>Σχήμα 5.4:</b> Αποτελέσματα αναλύσεων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους $R=3.0$ ).....	96
<b>Σχήμα 5.5:</b> Ύψος και διεύθυνση διάδοσης κυματισμού .....	97
<b>Σχήμα 5.6:</b> Παράκτιο ρεύμα κατά μήκος της ακτής .....	98
<b>Σχήμα 5.7:</b> Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής .....	99
<b>Σχήμα 5.8:</b> Ρυθμός μεταβολής πυθμένα.....	100
<b>Σχήμα 5.9:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - διεύθυνσης κυματισμών $\alpha_0$ (λόγος απόστασης προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους: $R=3$ ) .....	101



<b>Σχήμα 5.10:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - διεύθυνσης κυματισμών $\alpha_0$ (λόγος απόστασης προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους: $R=2.5$ ) .....	102
<b>Σχήμα 5.11:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - διεύθυνσης κυματισμών $\alpha_0$ (λόγος απόστασης προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους: $R=2$ ) .....	102
<b>Σχήμα 5.12:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - ύψους κυματισμού $H_{rms}$ (κυματικό σενάριο: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_0=45^\circ$ ) .....	103
<b>Σχήμα 5.13:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - ύψους κυματισμού $H_{rms}$ (κυματικό σενάριο: $H_{rms}=1.0$ m, $T_p=5.4$ s, $\alpha_0=45^\circ$ ) .....	104
<b>Σχήμα 5.14:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - ύψους κυματισμού $H_{rms}$ (κυματικό σενάριο: $H_{rms}=3.0$ m, $T_p=8.4$ s, $\alpha_0=45^\circ$ ) .....	104
<b>Σχήμα 5.15:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - μήκους πρώτου προβόλου $L_1$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.50x_b$ ) .....	105
<b>Σχήμα 5.16:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - μήκους πρώτου προβόλου $L_1$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.60x_b$ ) .....	106
<b>Σχήμα 5.17:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - μήκους πρώτου προβόλου $L_1$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.80x_b$ ) .....	106
<b>Σχήμα 5.18:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - κλίσης ακτής $m$ (κλίση ακτής: $m=3\%$ ) .....	107
<b>Σχήμα 5.19:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - κλίσης ακτής $m$ (κλίση ακτής: $m=5\%$ ) .....	108
<b>Σχήμα 5.20:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - κλίσης ακτής $m$ (κλίση ακτής: $m=10\%$ ) .....	108
<b>Σχήμα 5.21:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - μεγέθους κόκκων ιζήματος $D_{50}$ (μέση διάμετρος κόκκων: $D_{50}=0.25$ mm) .....	109
<b>Σχήμα 5.22:</b> Διαγράμματα ποσοστού $j$ - γωνίας $\phi$ - μεγέθους κόκκων ιζήματος $D_{50}$ (μέση διάμετρος κόκκων: $D_{50}=0.15$ mm) .....	110

<b>Σχήμα 6.1:</b> Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος ακτής για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης P .....	113
<b>Σχήμα A.1:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.5x_b$ ) .....	117
<b>Σχήμα A.2:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	118
<b>Σχήμα A.3:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.8x_b$ ) .....	118
<b>Σχήμα A.4:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=30^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	119
<b>Σχήμα A.5:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=60^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	119
<b>Σχήμα A.6:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.15\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.5x_b$ ) .....	120
<b>Σχήμα A.7:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.15\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	120
<b>Σχήμα A.8:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.15\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.8x_b$ ) .....	121
<b>Σχήμα A.9:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=1.0\text{ m}$ , $T_p=5.4\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	121
<b>Σχήμα A.10:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=1.0\text{ m}$ , $T_p=5.4\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.8x_b$ ) .....	122
<b>Σχήμα A.11:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=3.0\text{ m}$ , $T_p=8.4\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	122
<b>Σχήμα A.12:</b> Ακτή: κλίση $m=5\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{rms}=3.0\text{ m}$ , $T_p=8.4\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.8x_b$ ) .....	123

<b>Σχήμα A.13:</b> Ακτή: κλίση $m=3\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.5x_b$ ) .....	123
<b>Σχήμα A.14:</b> Ακτή: κλίση $m=3\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	124
<b>Σχήμα A.15:</b> Ακτή: κλίση $m=3\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.8x_b$ ) .....	124
<b>Σχήμα A.16:</b> Ακτή: κλίση $m=10\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.5x_b$ ) .....	125
<b>Σχήμα A.17:</b> Ακτή: κλίση $m=10\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.6x_b$ ) .....	125
<b>Σχήμα A.18:</b> Ακτή: κλίση $m=10\%$ - ίζημα $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ (μήκος πρώτου προβόλου: $L_1=0.8x_b$ ) .....	126
<b>Σχήμα B.1:</b> Ακτή χωρίς προβόλους/Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	127
<b>Σχήμα B.2:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	128
<b>Σχήμα B.3:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=9^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	129
<b>Σχήμα B.4:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=3^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	130
<b>Σχήμα B.5:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=12^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	131
<b>Σχήμα B.6:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.8x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	132
<b>Σχήμα B.7:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.5x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{\text{rms}}=2.0\text{ m}$ , $T_p=7.2\text{ s}$ , $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25\text{ mm}$ .....	133

<b>Σχήμα B.8:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=30^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	134
<b>Σχήμα B.9:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=60^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	135
<b>Σχήμα B.10:</b> Ακτή χωρίς προβόλους /Κυματισμός: $H_{rms}=3.0$ m, $T_p=8.4$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25$ mm.....	136
<b>Σχήμα B.11:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.8x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=3.0$ m, $T_p=8.4$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	137
<b>Σχήμα B.12:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.8x_b$ , $\phi=9^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=3.0$ m, $T_p=8.4$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=5\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	138
<b>Σχήμα B.13:</b> Ακτή χωρίς προβόλους /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=3\%$ , $D_{50}=0.25$ mm.....	139
<b>Σχήμα B.14:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=3\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	140
<b>Σχήμα B.15:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=3^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=3\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	141
<b>Σχήμα B.16:</b> Ακτή χωρίς προβόλους /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=10\%$ , $D_{50}=0.25$ mm.....	142
<b>Σχήμα B.17:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=10\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	143
<b>Σχήμα B.18:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.6x_b$ , $\phi=9^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=10\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	144
<b>Σχήμα B.19:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.8x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=10\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	145
<b>Σχήμα B.20:</b> Σύστημα προβόλων: $L_1=0.5x_b$ , $\phi=6^\circ$ , $R=2.5$ /Κυματισμός: $H_{rms}=2.0$ m, $T_p=7.2$ s, $\alpha_o=45^\circ$ / Ακτή: $m=10\%$ , $D_{50}=0.25$ mm .....	146

## Ευρετήριο Πινάκων

---

Σελίδα

<b>Πίνακας 1.1:</b> Ταξινόμηση εδαφών ακτών ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων .....	34
<b>Πίνακας 2.1:</b> Παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η απόκριση της ακτογραμμής .....	54
<b>Πίνακας 3.1:</b> Παράμετροι κυματικών σεναρίων .....	64
<b>Πίνακας 3.2:</b> Χαρακτηριστικά κυματισμών στη θραύση .....	66
<b>Πίνακας 3.3:</b> Κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά.....	66
<b>Πίνακας 3.4:</b> Εγκάρσια στερεομεταφορά .....	67
<b>Πίνακας 4.1:</b> Παράμετροι κυματικών σεναρίων .....	73
<b>Πίνακας 4.2:</b> Τιμές συντελεστών $\beta_1$ , $\beta_2$ και $\beta_3$ .....	78
<b>Πίνακας Γ.1:</b> Ρυθμός εγκάρσιας στερεομεταφοράς στο βάθος θραύσης ( $d_b$ ) .....	147
<b>Πίνακας Δ.1:</b> Ταξινόμηση ιζημάτων .....	149



## Ορισμός Βασικών Συμβόλων

---

- C: Ταχύτητα διάδοσης κυματισμών (m/s)
- $D_{50}$ : Μέση διάμετρος κόκκων ιζήματος ακτής (m)
- $H_{rms}$ : Μέση τετραγωνική τιμή του ύψους κύματος (m)
- $H_s$ : Σημαντικό ύψος κύματος (m)
- j: Ποσοστό κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς που περνά κατάντη του συστήματος των προβόλων
- L: Μήκος κύματος (m)
- $L_i$ : Μήκος  $i^{ου}$  προβόλου (m)
- m: Κλίση πυθμένα
- $Q_i$ : Ρυθμός κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς ( $m^3/gr$ )
- $q_c$ : Ρυθμός εγκάρσιας στερεομεταφοράς ( $m^3/gr/m$ )
- R: Λόγος απόστασης δύο διαδοχικών προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους
- $S_i$ : Απόσταση μεταξύ  $i^{ου}$  και  $(i^{ου}+1)$  προβόλου (m)
- $T_p$ : Περίοδος κορυφής φάσματος (s)
- V: Ταχύτητα κατά μήκος της ακτής ρεύματος (m/s)
- $x_b$ : Πλάτος ζώνης θραύσης (m)
- $\alpha$ : Γωνία διεύθυνσης κύματος ( $^{\circ}$ )
- $\phi$ : Γωνία μεταξύ ακτογραμμής και ευθείας που ενώνει τα άκρα των προβόλων ενός μη συμβατικού συστήματος ( $^{\circ}$ )





*Για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Μέμο για την καθοδήγησή του με καίριες επισημάνσεις καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.*

*Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους Μιχάλη Χονδρό, Γιώργο Κλωνάρη, Τάσο Μεταλληνό και Σοφία Καραπάνου, οι παρατηρήσεις και οι συμβουλές των οποίων αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμες.*



## Περίληψη

---

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της διάταξης ενός συστήματος προβόλων, ώστε να περιορίζεται η διάβρωση που προκαλείται στην παρακείμενη ακτή εξαιτίας της επίδρασης των κατασκευών αυτών στο ισοζύγιο των φερτών υλών στην παράκτια ζώνη. Μελετάται η επίδραση ενός συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους στη μορφολογία της ακτογραμμής, για διάφορα κυματικά σενάρια και ακτές με διαφορετική κλίση πυθμένα και διάμετρο κόκκων ιζήματος.

Αρχικά γίνεται μια περιγραφή της παράκτιας ζώνης και των διεργασιών που συμβαίνουν σε αυτή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μεταφορά των ιζημάτων στην παράκτια ζώνη και τον υπολογισμό των δύο συνιστωσών της –της παράλληλης και της εγκάρσιας προς την ακτή.

Επίσης, αναφέρονται συνοπτικά τα έργα προστασίας της ακτής από διάβρωση, ενώ περιγράφονται εκτενώς η λειτουργία και οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού ενός συστήματος προβόλων. Οι πρόβολοι λειτουργούν ως εμπόδια στην παράκτια στερεομεταφορά, συγκρατώντας σημαντικές ποσότητες ιζήματος ανάντη και προκαλώντας έτσι διάβρωση στα κατάντη. Η σταδιακή μείωση του μήκους των προβόλων προς τα κατάντη είναι ένα από τα μέτρα που προτείνονται για την ομαλή μετάβαση από το σύστημα των προβόλων στην παρακείμενη ακτή και τον περιορισμό της κατάντη διάβρωσης.

Για την μελέτη ενός μη συμβατικού συστήματος προβόλων και την εκτίμηση της ποσότητας του ιζήματος που περνά κατάντη αυτού γίνεται υπολογισμός της στερεομεταφοράς από τις αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας και χρησιμοποιούνται διαγράμματα κατανομής της παράλληλης προς την ακτή συνιστώσας της. Στη συνέχεια εφαρμόζονται τρία αριθμητικά μοντέλα -κυματικό (PMS), υδροδυναμικό (HD) και στερεομεταφοράς (ST)- του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου MIKE21 του Danish Hydraulic Institute (DHI) για σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των αναλυτικών σχέσεων. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα των αναλύσεων του MIKE21 παράγονται διαγράμματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση των διαφορετικών διατάξεων προβόλων καθώς και επιλογή της βέλτιστης διάταξης.

Από τα αποτελέσματα του MIKE21 προκύπτει ότι βέλτιστη διάταξη ενός συστήματος προβόλων είναι αυτή στην οποία το μήκος των προβόλων μειώνεται προς τα κατάντη κατά μήκος μιας ευθείας που ενώνει τις κεφαλές των προβόλων και σχηματίζει με την ακτή γωνία

$\varphi=6^\circ$  περίπου. Στα περισσότερα σενάρια που εξετάστηκαν για τη συγκεκριμένη τιμή της γωνίας  $\varphi$  το ποσοστό της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς που διαφεύγει κατάντη του συστήματος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή.

Τέλος, προτείνεται μια μεθοδολογία για το σχεδιασμό ενός συστήματος προβόλων με βελτιστοποιημένη διάταξη ώστε να μη διαταράσσεται η ισορροπία της παρακείμενης ακτής και να περιορίζεται στο ελάχιστο η κατάντη διάβρωση.

## **Extended Abstract**

---

### **Introduction**

Coasts are one of the most variable natural systems. Natural phenomena, such as waves, currents, change of sea level and climate, as well as human activities have long-term or short-term impacts on coastal morphology. In many cases coastal erosion generates social and economic costs. In order to prevent or minimize these costs it is necessary to take measures such as the construction of special structures for beach protection. Groynes, detached breakwaters, seawalls and beach nourishment are projects aiming beach protection against erosion.

The present study describes the function of a groyne field and its basic design rules. The aim of this research is the optimization of a groyne system so as to prevent its impacts on the adjacent beach and limit downdrift erosion.

Firstly, coastal zone and physical processes which take place in it (currents, sediment transport) are described. Different types of groyne system (different length and space between them) are designed and the regime of sediment transport is being investigated in detail. Moreover, the computational program MIKE21 of Danish Hydraulic Institute (DHI) is used for the simulation of wave propagation, current flow and sediment transport and comparison of the results is made with analytical equations, as well. The results from different scenarios are presented in figures which can be used for the selection of the most optimum system.

### **Coastal Zone**

The coastal zone is a complex system between land and sea, which is delineated as the part of the land affected by the sea, and the part of the sea affected by the land. The basic components of this system are its abiotic (hydrodynamic conditions, geomorphology, etc), biotic (flora and fauna) and anthropogenic (economic activities, etc) characteristics.

Coast is divided in inshore and foreshore zones, whose boundary is the mean low water (MLW) line. Moreover, the breaker and swash zone can be determined across a coast.

The breaker zone is the region where waves become unstable and lose their initial form. Wave breaking and resultant energy dissipation generate wave-induced long-shore and cross-shore currents. These currents are responsible for sediment transport in the nearshore zone.

## **Sediment transport**

Sediment transport is the movement of solid particles, which takes place, as bed and suspended load, in the nearshore zone due to the effect of waves and currents. Littoral transport is one of the most important processes that control beach morphology, and determines whether shores erode, accrete or remain stable.

### **(a) Longshore sediment transport**

Longshore current is generated by obliquely incident wave breaking and runs parallel to the coastline. A lot of relationships exist for the calculation of total (bed and suspended) longshore transport rate. One of them, which is proposed by Coastal Engineering Manual (2006) and is used widely is written:

$$Q_l = 1290 \cdot \frac{1}{16} \rho g H_{sb}^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b \quad (1)$$

Another equation is proposed by Kamphuis (1991)

$$Q_l = 6.40 \cdot 10^4 \cdot H_{sb}^2 \cdot T_p^{1.5} \cdot m_b^{0.75} \cdot D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\alpha_b \quad (2)$$

where  $H_{sb}$  is the significant wave height in the break point,  $C_{gb}$  the group velocity,  $\alpha_b$  the wave incidence angle at the break point,  $T_p$  the peak period of waves,  $m_b$  beach slope in the breaker zone and  $D_{50}$  median grain size.

From the above equations a mean value of total transport rate in surf zone is calculated in the present study. Moreover, the distribution of longshore transport across the surf zone is essential for the design of coastal structures and it can be arised from the longshore velocity (V) profile. Using the assumption that longshore velocity (USACE, 2006)

$$V = \frac{5\pi \tan \beta^*}{16 c_f} \gamma_b \sqrt{gd} \cdot \sin a \cdot \cos a \quad (3)$$

is proportional to  $d^{1/2}$  and transport rate ( $Q_l$ ) is proportional to  $H^2$  (therefore to  $d^2$ ) and  $V^4$ , the calculation of longshore transport distribution is becoming simple.

The longshore velocity profile depicted in Fig.1 and proposed by Longuet-Higgins (1970a,b) (Fig.1) is given by the equation

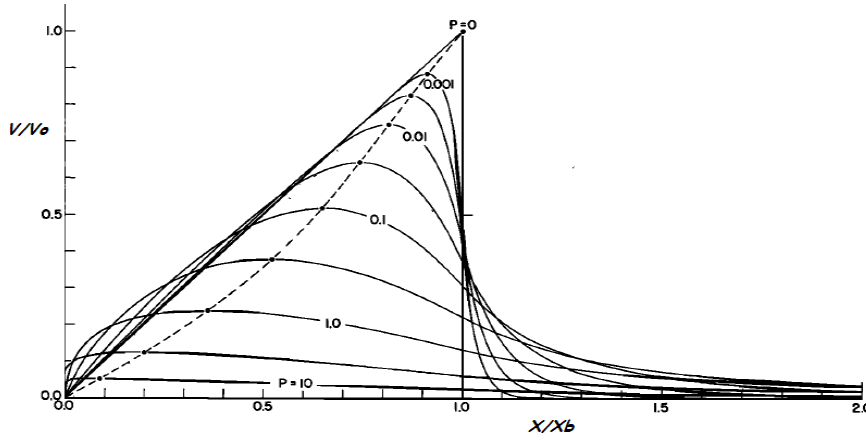
$$V/V_o = \begin{cases} B_1(X/X_b)^{p_1} + A(X/X_b), & 0 < X/X_b < 1 \\ B_2(X/X_b)^{p_2}, & 1 < X/X_b < \infty \end{cases} \quad (4)$$

where

$X_b$  is the width of surf zone,  $P = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{sN}{\alpha c}\right)$  a mixing parameter

$$B_1 = [P(1 - p_1)(p_1 - p_2)]^{-1}, B_2 = [P(1 - p_2)(p_1 - p_2)]^{-1}$$

$$p_1 = -\frac{3}{4} + \left(\frac{9}{16} + \frac{1}{P}\right)^{1/2}, p_2 = -\frac{3}{4} - \left(\frac{9}{16} + \frac{1}{P}\right)^{1/2} \text{ and } A = 1/(1 - \frac{5}{2}P) \quad (P \neq 2/5).$$



**Figure 1:** The form of current profiles for a sequence of values of the mixing parameter( $P$ )  
Longuet-Higgins (1970b)

**(b) Cross-shore sediment transport**

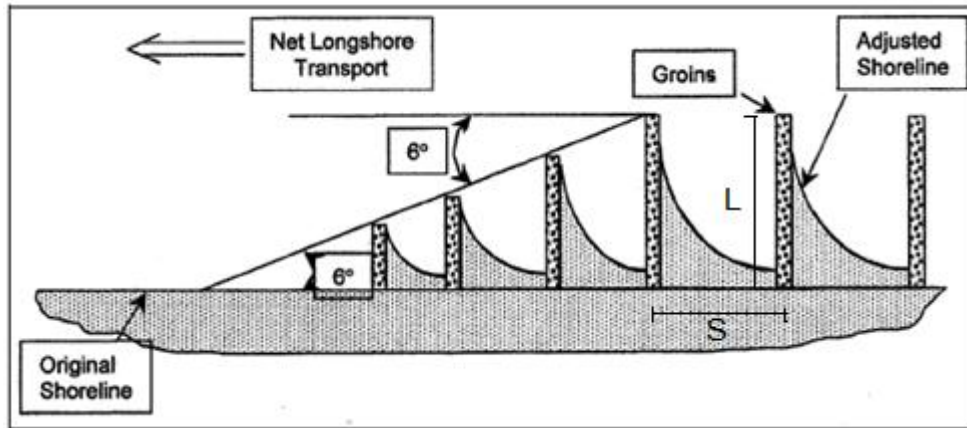
Cross-shore sediment transport is referred to the perpendicular to the coastline movement of sand. This component is the result of tide, wind and wave action, and it is responsible for the shaping of beach profile. For the calculation of cross-shore sediment transport rate the simplified equation proposed by Stive & Battjes (1984) can be used:

$$\bar{q}_c = \bar{u}_{br} \cdot \bar{s} \quad (5)$$

where  $\bar{u}_{br}$  is the near-bottom mean flow velocity induced by a breaking wave and  $\bar{s}$  is the mean sediment load.

## Groyne system

Groynes are the oldest type of coastal protection structures, effective against erosion in areas where longshore sediment transport rate is much greater than cross-shore. They are constructed perpendicularly, more or less, to a long straight coastline, usually in groups forming groyne systems. They control longshore sediment transport by blocking sediment and causing accretion at their updrift side. Nevertheless this process reduces sediment supply to adjacent beaches causing erosion on them. In order to reduce the impacts on downdrift coast, the structures should be designed progressively shorter in the downdrift direction. Generally, groynes' lengths ( $L$ ) are decreased along a line converging to the shoreline from the last full-length groyne of the system, making an angle of about  $\phi=6^\circ$  (Fig.2) with the natural shoreline (USACE, 2006). The spacing ( $S$ ) is also reduced to maintain the same ratio  $R=S/L$  close to 2-3 used in the design.



**Figure 2:** Transition from groyne field to natural beach (USACE, 2006)

If the groyne field consists only of a few number of groynes the shortening should start after the first one (Bruun, 1952). In a system with all the groynes shortened the length of each structure can be calculated by the equation

$$L_i = \left[ \frac{1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan \phi}{1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan \phi} \right]^{i-1} L_1 \quad (6)$$

and the space between two groynes is

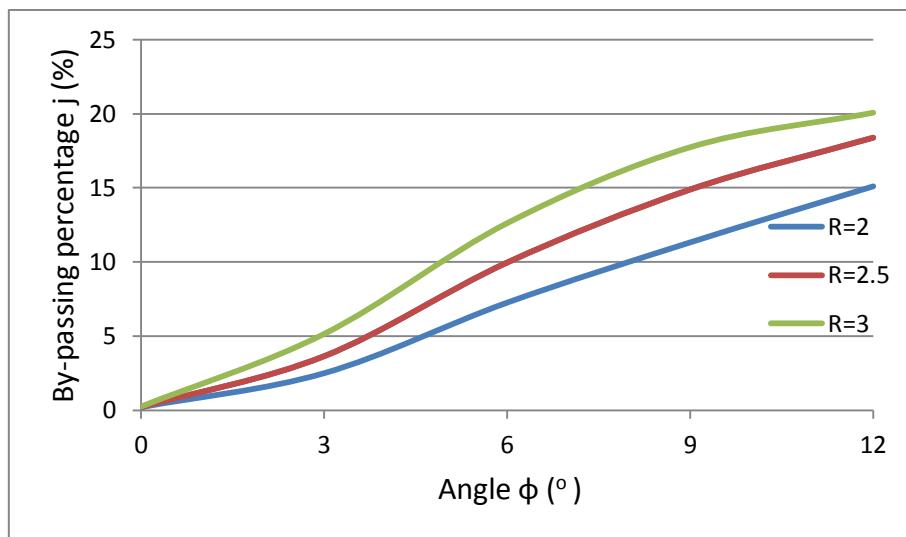
$$S_i = R \frac{\left[ 1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan \phi \right]^{i-1}}{\left[ 1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan \phi \right]^i} L_1 \quad (7)$$



where  $\phi$  is the angle that makes a line converging to the shoreline from the groynes' tips with the natural shoreline. The distance between two groynes is reduced in the downdrift direction, so that the spacing to length ratio  $R=S/L$  remains constant.

### Description of calculations

The calculation of surf zone, longshore and cross-shore sediment transport rates and distribution of longshore littoral transport across the surf zone are necessary in order to investigate how a groyne field affect coast's morphology and its impacts on adjacent beach. These calculations are made for different types of groyne fields (different combinations of angle  $\phi$  and ratio  $R$ ) in a coastal zone where beach slope is  $m=5\%$  and median grain size is  $D_{50}=0.25$  mm. Groyne fields are designed using the equations (6) and (7) for  $L_1=0.8x_b$ . For wave conditions  $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s and  $\alpha_o=45^\circ$  the results of the percentage ( $j$ ) of sediment by-passing around the last groyne's tip are presented in Figure 3 in relation with the angle  $\phi$  and with ratio  $R$ .



**Figure 3:** The percentage of sediment by-passing downdrift for different types of groyne fields.

### Numerical models of MIKE21

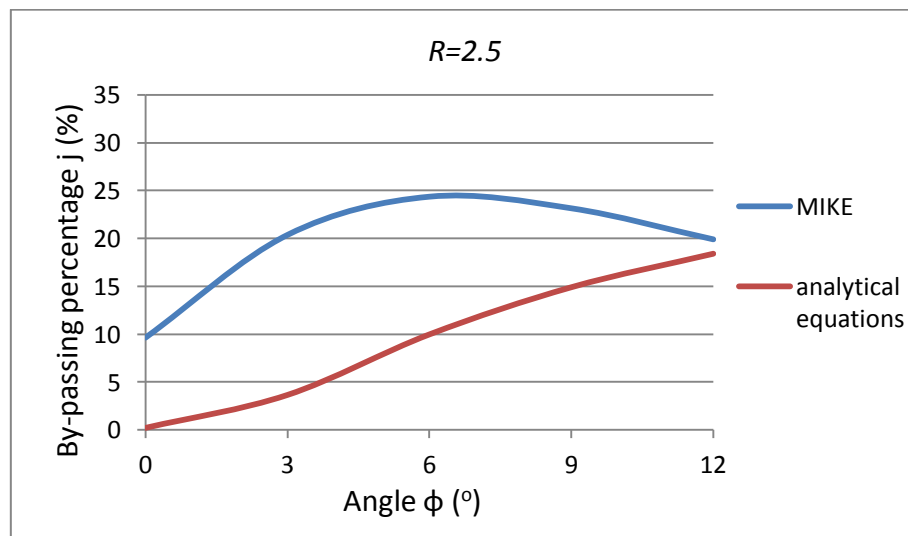
A wave (PMS), a hydrodynamic (HD) and a sediment transport (ST) model (of software MIKE21 of Danish Hydraulic Institute (DHI)) are used to simulate the flow conditions and

the transport rate in coastal zone with a groyne system in order to investigate the influence of beach slope and grain size on sediment transport regime. Different types of groyne fields are tested in three different coasts (whose bed slope is  $m=3\%$ ,  $5\%$  and  $10\%$  and median grain size  $D_{50}=0.25$  mm and  $0.15$  mm). Five different wave conditions were simulated (Table 1).

**Table 1: Wave conditions**

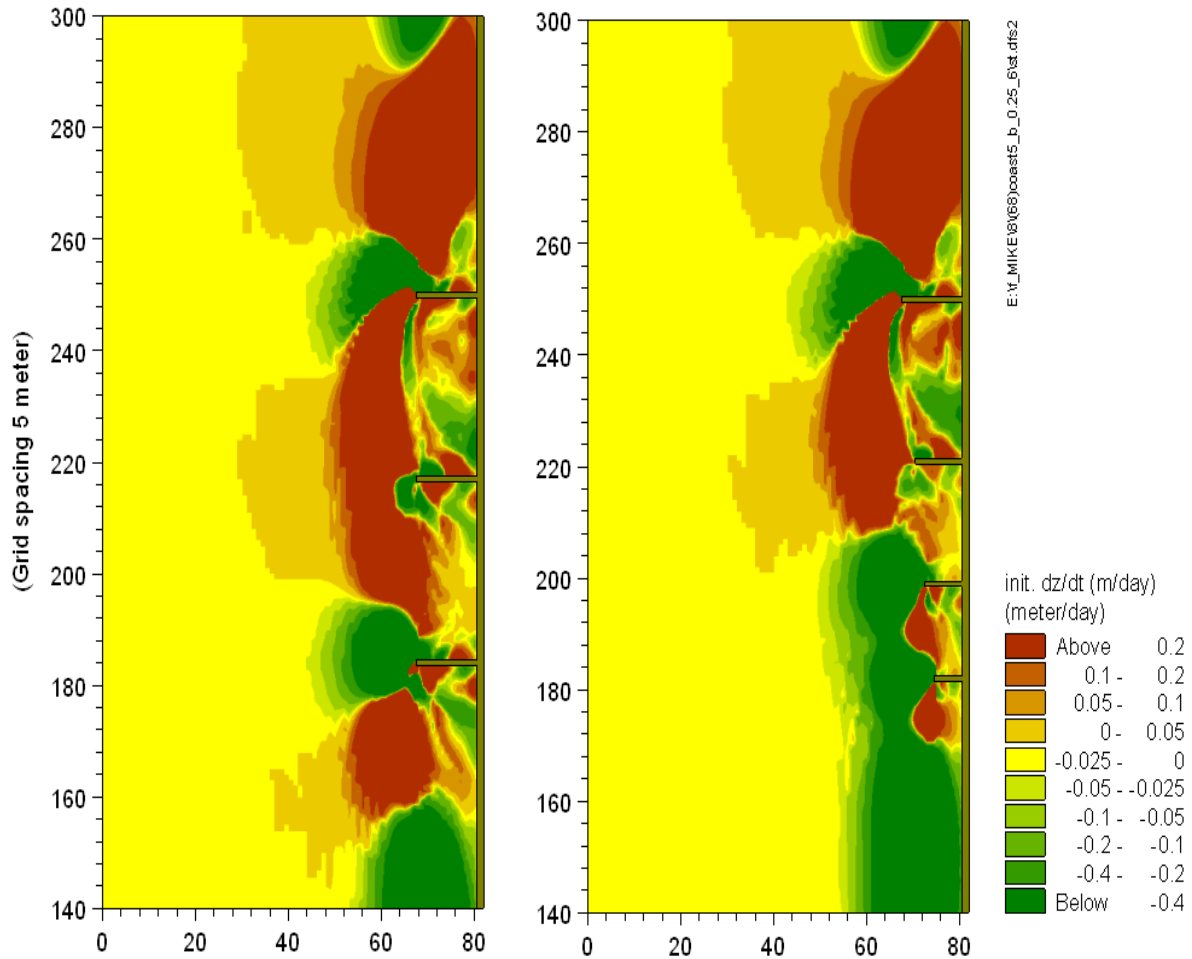
$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ ( $^\circ$ )
<b>2.0</b>	7.2	45
<b>2.0</b>	7.2	30
<b>2.0</b>	7.2	60
<b>1.0</b>	5.4	45
<b>3.0</b>	8.4	45

The results of MIKE21 differ from those of analytical equations. In the first case, when a groyne field is designed with  $\phi=6^\circ$  the amount of sediment by-passing downdrift gets the maximum value. In the second case the maximum value is reached when  $\phi=12^\circ$  (Fig.4).



**Figure 4:** The percentage of sediment by-passing downdrift for different types of groyne fields (results from MIKE21 and Analytical equations)

Furthermore, typical groyne systems with stable length of structures are investigated. In a typical groyne field a greater amount of sediment is trapped in the updrift side. Moreover, due to turbulence in the vicinity of structures, accretion takes place offshore, away from the shoreline (Fig.5).



**Figure 5:** Rates of bed level change (m/day)

(a) Typical groyne system ( $L=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ )

(b) Groyne system with shortened structures in downdrift direction ( $L_1=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ ,  $\phi=6^\circ$ )

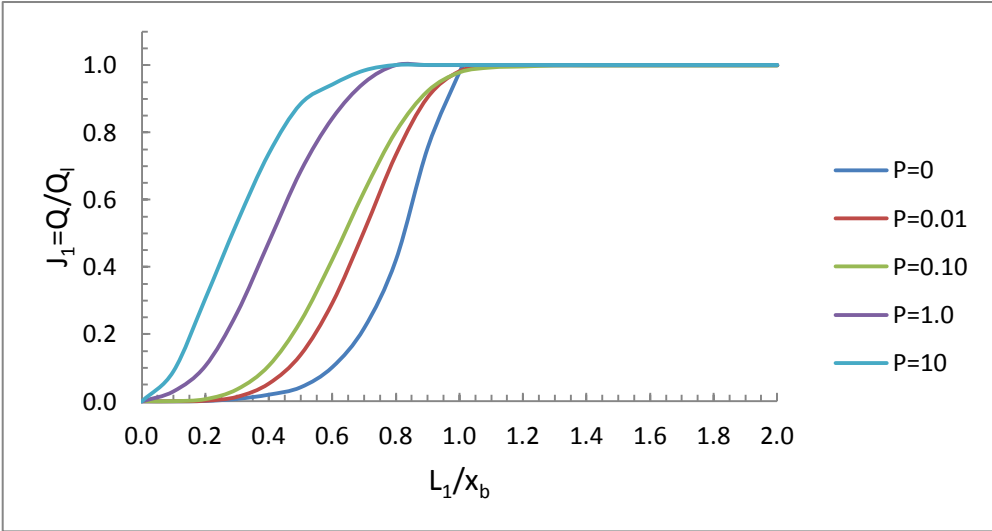
The results of different types of groyne systems are presented in figures “by-passing-percentage (j) – angle ( $\phi$ ) – spacing to length ratio (R)” (Appendix A). In most cases the optimum value of the angle  $\phi$  (a line converging to the shoreline from the tips of groynes making with the natural shoreline) is about  $6^\circ$ . For this value, which is also proposed by ASCE (1994), the maximum amount of sediment by-passing in the adjacent beach is reached.

## Conclusion

To avoid erosion of adjacent beach in a groyne system, the gradually shortening of structures’ length in the downdrift direction is proposed. The optimum value of the angle a

line converging to the shoreline from the groynes' tips making with the natural shoreline is about  $6^\circ$ . Length and spacing of structures are calculated by equations (6) and (7). Apart from the length, the distance between groynes is reduced as well so that the spacing to length ratio  $R$  remains constant ( $R=2-3$ ).

To estimate the amount sediment by-passing around the tip of the last groyne, analytical equations (eg. 1, 2, 5) and longshore sediment transport distribution (generated by Eq. 4) may be used. The sediment amount that should pass downdrift ( $j$ ) depends on local hydrodynamic conditions and sediment transport regime, as well as the type of beach, and it is estimated by the designer of the project. After the estimation the desired sediment amount ( $j$ ) downdrift, the amount that is allowed to by-pass around the tip of first groyne is about  $j_1=1.5j$  and the first groyne's length ( $L_1$ ) can be calculated from mass curve (Fig.6) of sediment transport rate in surf zone.



**Figure 6:** Mass curve of longshore sediment transport rate in surf zone for a sequence of values of the mixing parameter

## Εισαγωγή

---

Οι ακτές είναι από τα πιο ευμετάβλητα φυσικά συστήματα της φύσης. Τα αίτια που προκαλούν μεταβολές στις ακτές είναι είτε φυσικά όπως οι υδροδυναμικές συνθήκες, η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, το κλίμα και το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής είτε ανθρωπογενή όπως η κατασκευή έργων και οι αμμοληψίες. Οι μεταβολές που επιφέρουν οι παραπάνω παράγοντες μπορεί να είναι μακροπρόθεσμες, βραχυπρόθεσμες ή στιγμιαίες ανάλογα με το πόσο χρονικό διάστημα χρειάζεται για να είναι ορατές.

Οι ακτές που συντίθενται από κοκκώδη υλικά, υφίστανται την έντονη επίδραση των κυματισμών και των ρευμάτων, που έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της μορφολογίας τους σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Μια ακτογραμμή μπορεί να αλλάξει σχήμα μετά από μια καταιγίδα λίγων ωρών, κατά τη διάρκεια ενός παλιρροιακού κύκλου ή ακόμα μέσα σε χιλιάδες χρόνια διακύμανσης της στάθμης της θάλασσας. Κάποιες ακτές βρίσκονται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, ενώ άλλες σε μια συνεχή εξέλιξη (π.χ. συνεχή διάβρωση). Μεγάλες ποσότητες ιζημάτων μεταφέρονται παράλληλα ή/και εγκάρσια προς την ακτογραμμή κάτω από την αποσταθεροποιητική δράση των κυμάτων και τη μεταφορική δράση των ρευμάτων. Η μελέτη της μεταφοράς των φερτών υλών στην παράκτια ζώνη και της εξέλιξης της μορφολογίας της ακτογραμμής και του θαλάσσιου πυθμένα, ενδιαφέρει όσους ασχολούνται με την προστασία και διαχείριση του παράκτιου περιβάλλοντος και το σχεδιασμό των παράκτιων τεχνικών έργων.

Η κατασκευή ενός παράκτιου τεχνικού έργου σε ένα τέτοιο δυναμικό περιβάλλον, συνεπάγεται αναμόρφωση των υδροδυναμικών συνθηκών και κατ' επέκταση των ρυθμών στερεομεταφοράς. Έτσι παράκτια τεχνικά έργα, όπως κυματοθραύστες και πρόβολοι, κατασκευάζονται πολλές φορές σε περιοχές όπου παρατηρείται έντονη μεταβολή της ακτογραμμής, με σκοπό την προστασία της έναντι διάβρωσης και τη σταθεροποίησή της.

Η απαίτηση για σταθερή ακτογραμμή αποτελεί επιτακτική ανάγκη για κοινωνικούς και οικονομικούς λόγους. Στον παράκτιο χώρο συγκεντρώνεται ένα μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και έτσι πολλές φορές κρίνεται αναγκαίο να προστατευθεί η ακτή από τις διεργασίες που προκαλούν τη μεταβολή της ακτογραμμής. Για την προστασία και σταθεροποίηση της ακτογραμμής μπορούν να κατασκευασθούν παράκτια τεχνικά έργα ή/και να ληφθούν διαχειριστικά μέτρα.



# Κεφάλαιο 1. Παράκτια Ζώνη

## 1.1 Εισαγωγή

Η παράκτια ζώνη (coastal zone) είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο σύστημα μεταξύ ξηράς και θάλασσας, που οριοθετείται από το τμήμα της ξηράς που επηρεάζεται από τη θάλασσα, και το τμήμα της θάλασσας που επηρεάζεται από την ξηρά και βρίσκεται σε διαρκή αλλαγή σε όλες τις κλίμακες του χρόνου. Το θαλάσσιο τμήμα της παράκτιας ζώνης ορίζεται από την ακτογραμμή και την ισοβαθή στην οποία γίνεται αισθητή η επίδραση των κυμάτων στον πυθμένα ( $d \approx 2 \cdot H_s$  ή  $L_s/4$ ), ενώ το χερσαίο περιλαμβάνει την ακτή και μπορεί να επεκταθεί στο εσωτερικό της ξηράς ως τον υδροκρίτη της λεκάνης απορροής.

Η παράκτια ζώνη και η ακτή (παραθαλάσσια ζώνη της ξηράς) αποτελούν έκφραση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς ιζημάτων από τη λιθόσφαιρα και απομάκρυνσης ή συσσώρευσης τους από την υδρόσφαιρα, υπό τη δράση των κυματισμών και των ρευμάτων, τα οποία εξαρτώνται από την ατμόσφαιρα (Παναγιωτίδης & Χατζημπίρος, 2004). Οι παράκτιες διεργασίες που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της μορφολογίας της ακτής, όπως η μεταφορά των ιζημάτων και η μεταβολή της ακτογραμμής, οφείλονται είτε σε φυσικά (κυματισμοί, ρεύματα, άνεμος) είτε σε ανθρωπογενή (παράκτια ή λιμενικά έργα) αίτια.

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος του Ηνωμένου Βασιλείου έχει ορίσει τρεις ζώνες κατά πλάτος μιας παραλίας (Memos, 2009):

- τη ζώνη αλληλεπίδρασης (interactive zone), όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζονται ή μπορούν να επηρεαστούν από την παράκτια ζώνη
- τη δυναμική ζώνη (dynamic zone), η οποία επηρεάζεται άμεσα από φυσικές διεργασίες όπως η διάβρωση
- τη ζώνη κινδύνου (hazard zone)

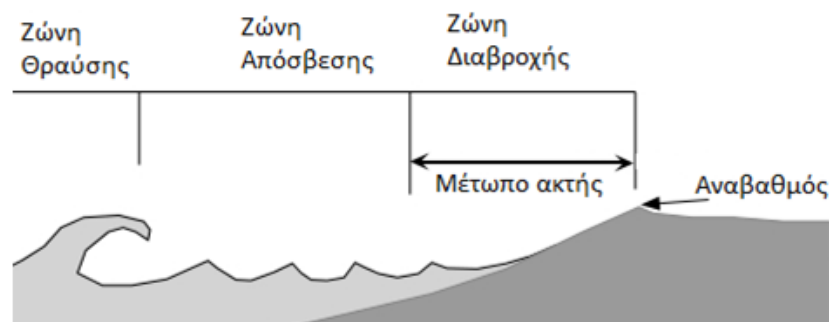


Σχήμα 1.1: Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής

Τα βασικά χαρακτηριστικά του παράκτιου συστήματος είναι:

- τα αβιοτικά, όπως οι κλιματολογικές και οι γεωμορφολογικές συνθήκες
- τα βιοτικά, που σχετίζονται με τη χλωρίδα και την πανίδα και
- τα ανθρωπογενή, όπως οι κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες, οι χρήσεις γης κλπ.

Η παράκτια ζώνη υποδιαιρείται στην επάκτια (inshore) και την προάκτια (foreshore) ζώνη, των οποίων το όριο είναι η γραμμή κατώτατης ρηχίας. Επιπλέον περιλαμβάνει τη ζώνη πριν από τη θραύση, όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυματισμών, τη ζώνη θραύσης (breaker zone) η οποία αποτελεί το πιο δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνης και τη ζώνη μετά τη θραύση. Η τελευταία υποδιαιρείται στη ζώνη απόσβεσης (surf zone), όπου αποσβήνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυόμενου κύματος, και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) με όρια την κατώτερη και την ανώτερη θέση της ακτογραμμής.



Σχήμα 1.2: Παράκτια Ζώνη

## 1.2 Παράκτια ρεύματα

Στις ζώνες όπου οι κυματισμοί υφίστανται διάθλαση, περίθλαση και θραύση είναι δυνατό να προκληθούν κυματογενή παράκτια ρεύματα.

### 1.2.1 Ζώνη πριν τη θραύση

Οι κυματισμοί προκαλούν κινήσεις των υγρών σωματιδίων, οι οποίες είναι έντονες στα επιφανειακά στρώματα του νερού και αποσβένονται καθώς αυξάνεται το βάθος. Στα βαθειά νερά ( $d/L > 1/2$ ) οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι κυκλικές, ενώ στα ρηχά ή σε νερά ενδιάμεσου βάθους ( $d/L < 1/2$ ) τείνουν να γίνουν ελλειπτικές. Στις περιοχές αυτές όπου οι τροχιές δεν είναι κλειστές δημιουργείται ένα οριζόντιο κυματογενές ρεύμα κατά τη



διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών. Η ένταση αυτού του ρεύματος αυξάνει καθώς μειώνεται το σχετικό βάθος και μεγιστοποιείται στη ζώνη θραύσης.

### **1.2.2 Ζώνη θραύσης - Ζώνη μετά τη θραύση**

Η ζώνη θραύσης είναι η πιο ενεργή περιοχή της παράκτιας ζώνης καθώς μέσα σε αυτή αναπτύσσονται έντονα ρεύματα τόσο κατά μήκος της ακτής όσο και κάθετα προς αυτή. Επιπλέον στη ζώνη αυτή λαμβάνει χώρα το 80-90% της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής. Στην περίπτωση λοξής θραύσης των κυματισμών ένα μέρος της ενέργειας (κάθετη συνιστώσα) αναλίσκεται στην ανάπτυξη τύρβης, ενώ το υπόλοιπο (παράλληλη συνιστώσα) δημιουργεί στη ζώνη θραύσης ένα επίμηκες ρεύμα κατά μήκος της ακτής (longshore current), το οποίο μεταφέρει ιζήματα παράλληλα σε αυτή.

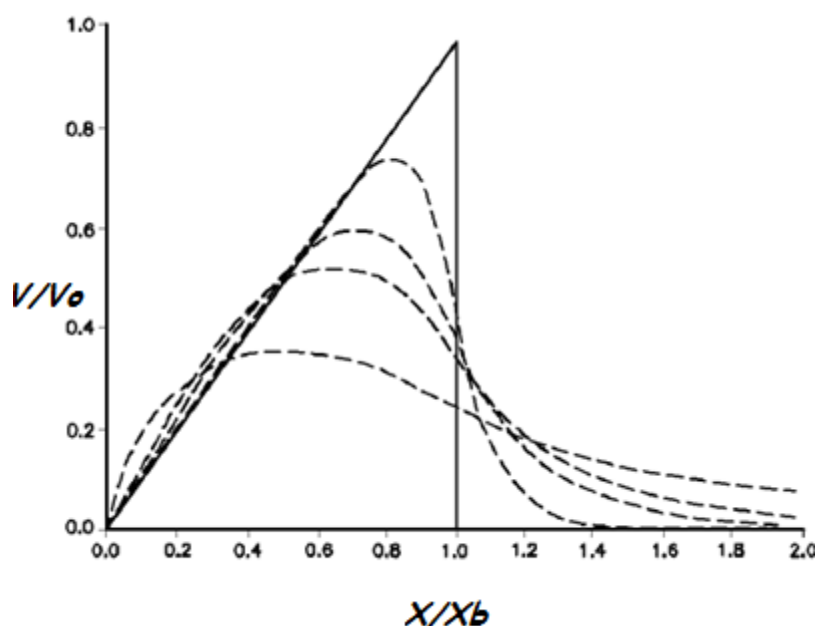
Η δημιουργία του ρεύματος κατά μήκος της ακτής οφείλεται στις υδραυλικές βαθμίδες που προκαλούνται από την ανομοιόμορφη κατανομή του ύψους κύματος στη ζώνη θραύσης. Επίσης, η δημιουργία αυτού του ρεύματος οφείλεται και στην κλίση της γραμμής θραύσης ως προς την ακτογραμμή καθώς ένα μέρος της κυματικής ενέργειας ανακλάται και κινείται παράλληλα προς την ακτή. Επίμηκη ρεύματα αναπτύσσονται περισσότερο κατά μήκος ευθύγραμμων παραλιών. Η φορά αυτών των ρευμάτων καθορίζεται από τη μορφή της ακτογραμμής και τη διεύθυνση των προσπιπτόντων κυματισμών. Η ταχύτητα ενός τέτοιου ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση του ύψους θραύσης των κυματισμών, τη μείωση της περιόδου, την αύξηση της γωνίας μεταξύ της γραμμής θραύσης και της ακτής, και τέλος, με την αύξηση της κλίσης των πρανών της ακτής. Κάνοντας τις παραδοχές της ομοιόμορφης κλίσης πυθμένα, της μικρής γωνίας θραύσης, της ομοιόμορφης θραύσης των κυματισμών σε όλο το πλάτος της ζώνης θραύσης και της γραμμικής θεωρίας κυματισμών, η ταχύτητα του κατά μήκος της ακτής ρεύματος δίνεται από τη σχέση (USACE, 2006)

$$V = \frac{5\pi \tan\beta^*}{16 C_f} \gamma_b \sqrt{gd} \cdot \sin a \cdot \cos a \quad (1.1)$$

όπου  $\tan\beta^* = \tan\beta / (1 + (\frac{3\gamma_b^2}{8}))$  η κλίση του πυθμένα τροποποιημένη ώστε να συμπεριλαμβάνει την ανύψωση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω κυματισμών (wave setup),  $C_f$  συντελεστής τριβής πυθμένα και  $a$  γωνία μεταξύ του μετώπου των κυματισμών και των ισοβαθών.

Η εγκάρσια κατανομή του κατά μήκος της ακτής ρεύματος έχει τριγωνική μορφή με μέγιστο στη γραμμή θραύσης και μηδενική τιμή στην ακτογραμμή όταν θεωρείται αμελητέα

η εγκάρσια ανάμειξη. Η παρουσία οριζόντιας ανάμειξης, καθώς και οποιασδήποτε μεταβολής του ύψους κύματος και της θέσης της γραμμής θραύσης, τροποποιεί το προφίλ της ταχύτητας του ρεύματος, μετατοπίζοντας το μέγιστο προς την ακτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3. Η παράμετρος  $V_0$  είναι η μέγιστη ταχύτητα του ρεύματος στην περίπτωση όπου η εγκάρσια ανάμειξη θεωρηθεί αμελητέα και χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση του ρεύματος.

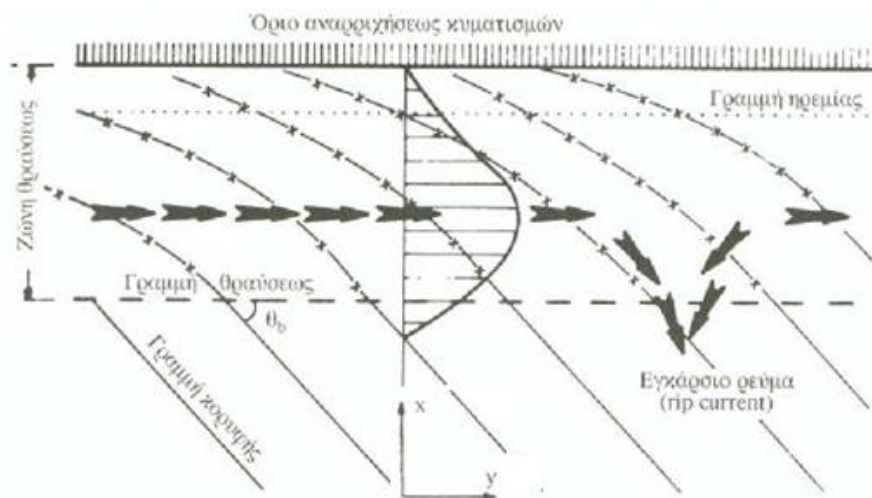


**Σχήμα 1.3:** Εγκάρσιο προφίλ του κατά μήκος της ακτής ρεύματος (USACE, 2006)

Ένα ακόμα ρεύμα αναπτύσσεται κοντά στην ακτογραμμή κατά την αναρρίχηση του νερού στην ακτή και την επαναφορά του προς το εσωτερικό της θάλασσας. Το κύμα προσπίπτει στην ακτή υπό κάποια γωνία, αλλά το νερό επιστρέφει στη θάλασσα υπό διαφορετική γωνία, με μια διεύθυνση περίπου κάθετη στην ακτογραμμή. Έτσι το ρεύμα αυτό κάνει μια κίνηση ζικ-ζακ και μετακινείται παράλληλα προς την ακτή, όπως και το επίμηκες ρεύμα που περιγράφηκε παραπάνω, αλλά πιο κοντά στην ακτογραμμή (Δουκάκης, 2007).

Ένα τρίτο σημαντικό ρεύμα που δημιουργείται στην παράκτια ζώνη είναι το ρεύμα διαφυγής (rip current). Τα ρεύματα διαφυγής, τα οποία αναπτύσσονται στα σημεία όπου συναντώνται δύο επιμήκη ρεύματα αντίθετων διευθύνσεων, επαναφέρουν το νερό των κυματισμών προς την ανοιχτή θάλασσα. Τα ρεύματα αυτά συχνά ορίζουν το όριο της παράκτιας ζώνης προς την ανοιχτή θάλασσα. Τα σημεία όπου εμφανίζονται ρεύματα διαφυγής καθώς και η έντασή τους είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν αφού η όλη

διαδικασία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το ύψος, η περίοδος και η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών και η τοπογραφία της παράκτιας ζώνης.



**Σχήμα 1.4:** Διαμόρφωση των παράκτιων ρευμάτων στη ζώνη θραύσεως (Κουτίτας, 1998)

### 1.3 Παράκτια ιζήματα

Οι ακτές και ο θαλάσσιος πυθμένας από γεωλογική άποψη μπορεί να είναι βραχώδεις ή αμμώδεις/γαιώδεις. Οι βραχώδεις ακτές έχουν σταθερή μορφή και εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες γεωλογικών αιώνων. Οι ακτές της δεύτερης κατηγορίας συντίθενται από κοκκώδη υλικά (άργιλο, άμμο, κροκάλες) και υφίστανται έντονη επίδραση από τους κυματισμούς και τα ρεύματα με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται μορφολογικά σε όλες τις χρονικές κλίμακες (ακόμα και κατά τη διάρκεια θυελλών και τρικυμιών).

Τα ιζήματα των ακτών είναι τα προϊόντα αποσάθρωσης των πετρωμάτων της ξηράς και μεταφέρονται σε αυτές κυρίως με τα υδατορρέματα, αλλά και με τον άνεμο και τους παγετώνες. Επίσης στο θαλάσσιο πυθμένα αποτίθενται ως ιζήματα κελύφη θαλάσσιων οργανισμών, διαλυμένες ουσίες στο νερό της θάλασσας, σωματίδια μετεωριτών κλπ. Με βάση την προέλευσή τους τα ιζήματα υποδιαιρούνται σε: (α) μηχανικά ή κλαστικά, (β) βιογενή ή οργανικά, (γ) χημικά ή υδρογενή, (δ) ηφαιστιογενή και (στ) κοσμογενή.

Η γεωλογική σύσταση των ιζημάτων της παράκτιας ζώνης μπορεί να είναι χαλαζιακή, ασβεστολιθική, αργιλική ή οργανική. Η περιεκτικότητα εξαρτάται κυρίως από την πηγή τροφοδοσίας.

Το κύριο φυσικό χαρακτηριστικό των ιζημάτων είναι το μέγεθος των κόκκων, το οποίο προσδιορίζεται με κοκκομετρική ανάλυση. Με βάση τη χαρακτηριστική διάμετρο των κόκκων τα ιζήματα ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση εδαφών ακτών ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων (Κουτίτας, 1998)**

Όνομασία	Διάμετρος (mm)	Παράμετρος $\phi$
Κροκάλες	250 – 60	-8 έως -6
Χάλικες	32 – 4	-5 έως -2
Άμμος	2 – 0.10	1 έως 4
Ιλύς	0.03 – 0.004	5 έως 8
Άργιλος	0.002 – 0.0002	9 έως 12

Στον παραπάνω πίνακα η παράμετρος  $\phi$  ορίζεται κατά τον Wentworth ως ο λογάριθμος με βάση το 2 της διαμέτρου  $D$  σε mm, δηλαδή  $\phi = -\log_2 D$ .

Άλλες σημαντικές παράμετροι των ιζημάτων που προσδιορίζονται από την αθροιστική καμπύλη συχνότητας (καμπύλη παρουσίας της κατανομής των κόκκων ενός ιζήματος) είναι:

- το Μέσο μέγεθος των κόκκων, που απεικονίζει τη διάμετρο με συχνότητα εμφάνισης 50% και προσδιορίζεται από τη σχέση  $M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$
- η Διαβάθμιση  $\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$ , που απεικονίζει την απόκλιση από το μέσο μέγεθος. Όσο μικρότερη είναι η διαβάθμιση τόσο πιο ομοιόμορφο είναι το δείγμα.
- η Λοξότητα  $SK = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$ , που απεικονίζει το βαθμό ασυμμετρίας κατανομής των κόκκων. Συμμετρικές κοκκομετρικές καμπύλες έχουν μηδενική λοξότητα. Αρνητική λοξότητα σημαίνει ότι υπερτερούν τα χονδρόκοκκα υλικά και στην περιοχή μελέτης πιθανότατα υπάρχει κάποιο έντονο ρεύμα που προκαλεί διάβρωση.
- η Κύρτωση  $Ku = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$ , που εκφράζει την απόκλιση της κατανομής των κόκκων από την κανονική κατανομή. Πλατύκυρτη καμπύλη σημαίνει ότι το ιζήμα έχει πολύ καλή διαβάθμιση.

Από τις παραπάνω στατιστικές παραμέτρους καθώς επίσης και από το σχήμα, τη μορφή και τον προσανατολισμό των κόκκων μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τη

δυναμική του μέσου μεταφοράς των φερτών και του περιβάλλοντος απόθεσής τους (Κονισπολιάτης, 2009).

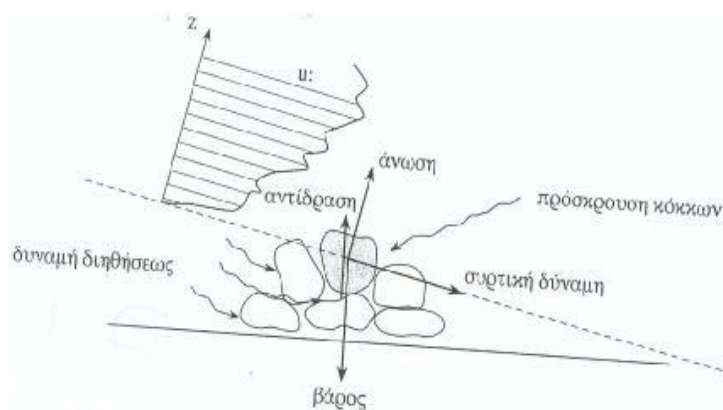
Τέλος, σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού των ακτών και του θαλάσσιου πυθμένα είναι το ειδικό βάρος, η γωνία εσωτερικής τριβής, η διαπερατότητα και η ταχύτητα καθίζησης. Η τελευταία είναι πολύ σημαντική καθώς ελέγχει το ρυθμό διάβρωσης των ιζημάτων.

#### **1.4 Μεταφορά ιζημάτων στην παράκτια ζώνη**

Η μορφολογία μιας ακτής είναι συνισταμένη των φυσικών διεργασιών που συνέβησαν κατά το παρελθόν ή συμβαίνουν ακόμα και σήμερα. Στη διαμόρφωση των ακτών συντελούν αρκετοί παράγοντες, όπως οι μηχανισμοί διάβρωσης και απόθεσης των ιζημάτων (π.χ. παράκτια μεταφορά ιζημάτων), οι υδροδυναμικές συνθήκες (κύματα, ρεύματα), η φύση των πετρωμάτων, οι τεκτονικές κινήσεις και το κλίμα.

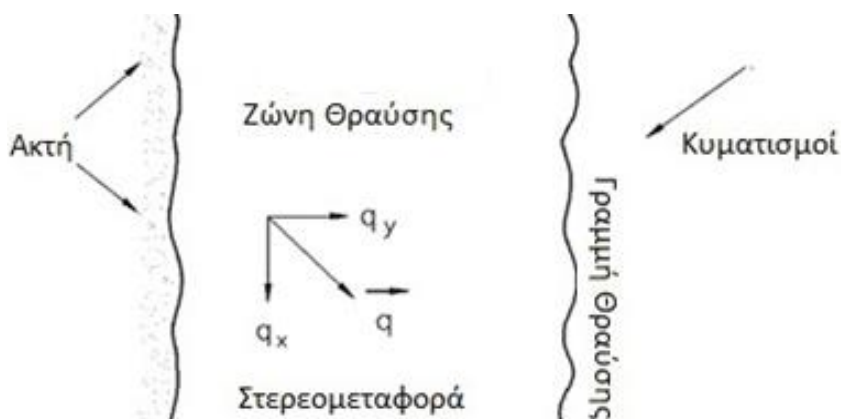
Η μελέτη της μεταφοράς των φερτών υλών στην παράκτια ζώνη και της εξέλιξης της μορφολογίας της ακτογραμμής και του θαλάσσιου πυθμένα, ενδιαφέρει όσους ασχολούνται με την προστασία και τη διαχείριση του παράκτιου περιβάλλοντος, καθώς επίσης και με το σχεδιασμό των παράκτιων τεχνικών έργων.

Η μεταφορά των ιζημάτων που λαμβάνει χώρα στο παράκτιο περιβάλλον αποτελείται κυρίως από την κίνηση των ιζημάτων στη ζώνη θραύσης. Οι κόκκοι των ιζημάτων τίθενται σε κίνηση από τις τάσεις που αναπτύσσονται στον πυθμένα από τις κινήσεις των υγρών σωματιδίων. Οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, η αντίδραση στήριξης σε άλλους κόκκους, οι υδροδυναμικές υποπιέσεις λόγω διήθησης και οι δυνάμεις πρόσκρουσης άλλων κόκκων δημιουργούν τις κατάλληλες δυναμικές συνθήκες αποκόλλησης των επιφανειακών κόκκων του πυθμένα. Η έναρξη της κίνησης των κόκκων συνδέεται άμεσα με το πεδίο ταχυτήτων που επικρατεί κοντά στον πυθμένα. Μετά την αποσταθεροποίηση των κόκκων η κίνηση τους γίνεται είτε σε επαφή με τον πυθμένα (φορτίο πυθμένα) είτε σε αιώρηση (φορτίο αιωρήσεως).



**Σχήμα 1.5:** Δυνάμεις που επιδρούν στον κόκκο μη συνεκτικού υλικού (Κουτίτας, 1998)

Το φυσικό μέγεθος που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στην αποσταθεροποίηση των κόκκων είναι η διατμητική τάση πυθμένα, η οποία είναι επαλληλία των τάσεων από τους κυματισμούς και τα ρεύματα. Για την αποκόλληση και την έναρξη της κίνησης ενός κόκκου του ιζήματος πρέπει η διατμητική τάση να αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του νερού, την ταχύτητα ροής και τις παραμέτρους του ιζήματος (πυκνότητα, κοκκομετρία).



**Σχήμα 1.6:** Συνιστώσες στερεομεταφοράς: παράλληλη ( $q_x$ ) και κάθετη ( $q_y$ ) στην ακτή (USACE, 2006)

Τεράστιες ποσότητες κοκκώδους υλικού μεταφέρονται κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις, υπό την αποσταθεροποιητική δράση των κυματισμών και τη μεταφορική δράση των ρευμάτων. Η μεταφορά αυτή των ιζημάτων ονομάζεται στερεομεταφορά και διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες, την παράλληλη και την κάθετη στην ακτή, ώστε να γίνει πιο κατανοητό και να αναλυθεί ευκολότερα ένα πολύ σύνθετο περιβάλλον όπως είναι το παράκτιο.

Για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής και της εξέλιξης της ακτογραμμής και του πυθμένα στην παράκτια ζώνη, χρησιμοποιούνται συνήθως απλοποιημένες σχέσεις τόσο για τη παράλληλη όσο και για την εγκάρσια στην ακτή κίνηση των ιζημάτων. Η εγκάρσια στερεομεταφορά ενδιαφέρει κυρίως όταν μελετάται η μεταβολή της ακτογραμμής και του πυθμένα της θάλασσας κατά τη διάρκεια ενός κυματικού επεισοδίου. Η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του ισοζυγίου των μεταφερόμενων ιζημάτων στη διάρκεια αλληλουχίας κυματικών επεισοδίων (συνήθως στη διάρκεια ενός έτους).

#### **1.4.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής (longshore sediment transport)**

Η μεταφορά των ιζημάτων κατά μήκος της ακτής εκτείνεται σε όλο το πλάτος της ζώνης επίδρασης των κυματισμών στο υλικό του πυθμένα, αλλά μεγιστοποιείται στη ζώνη θραύσης, όπου η τύρβη αποκτά τους μέγιστους ρυθμούς γενέσεως και αποσβέσεως και επιπλέον δημιουργείται παράκτιο ρεύμα λόγω λοξής θραύσης. Αυτή η συνισταμένη είναι η πιο σημαντική διεργασία για την κίνηση των ιζημάτων στην παράκτια ζώνη.

Μετά τη θραύση των κυματισμών και εξαιτίας της ανακατανομής της ορμής δημιουργείται ένα κυματογενές ρεύμα παράλληλο στην ακτή, το οποίο είναι υπεύθυνο για την μετακίνηση των ιζημάτων. Τα ιζήματα τίθενται σε αιώρηση από την τύρβη που αναπτύσσεται κατά τη θραύση καθώς επίσης και από την τροχιακή επιταχυνόμενη κίνηση των υγρών σωματιδίων εξαιτίας της παρουσίας των κυματισμών. Στη ζώνη πριν από τη θραύση η στερεομεταφορά είναι ασήμαντη, λόγω της μικρής συνιστώσας της κίνησης παράλληλα στην ακτογραμμή.

Αυτή η συνιστώσα της στερεομεταφοράς είναι από τις πιο σημαντικές διεργασίες που επηρεάζουν τη μορφολογία μιας ακτής και ελέγχει σε μεγάλο βαθμό κατά πόσο θα συμβεί διάβρωση, απόθεση ή αν η ακτογραμμή θα παραμένει σταθερή. Ο υπολογισμός της στερεομεταφοράς παράλληλα στην ακτογραμμή είναι απαραίτητος για το σχεδιασμό παράκτιων τεχνικών έργων και την εκτίμηση των επιπτώσεων των κατασκευών αυτών στην ακτή. Σημαντικές επίσης, για την επιλογή και το σχεδιασμό ενός έργου, είναι η καθαρή (net) και η αθροιστική (gross) στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής. Η πρώτη ορίζεται ως η καθαρή ποσότητα ιζημάτων που διέρχεται από μια διατομή κάθετη στην ακτογραμμή κατά τη διάρκεια ενός έτους και υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ των στερεοπαροχών προς τα δεξιά και προς τα αριστερά ( $Q_n = |Q_r - Q_l|$ ). Η δεύτερη είναι η συνολική ποσότητα ιζήματος

που περνά από μια διατομή, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση κίνησης και ορίζεται ως το άθροισμα των παροχών προς τις δύο αντίθετες κατευθύνσεις ( $Q_g = Q_r + Q_l$ ).

Η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά πιθανόν να διαφέρει σημαντικά από έτος σε έτος ή από εποχή σε εποχή, και αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των έργων προστασίας μιας ακτής. Για παράδειγμα, η καθαρή στερεομεταφορά σε μια περιοχή μπορεί να γίνεται προς τη μια κατεύθυνση τη μια χρονιά και προς την άλλη την επόμενη. Η αθροιστική στερεοπαροχή παρουσιάζει επίσης σημαντική μεταβλητότητα, με μεγάλους ρυθμούς σε περιόδους με ιδιαίτερα έντονες κυματικές συνθήκες και μικρότερους σε περιόδους με κυματισμούς σχετικά ήπιας δράσης.

#### 1.4.1.1 Υπολογισμός Στερεοπαροχής κατά μήκος της ακτής

Ο υπολογισμός της στερεοπαροχής κατά μήκος μιας ακτής μπορεί να γίνει με μετρήσεις πεδίου, προσαρμογή της τιμής της στερεοπαροχής μιας γειτονικής ακτής στην εξεταζόμενη ακτή ή ακόμα με χρήση δεδομένων χρονικών μεταβολών της ακτογραμμής. Πέρα από τις παραπάνω μεθόδους, και όταν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία, η εκτίμηση της στερεοπαροχής γίνεται με εφαρμογή μοντέλων. Έχουν αναπτυχθεί δύο τύποι μοντέλων, τα μοντέλα ροής ενέργειας και τα μοντέλα ροής ορμής.

Τα μοντέλα ροής ενέργειας συναρτούν την κατά μήκος της ακτής ροή της κυματικής ενέργειας ( $P_l$ ) με την παροχή σε βυθισμένο βάρος φερτών υλών παράλληλα στην ακτή ( $Q_l$ ). Σε αυτή την κατηγορία μοντέλων ανήκει η μέθοδος CERC, η πλέον χρησιμοποιούμενη διεθνώς. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η στερεοπαροχή ( $Q_l$ ) προκαλείται αποκλειστικά από κυματογενή ρεύματα παράλληλα στην ακτή και υπολογίζει το ολικό φορτίο (φορτίο πυθμένα και φορτίο αιωρήσεως) κατά μήκος μιας ακτής. Το υπολογιζόμενο φορτίο θεωρείται ότι διακινείται στις ζώνες θραύσης και απόσβεσης. Ο ρυθμός της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς είναι μια συνάρτηση των κυματισμών, της ροής, των ιζημάτων και των παραμέτρων του προφίλ της ακτής. Για τον υπολογισμό του φορτίου χρησιμοποιούνται κυρίως οι παρακάτω σχέσεις:

$$Q_l = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g(1 - n)} P_l \quad (\text{USACE, 2006}) \quad (1.2)$$

$$Q_l = 1290 \cdot P_l \quad (\text{USACE, 2006}) \quad (1.3)$$

$$Q_l = 2.05 \cdot 10^6 \cdot H_o^{5/2} (\cos \alpha_o)^{1/4} \sin 2\alpha_o \quad (\text{USACE, 2006}) \quad (1.4)$$

$$Q_l = 3.60 \cdot 10^6 \cdot H_b^{5/2} \sin 2\alpha_b \quad (\text{USACE, 2006}) \quad (1.5)$$

$$Q_l = 6.40 \cdot 10^4 \cdot H_{sb}^2 \cdot T_p^{1.5} \cdot m_b^{0.75} \cdot D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\alpha_b \quad (\text{Kamphuis, 1991}) \quad (1.6)$$



όπου

$Q_l$  η στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής ( $m^3/έτος$ )

$P_l = \frac{1}{16} \rho g H_{sb}^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b$  η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής ( $J/m/s$ )

K εμπειρικός αδιάστατος συντελεστής

$\rho_s$  ( $=2650 \text{ kg/m}^3$ ) μέση πυκνότητα ιζήματος

$\rho_w$  ( $=1025 \text{ kg/m}^3$ ) μέση πυκνότητα θαλασσινού νερού

$n \approx 0.40$  πορώδες ιζήματος

$g=9.81 \text{ m/s}^2$  επιτάχυνση της βαρύτητας

$H_o$  ύψος κύματος στα βαθειά (m)

$\alpha_o$  γωνιά διεύθυνσης των κυματισμών στα βαθειά

$H_b$  ύψος θραύσης (m)

$\alpha_b$  γωνιά θραύσης

$C_{gb} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd_b)$  η ταχύτητα διάδοσης των κυματισμών στη θραύση (m/s)

$T_p$  περίοδος στην κορυφή του φάσματος (s)

$m_b$  κλίση πυθμένα στη ζώνη θραύσης

$D_{50}$  μέση διάμετρος των κόκκων του ιζήματος (m)

Η συνολική παροχή φερτών που οφείλεται σε μια αλληλουχία κυματικών επεισοδίων ( $H, \alpha$ ) υπολογίζεται ως αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους παροχών  $Q_t = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i f_i Q_{ti})$ , όπου  $f_i$  είναι η συχνότητα εμφάνισης του κυματικού επεισοδίου ( $H_o, \alpha_o$ ) $_i$  στη διάρκεια του χρόνου και  $\varepsilon_i = \pm 1$  ανάλογα με τη φορά κίνησης του ιζήματος κατά μήκος της ακτής.

Οι εκφράσεις της στερεομεταφοράς υποθέτουν άπειρη ποσότητα ιζήματος κατά μήκος της ακτής και ακτή άπειρου μήκους, επομένως η στερεοπαροχή που υπολογίζεται αποτελεί τη δυνητική στερεοπαροχή. Επιπλέον, από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται μια μέση τιμή της στερεοπαροχής στη ζώνη θραύσης.

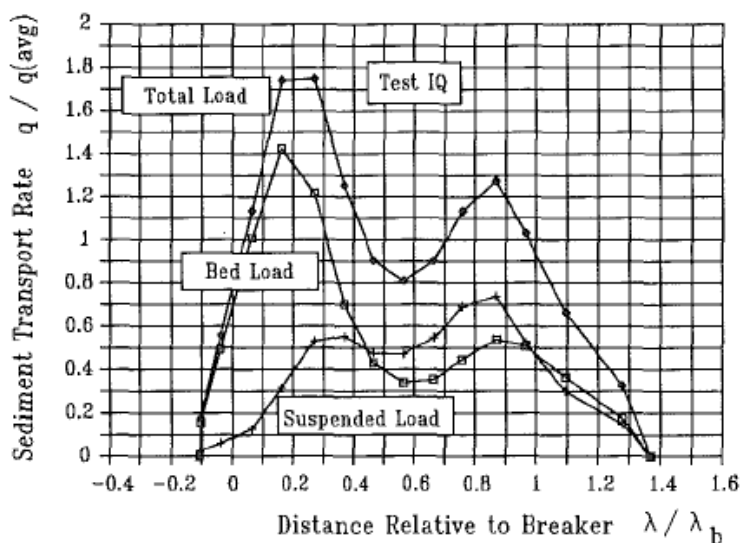
#### 1.4.1.2 Κατανομή στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής

Εκτός από τη μέση τιμή της στερεομεταφοράς, βασικό στοιχείο για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των παράκτιων τεχνικών έργων (έργα αναπλήρωσης ακτής, πρόβολοι κλπ) είναι και η κατανομή της στη ζώνη θραύσης.

Η κατανομή της στερεομεταφοράς υπολογίστηκε από τον Kamphuis (1991) ύστερα από μετρήσεις σε ένα τριδιάστατο υδραυλικό μοντέλο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μια

δεξαμενή διαστάσεων 23.4x10.0 m και κλίσης 1:10, για μονοχρωματικούς (regular) και σύνθετους (irregular) κυματισμούς. Έγιναν μετρήσεις των χαρακτηριστικών παραμέτρων των κυματισμών (ύψος και γωνία πρόσπτωσης), της ταχύτητας του κατά μήκος της ακτής ρεύματος και του ρυθμού της στερεομεταφοράς.

Στην αρχή των πειραμάτων που το προφίλ της παραλίας απείχε σημαντικά από το προφίλ ισοροπίας παρατηρούνταν ο μέγιστος ρυθμός στερεομεταφοράς. Οι μετρήσεις της κατανομής των ιζημάτων έγιναν αφού είχε επιτευχθεί ισοροπία στο προφίλ της παραλίας, δηλαδή 3-4 ώρες μετά την έναρξη των πειραμάτων, καθώς τότε ο ρυθμός της μεταφοράς των ιζημάτων τείνει να γίνει σταθερός. Η κατανομή της στερεομεταφοράς που προέκυψε από το πείραμα IQ ( $H_{s,0}=0.124\text{m}$ ,  $T_p=1.15\text{s}$ ,  $\alpha_0=30^\circ$ ,  $D=0.18\text{mm}$ ) έχει δυο κορυφές: μία στη ζώνη διαβροχής ή πολύ κοντά σε αυτή και μία άλλη κοντά στη γραμμή θραύσης ( $\lambda/\lambda_b=1$ ) (Σχήμα 1.7). Στη ζώνη διαβροχής το φορτίο πυθμένα (bed load) είναι πολύ μεγαλύτερο από το αιωρούμενο φορτίο (suspended load), ενώ στη ζώνη θραύσης και τα δύο φορτία είναι εξίσου σημαντικά (Kamphuis, 1991).



**Σχήμα 1.7:** Κατανομές στερεοπαροχών: συνολική, πυθμένα, αιωρούμενων (πείραμα IQ)  
(Kamphuis, 1991)

Για μια συγκεκριμένη ακτή η κατανομή της στερεομεταφοράς μπορεί επίσης να προκύψει και από το προφίλ της ταχύτητας του κατά μήκος της ακτής ρεύματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ρυθμός της στερεομεταφοράς ( $Q$ ) είναι ανάλογος του τετραγώνου του ύψους κύματος ( $H$ ) και κατ' επέκταση και του βάθους ( $d$ ) (Εξ. 1.2, 1.6) ( $Q \sim H^2 \sim d^2$ ) και ότι

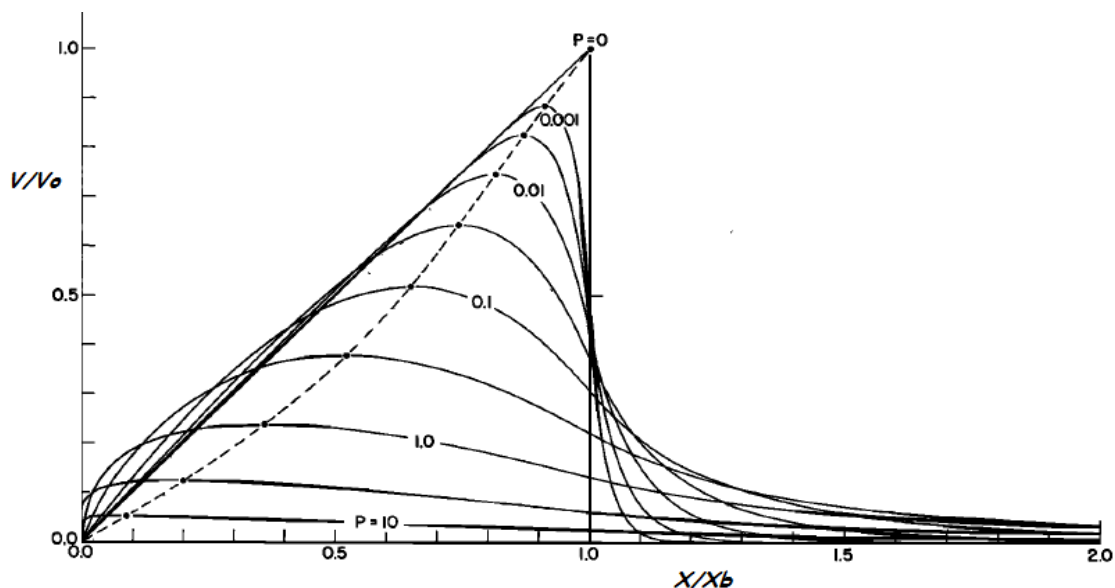
η ταχύτητα του ρεύματος είναι ανάλογη της ρίζας του βάθους ( $d$ ) (Εξ. 1.1) ( $V \sim d^{1/2}$ ), τότε γίνεται η υπόθεση ότι  $Q \sim V^4$  και υπολογίζεται το αντίστοιχο προφίλ.

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2.2 το κατά μήκος της ακτής ρεύμα –το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των ιζημάτων– εξαρτάται από την κλίση του πυθμένα. Ο Longuet-Higgins (1970a,b) όρισε μια αδιάστατη παράμετρο  $P = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{sN}{\alpha C}\right)$ , όπου  $s = dh/dx$  η τοπική κλίση του βάθους (σχεδόν ίση με την κλίση του πυθμένα  $m$ ),  $N$  αδιάστατη σταθερά ( $0 \div 0.016$ ),  $\alpha$  αδιάστατη σταθερά ( $0.30 \div 0.60$ ) η οποία συνδέει το πλάτος κύματος ( $a$ ) με το αντίστοιχο βάθος ( $d$ ) ( $a = \alpha \cdot d$ ) και  $C$  συντελεστής τριβής πυθμένα, η οποία αντιπροσωπεύει την παρουσία εγκάρσιας ανάμειξης και τροποποιεί αντίστοιχα το προφίλ της ταχύτητας του ρεύματος. Έτσι, όταν υπάρχει οριζόντια ανάμειξη ( $P \neq 0$ ) σε μια ακτή δεδομένης κλίσης και τραχύτητας πυθμένα η ταχύτητα του ρεύματος γίνεται

$$V/V_0 = \begin{cases} B_1(X/X_b)^{p_1} + A(X/X_b), & 0 < X/X_b < 1 \\ B_2(X/X_b)^{p_2}, & 1 < X/X_b < \infty \end{cases} \quad (1.7)$$

όπου  $B_1 = [P(1 - p_1)(p_1 - p_2)]^{-1}$ ,  $B_2 = [P(1 - p_2)(p_1 - p_2)]^{-1}$

$$p_1 = -\frac{3}{4} + \left(\frac{9}{16} + \frac{1}{P}\right)^{1/2}, \quad p_2 = -\frac{3}{4} - \left(\frac{9}{16} + \frac{1}{P}\right)^{1/2} \quad \text{και} \quad A = 1/\left(1 - \frac{5}{2}P\right) \quad (\text{για } P \neq 2/5).$$



**Σχήμα 1.8:** Εγκάρσιο προφίλ ταχύτητας του κατά μήκος της ακτής ρεύματος για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης  $P$  (Longuet-Higgins, 1970b)

Από το προφίλ της ταχύτητας του ρεύματος και λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση ότι  $Q \sim V^4$ , προκύπτει η αντίστοιχη κατανομή της στερεομεταφοράς κατά πλάτος της ζώνης θραύσης. Η κατανομή της στερεομεταφοράς αποτελεί πολύ σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό ενός συστήματος προβόλων και λαμβάνεται υπόψη για τον καθορισμό του μήκους του πρώτου προβόλου, όπως αναφέρεται παρακάτω στην §3.3.2.

#### **1.4.2 Εγκάρσια στερεομεταφορά (cross-shore sediment transport)**

Η εγκάρσια στερεομεταφορά αναφέρεται στην μετακίνηση των ιζημάτων κάθετα στην ακτή και αποτελεί τη μια συνιστώσα που συμβάλλει στη διαμόρφωση του προφίλ μιας ακτής και του βάθους του νερού ή του έξαλου υψομέτρου των διαφόρων τμημάτων της παράκτιας ζώνης.

Η μεταφορά των φερτών υλών κάθετα στην ακτή οφείλεται στη δράση της παλίρροιας, του ανέμου και των κυμάτων, καθώς επίσης και στα εγκάρσια ρεύματα που παράγονται από αυτά. Ιζήματα τίθενται σε κίνηση από την κάθετη συνιστώσα της τροχιακής κινήσεως των υγρών σωματιδίων και στη συνέχεια μεταφέρονται από το κυματογενές ρεύμα. Έτσι δημιουργείται μια συνεχής κίνηση φερτών, είτε ως φορτίο πυθμένα είτε ως αιωρούμενο φορτίο.

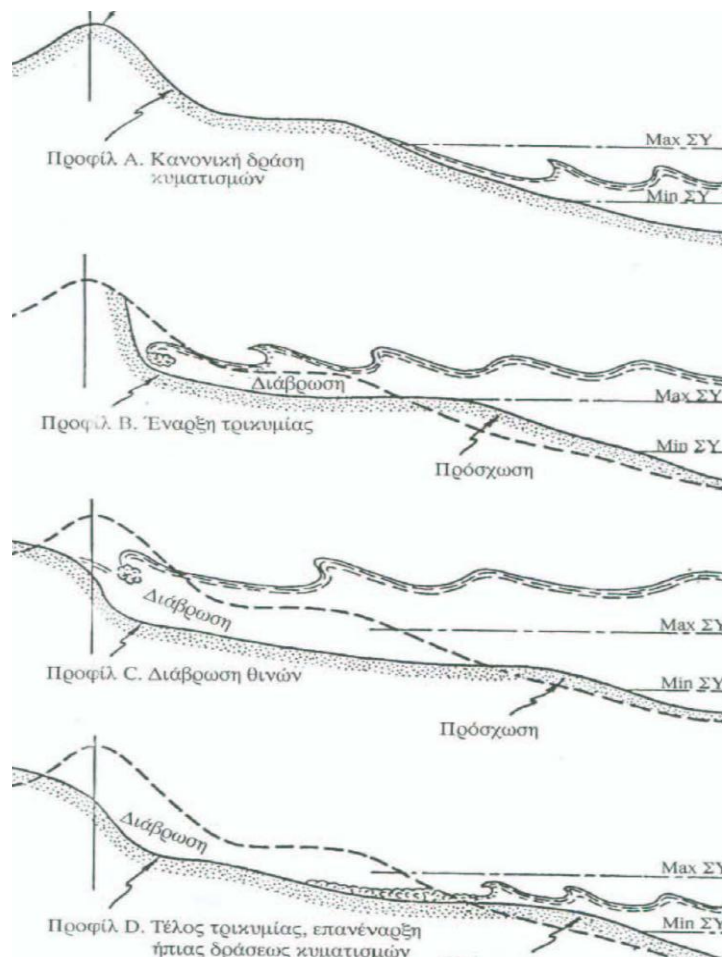
Υπό σταθερές κυματικές συνθήκες μια ακτή τείνει να δημιουργήσει μια κλίση ισορροπίας ώστε η καθαρή στερεομεταφορά να είναι μηδενική. Η κλίση ισορροπίας της ακτής αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος, ενώ για δεδομένο μέγεθος κόκκων μειώνεται όταν αυξάνεται η καμπυλότητα ( $H/L$ ) των κυματισμών.

Σε αντίθεση με την κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η εγκάρσια μεταφορά των ιζημάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές σε μια ακτή ακόμα και σε μικρό χρονικό διάστημα. Αποτέλεσμα της δράσης των κυματισμών και των ρευμάτων εγκάρσια στην ακτή καθώς και των εποχιακών μεταβολών στο κυματικό καθεστώς είναι η διαμόρφωση δύο διακεκριμένων προφίλ, του χειμερινού και του θερινού.

*Χειμερινό προφίλ:* Οι κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας ( $H_o/L_o$ ) διαβρώνουν μέρος του υλικού του μετώπου της ακτής και τμήματος του βυθού στη ζώνη θραύσης δημιουργώντας έναν επιμήκη ύφαλο παράλληλο στην ακτογραμμή. Ο ύφαλος αυτός προκαλεί θραύση των κυματισμών σε μεγαλύτερα βάθη, αποτελώντας έτσι ένα είδος προστασίας της ακτής. Η μεταφορά των φερτών γίνεται προς τα ανοιχτά οπότε το μέτωπο της ακτής μετακινείται προς την ξηρά και η ακτή τείνει να γίνει στενότερη με απότομη κλίση.

*Θερινό προφίλ:* Οι θερινοί κυματισμοί μικρής καμπυλότητας και ήπιας δράσης έχουν ως αποτέλεσμα η μεταφορά των ιζημάτων να γίνεται προς την ακτή εμπλουτίζοντάς την με κοκκώδες υλικό. Έτσι αυξάνεται το πλάτος της παραλίας και παράλληλα αποκτά ομαλότερη κλίση. Στο θερινό προφίλ δεν υπάρχουν επιμήκεις ύφαλοι καθώς υλικό από αυτούς μεταφέρεται και αποτίθεται στο έξαλο μέτωπο της ακτής.

Το τοπικό κυματικό κλίμα, το εύρος της παλίρροιας και το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος της ακτής επηρεάζουν τα εποχιακά προφίλ, αλλά οι μεταβολές που περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν άμεσο αποτέλεσμα της εγκάρσιας στερεομεταφοράς. Παρακάτω δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της αλλαγής της διατομής της ακτής μεταξύ θερινής και χειμερινής περιόδου.



**Σχήμα 1.9:** Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ ακτής ανάλογα με την καμπυλότητα του κύματος (Κουτίτας, 1998)

Η εγκάρσια στερεομεταφορά σχετίζεται με πλήθος προβλημάτων που αφορούν τον παράκτιο περιβάλλον όπως:

1. Η απόκριση της παραλίας και των αμμοθινών στις καταιγίδες
2. Η απόκριση της ακτογραμμής στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας
3. Οι εποχιακές μεταβολές της ακτογραμμής
4. Η ροή των ιζημάτων γύρω από τα παράκτια τεχνικά έργα
5. Τα έργα αναπλήρωσης μιας ακτής

Η πλήρης κατανόηση της εγκάρσιας στερεομεταφοράς περιπλέκεται από τη συνεισφορά των φορτίων πυθμένα και αιωρήσεως. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο στοιχείων εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, την κυματική ενέργεια, την ταχύτητα της ροής μεταφοράς και τη μορφή του πυθμένα.

#### 1.4.2.1 Υπολογισμός Εγκάρσιας Στερεοπαροχής

Η μεταφορά μάζας προς την ακτή συμβαίνει κυρίως μεταξύ κορυφής και κοιλιάς των κυματισμών. Η μετακίνηση των ιζημάτων προς τα ανοιχτά οφείλεται στην μετακίνηση και επαναφορά του νερού από την ακτή προς το εσωτερικό της θάλασσας, που προκαλείται από τη θραύση των κυματισμών. Ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη αυτό τον μηχανισμό είναι δυνατό να περιγράψει την τοπική στερεομεταφορά και την μεταβολή του πυθμένα μιας ακτής υπό τη δράση τυχαίων κυματισμών.

Η καθαρή στερεομεταφορά εγκάρσια σε μια ακτή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Stive & Battjes, 1984)

$$\overline{q(x)} = \int_a u(x, z, t) c(x, z, t) dz \quad (1.8)$$

όπου  $u(x, z, t)$  το πεδίο των οριζόντιων ταχυτήτων,  $c(x, z, t)$  η συγκέντρωση του ιζήματος και  $d$  το βάθος.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να απλουστευθεί λαμβάνοντας υπόψη τις εξής παρατηρήσεις και παραδοχές:

- το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου των ιζημάτων,  $s = \int_a c \cdot dz$ , βρίσκεται κοντά στον πυθμένα και έτσι προσδιορίζεται σε τοπικό επίπεδο.
- στην περιοχή κοντά στον πυθμένα το πεδίο των οριζόντιων ταχυτήτων ( $u$ ) είναι ομοιόμορφο με το βάθος.

Εισάγοντας τις συνιστώσες της μέσης τιμής και της απόκλισης του φορτίου των ιζημάτων και της οριζόντιας ταχύτητας κοντά στον πυθμένα, δηλαδή  $s = \bar{s} + s'$  και  $u = \bar{u} + u'$ , η σχέση της καθαρής εγκάρσιας στερεομεταφοράς γίνεται

$$\bar{q} = \overline{u \cdot s} = \bar{u} \cdot \bar{s} + \overline{u' \cdot s'} \quad (1.9)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να απλουστευθεί, για ευκολότερη επίλυση του προβλήματος, κάνοντας δύο ακόμα παραδοχές:

- η συνεισφορά των όρων της διακύμανσης θεωρείται αμελητέα καθώς οι τιμές τους είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές ( $\overline{u' \cdot s'} \ll \bar{u} \cdot \bar{s}$ )
- η μέση ταχύτητα ροής κοντά στον πυθμένα, με κατεύθυνση προς την ανοιχτή θάλασσα, που προκαλείται από τη θραύση των κυματισμών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που προκαλείται από μη θραυόμενο κυματισμό ίδιου ύψους ( $\overline{u_{br}} \gg \overline{u_{nonbr}}$ )

Τελικά η καθαρή στερεομεταφορά στη ζώνη θραύσης (με φορά προς τα ανοιχτά) υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\bar{q}_c = \overline{u_{br}} \cdot \bar{s} \quad (1.10)$$

Η ταχύτητα της ροής (return flow) σε ένα πεδίο θραυόμενων τυχαίων κυματισμών ( $\overline{u_{br}}$ ) ορίζεται από τον τύπο

$$\overline{u_{br}} = 0.125 \cdot \sqrt{g/d} \cdot H_b \cdot \tilde{Q}_b \quad (1.11)$$

όπου  $\tilde{Q}_b = 20 \left( \frac{H_{rms}}{d} \right)^5$  το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών σε ένα βάθος  $d$  (m),  $H_{rms}$  η μέση τετραγωνική τιμή των υψών κύματος του φάσματος (m) και  $H_b$  το βάθος θραύσης (m). Το μέσο φορτίο ιζημάτων ( $\bar{s}$ ) περιορίζεται κυρίως σε ένα στρώμα κοντά στον πυθμένα και ορίζεται ως

$$\bar{s} = C_o l_1 \quad (1.12)$$

όπου

$C_o = 0.028 \cdot (\theta' - 0.05) \cdot (2/\pi) \cdot \cos^{-1} \left( \frac{0.05}{\theta'} \right)^{1/2}$  η συγκέντρωση αναφοράς στον πυθμένα

$l_1^{-1} = w / \varepsilon$  η κλίση της σχετικής συγκέντρωσης ( $m^{-1}$ )

$\theta' = \frac{f_w u_{rms}^2}{g'D}$  η παράμετρος του Shields

$f_w = \exp \left[ 5.2 \left( \frac{2.5D}{a} \right)^{0.2} - 6 \right]$  ο συντελεστής τριβών

$u_{rms} = 0.5 \cdot H_{rms} \cdot \sqrt{g/d}$  η τροχιακή ταχύτητα (m/s)

$a = a_{rms} = 0.5 \cdot H_{rms} \cdot \sqrt{g/d} \cdot (2\pi f_p)^{-1}$  το πλάτος της τροχιάς των υγρών μορίων (m)

$g' = \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g$  η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )

$w = g^{0.7} \cdot \frac{D^{1.1}}{6\nu^{0.4}}$  για  $39 < g' \cdot \frac{D^3}{\nu^2} < 10^4$  (m/s) η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων του ιζήματος (Κουτίτας, 1998)

$\varepsilon = 0.35 \cdot 10^{-3} (a \cdot \frac{\omega}{w})^{0.68} gT(\xi + 0.4\delta)$  ο συντελεστής τυρβώδους ιξώδους ( $m^2/s$ )

$\delta = 0.072a(\frac{2.5D}{a})^{0.25}$  το πάχος της οριακής στιβάδας (m)

$\xi = 21 \cdot a \cdot \psi^{-1.85}$  για  $\psi = \frac{u_{rms}^2}{g'D} > 10$  και  $\xi = 0.3 \cdot a$  για  $\psi < 10$

$\rho_s, \rho_w$  οι πυκνότητες του ιζήματος και του νερού αντίστοιχα ( $kg/m^3$ )

$D$  η χαρακτηριστική διάμετρος των κόκκων (m)

$f_p$  η συχνότητα της κορυφής του φάσματος ( $s^{-1}$ )

$T$  η περίοδος του φάσματος (s)

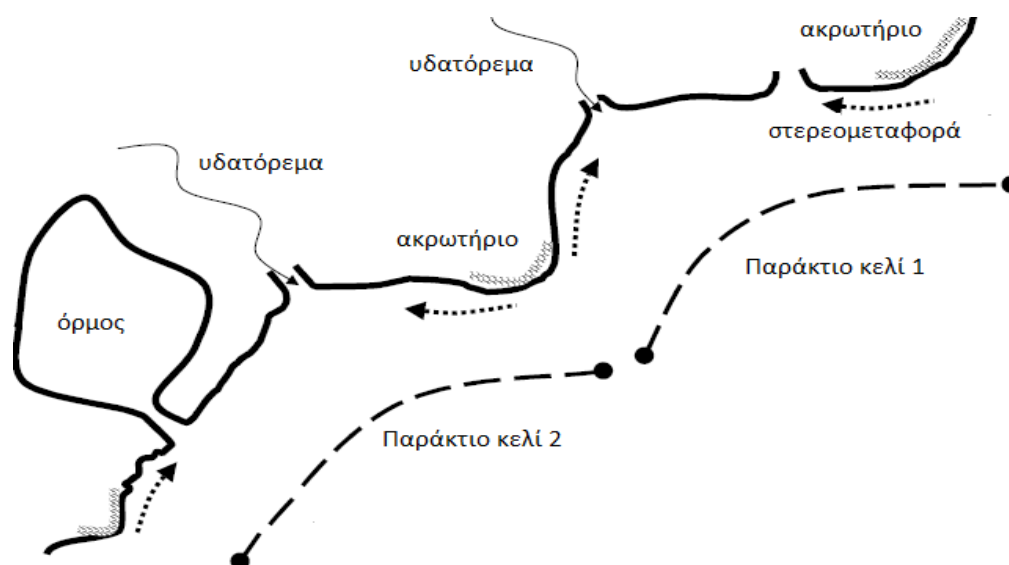
$\omega = 2\pi/T$  η γωνιακή συχνότητα (rad/s)

$\nu=10^{-6} m^2/s$  το κινηματικό ιξώδες του νερού

$g=9.81 m/s^2$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

### 1.5 Παράκτιο κελί (coastal cell) – Ισοζύγιο μεταφοράς φερτών υλών

Ως παράκτιο κελί ορίζεται ένα αυτόνομο τμήμα της ακτής, όπου το ισοζύγιο φερτών υλών είναι μηδενικό και εξελίσσεται λόγω στερεομεταφοράς ανεξάρτητα από την υπόλοιπη ακτή (Σχ.1.10). Σε κάθε τέτοιο τμήμα είναι δυνατό να υπάρχουν παγίδες αλλά και πηγές ιζημάτων.



Σχήμα 1.10: Παράκτιο κελί (Coastal cell) (USACE, 2006)



Οι κυριότερες παγίδες φερτών υλών είναι τα παλιρροιακά στόμια, όπου οι προς την ακτή στερεοπαροχές κατά την πλήμμη είναι μεγαλύτερες από αυτές προς την ανοιχτή θάλασσα κατά την άμπωτη. Επίσης, ιζήματα παγιδεύονται στα υφαλοπρανή και στα υποβρύχια φαράγγια. Σημαντικές παγίδες φερτών αποτελούν και τα παράκτια τεχνικά έργα. Τέλος, οι αμμοληψίες αφαιρούν ιζήματα από την ακτή και τα έργα αντιδιαβρωτικής και αντιπλημμυρικής προστασίας χερσαίων περιοχών στερούν τις ακτές από μεγάλες παροχές φερτών.

Κυριότερες πηγές φερτών υλών είναι τα υδατορρέματα, τα οποία μεταφέρουν υλικά που προέρχονται από τη διάβρωση χερσαίων εκτάσεων γης. Τα πλέον χοντρόκοκκα ιζήματα παραμένουν στις ακτές, ενώ τα υπόλοιπα καθιζάνουν σε μεγαλύτερα βάθη. Η διάβρωση γαιωδών όγκων σε ακτές αποτελεί μια δεύτερη πηγή ιζήματος. Τέλος, η μεταφορά κόκκων από τους ανέμους, η βιογενής απόθεση από κελύφη νεκρών θαλάσσιων οργανισμών και η τεχνητή τροφοδοσία ακτών είναι συμπληρωματικές πηγές ιζήματος.

Η μελέτη των διεργασιών που συμβαίνουν σε ένα παράκτιο κελί είναι πολύ σημαντική ώστε να γίνει σωστή χωροθέτηση των έργων προστασίας της ακτής, σε μια συγκεκριμένη περιοχή, και να αποφευχθεί πιθανή αστοχία. Πρέπει να εντοπισθούν οι παγίδες και οι πηγές των ιζημάτων, να εξεταστεί η επίδραση των υδροδυναμικών συνθηκών και να γίνει εκτίμηση της στερεομεταφοράς και του ισοζυγίου των φερτών (Kamphuis, 2000). Για να γίνει ποσοτική ανάλυση του ισοζυγίου φερτών υλών, κατά τη διάρκεια του έτους κατά μήκος μιας ακτής, χωρίζεται η ακτή σε τμήματα και υπολογίζεται το αλγεβρικό άθροισμα των στερεοπαροχών προς τα δεξιά και προς τα αριστερά. Στα τμήματα όπου εμφανίζεται έλλειμμα αναμένεται διάβρωση της ακτογραμμής, ενώ στα τμήματα με περίσσειμα πρόσχωση.



## Κεφάλαιο 2. Έργα Προστασίας της Ακτής – Πρόβολοι

### 2.1 Εισαγωγή

Η απαίτηση του ανθρώπου για σταθερό πλάτος ακτής τον έχει οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις στη λήψη μέτρων ή/και στην κατασκευή παράκτιων τεχνικών έργων με σκοπό την αντιμετώπιση της διάβρωσης της ακτογραμμής. Οι παρεμβάσεις που γίνονται γι' αυτόν το σκοπό χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που περιλαμβάνουν κυρίως διεργασίες και σε αυτές που περιλαμβάνουν τεχνικά έργα.

Στην *πρώτη κατηγορία* λαμβάνονται μέτρα (κανονιστικές διατάξεις και απαγορεύσεις) που δεν έχουν ως στόχο την πρόληψη ή τη διακοπή της διάβρωσης, αλλά τον περιορισμό των επιπτώσεών της.

Η *δεύτερη κατηγορία* αφορά τα παράκτια τεχνικά έργα τα οποία χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τις *συμβατικές* και τις *ήπιες* κατασκευές, ανάλογα με τις επιπτώσεις που προκαλούν στο περιβάλλον. Επίσης, τα έργα προστασίας της ακτής κατατάσσονται ανάλογα με τον προσανατολισμό του διαμήκους άξονά τους και την απόστασή τους από την ακτογραμμή στις παρακάτω κατηγορίες:

- Θωράκιση μετώπου ακτής ή έργα στην ακτογραμμή
- Έργα παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα σε απόσταση από την ακτογραμμή (κυματοθραύστες)
- Έργα κάθετα ή σχεδόν κάθετα ή υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή (πρόβολοι)
- Αναπλήρωση παράκτιας ζώνης

Τα έργα θωράκισης του μετώπου της ακτής, οι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι ανήκουν στην κατηγορία των συμβατικών κατασκευών. Τα έργα αναπλήρωσης της ακτής, καθώς επίσης και οι ύφαλες κατασκευές, όπως οι ύφαλοι κυματοθραύστες χαρακτηρίζονται ως ήπια έργα προστασίας της ακτής αφού ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

Η επιλογή και ο σχεδιασμός των παράκτιων κατασκευών εξαρτάται από φυσικά κριτήρια σχεδιασμού, όπως ο μηχανισμός διάβρωσης, το υδροδυναμικό και κυματικό καθεστώς, ο τύπος της ακτής και των ιζημάτων, καθώς επίσης και από περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

## 2.2 Πρόβολοι

Η παρουσία των παράκτιων τεχνικών έργων στο φυσικό χώρο έχει ως αποτέλεσμα την αναμόρφωση των κυματικών δεδομένων, με την προκαλούμενη διάθλαση, ανάκλαση, περίθλαση και θραύση, σε περιοχές όπου δε συνέβαινε πριν, αλλά και μεταβολή της μορφολογίας του φυσικού περιβάλλοντος καθώς τα έργα παρεμβαίνουν στη ζώνη θραύσης και μεταβάλλουν την παράκτια στερεομεταφορά. Ο τρόπος με τον οποίο τα έργα παρεμβαίνουν στις υδροδυναμικές συνθήκες και κατ' επέκταση στη στερεομεταφορά και την εξέλιξη της ακτογραμμής εξαρτάται από τον τύπο, το μέγεθος και τη θέση της κατασκευής.

Το έργο προστασίας της ακτής του οποίου ο διαμήκης άξονας είναι κάθετος ή σχεδόν κάθετος στην ακτογραμμή και συνδέεται με αυτή ονομάζεται πρόβολος. Οι πρόβολοι είναι το παλαιότερο και πιο διαδεδομένο έργο σταθεροποίησης της ακτής. Η κατασκευή προβόλων έχει ως κύριο στόχο τον έλεγχο της στερεοπαροχής για την προστασία της ακτής από διάβρωση και την συσσώρευση ιζήματος για τη διατήρηση ενός ελάχιστου πλάτους ακτής. Το προστατευόμενο μήκος της ακτογραμμής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μήκος του προβόλου και τη γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών. Σε ακτές μεγάλου μήκους δεν επαρκεί μόνο ένας πρόβολος και για το λόγο αυτό συνηθίζεται να κατασκευάζεται ένα σύστημα προβόλων, όχι απαραίτητα σταθερών χαρακτηριστικών (π.χ. μεταβλητού μήκους), το οποίο καλύπτει το μήκος της υπό προστασία ακτής.

Ο πρόβολος επηρεάζει την ενέργεια που κινείται κατά μήκος της ακτής και επιδρά στο φορτίο των ιζημάτων που μεταφέρεται είτε σε αιώρηση είτε στον πυθμένα. Επομένως, σημαντικά σημεία σχεδιασμού ενός προβόλου ή συστήματος προβόλων είναι η ενέργεια κατά μήκος της ακτής, το ίζημα της περιοχής, η στερεοπαροχή κατά μήκος και εγκάρσια στην ακτογραμμή.

Ο πρόβολος αποτελεί ένα εμπόδιο στην κίνηση των ιζημάτων κατά μήκος της ακτής και η μορφή της ακτογραμμής προσαρμόζεται στην παρουσία αυτού του εμποδίου. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα παρατηρείται απόθεση ιζήματος ανάντη του έργου, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του πλάτους της ακτής ενώ παράλληλα εμφανίζεται διάβρωση κατάντη. Ο έλεγχος της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η νέα ακτογραμμή να είναι ομαλή με όσο το δυνατόν ομοιόμορφο πλάτος. Έτσι κάποια ποσότητα ιζήματος πρέπει να περνάει κατάντη της κατασκευής. Αυτό επιτυγχάνεται:

1. επιλέγοντας το κατάλληλο μήκος προβόλου σε σχέση με το οριακό βάθος ώστε το ίζημα να περνά γύρω από το άκρο του στα κατάντη (by-passing). Ως οριακό βάθος ορίζεται το βάθος του νερού το οποίο σηματοδοτεί το όριο της στερεομεταφοράς, με τιμή (1.6-

- 2.0) Η<sub>s</sub> κάτω από την κατώτατη στάθμη. Όταν το άκρο ενός προβόλου φθάνει σε βάθος μεγαλύτερο από το οριακό τότε δεν περνά καθόλου ίζημα γύρω από αυτό. Όσο αυξάνεται η απόσταση του προβόλου από το οριακό βάθος τόσο αυξάνεται και το αντίστοιχο ποσοστό του ιζήματος.
2. κατασκευάζοντας τον πρόβολο διαπερατό ώστε να περνά κάποια ποσότητα μέσα από την κατασκευή (through-passing).
  3. προσαρμόζοντας την στάθμη της στέψης κατά μήκος του έργου ώστε να περνά ένα ποσοστό πάνω από την κατασκευή (over-passing). Πειράματα έχουν δείξει ότι δεν μπορεί να εφαρμοσθεί μείωση της στάθμης της στέψης κατά μήκος της ζώνης θραύσης καθώς μπορεί να προκληθεί, ανάλογα με τη δίαιτα της παλίρροιας, ανεξέλεγκτη απώλεια ιζήματος.

Η επιλογή συστήματος προβόλων για την προστασία ακτής από διάβρωση απαιτεί προσεκτική προκαταρκτική έρευνα καθώς η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγάλη. Έτσι πριν από την επιλογή και το σχεδιασμό του έργου σημαντικά κρίνονται ο προσδιορισμός του μηχανισμού διάβρωσης, η εκτίμηση της στερεομεταφοράς και του ισοζυγίου των φερτών και η πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων που θα έχει στην ακτή. Πολλές φορές ανεπαρκής σχεδιασμός των προβόλων, εξαιτίας της έλλειψης κατανόησης της λειτουργίας των κατασκευών αυτών, έχει οδηγήσει σε αστοχία και ανεξέλεγκτη παραμόρφωση της παράκτιας ζώνης. Μορφές αστοχίας στην περίπτωση αυτών των έργων θεωρούνται η συγκράτηση ανεπαρκούς ποσότητας ιζήματος, εντονότερη διάβρωση κατάντη και δημιουργία ακτής ανομοιόμορφου πλάτους. Γενικά θεωρείται ότι το χρονικό διάστημα του ενός έτους είναι ενδεικτικό για το κατά πόσο το έργο επέφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα στη διαμόρφωση της νέας ακτογραμμής.

Ικανοποιητική στερεοπαροχή και ύπαρξη στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής είναι βασικά στοιχεία για να λειτουργούν αποτελεσματικά οι πρόβολοι. Σημαντικό για την επιλογή ενός συστήματος προβόλων ως έργου προστασίας μιας ακτής είναι να υπερισχύει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά της εγκάρσιας. Οι πρόβολοι κατασκευάζονται σε περιοχές όπου οι απώλειες ιζήματος οφείλονται στην παράλληλη προς την ακτή στερεομεταφορά. Επίσης, είναι το πλέον κατάλληλο έργο όταν υπάρχει μικρή καθαρή στερεοπαροχή, αλλά μεγάλη αθροιστική (Reeve et al., 2004). Από την καθαρή στερεοπαροχή εξαρτάται ο ρυθμός πρόσχωσης και διάβρωσης της ακτής ανάντη και κατάντη του προβόλου αντίστοιχα. Σε περιοχές όπου η καθαρή στερεοπαροχή είναι μεγάλη ή σε περιοχές όπου η στερεομεταφορά γίνεται κυρίως προς μια κατεύθυνση, οι ρυθμοί πρόσχωσης και διάβρωσης θα είναι υψηλοί.

Από την άλλη, για να αποφευχθεί η αστοχία, δεν πρέπει να επιλέγεται η κατασκευή τέτοιων έργων σε περιπτώσεις όπου:

1. η εγκάρσια στερεομεταφορά υπερισχύει της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς,
2. δημιουργούνται πολύ ισχυρά ρεύματα διαφυγής, τα οποία αποτελούν κίνδυνο για τους λουόμενους,
3. το μεγάλο εύρος παλίρροιας επιτρέπει μεγάλη ποσότητα ιζήματος να περάσει από το άκρο του προβόλου (bypassing) στην περίπτωση της ρηχίας και πάνω από την κατασκευή (overpassing) στην περίπτωση της πλήμμης.

Επιπλέον πρέπει να αποφεύγεται η κατασκευή προβόλων αδιαπέρατων ή/και πολύ μεγάλου μήκους, καθώς προκαλούν τη διαφυγή του ιζήματος προς τα ανοιχτά και διάβρωση κατάντη. Σήμερα εμφανίζεται η τάση να κατασκευάζονται πρόβολοι που επιτρέπουν σε ένα ποσοστό ιζήματος να περάσει κατάντη του έργου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επίσης πολλές φορές οι κατασκευές αυτές συνδυάζονται με έργα αναπλήρωσης ακτής και έχουν ως στόχο τη συγκράτηση του δανείου υλικού που τοποθετείται στην ακτή.

### **2.2.1 Λειτουργία προβόλων**

Οι κυματισμοί που θραύονται υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή δημιουργούν ένα ρεύμα παράλληλο προς αυτή. Τα ιζήματα διαταράσσονται και τίθενται σε αιώρηση από τα θραυόμενα κύματα και μετακινούνται από το παράκτιο κυματογενές ρεύμα κατά μήκος της ακτής. Ο πρόβολος αποτελεί ένα εμπόδιο στη στερεομεταφορά παράλληλα προς την ακτογραμμή, που υπό ασθενείς και μέτριες κυματικές συνθήκες διαχέει μέρος της κυματικής ενέργειας προκαλώντας συσσώρευση του ιζήματος στην ανάντη πλευρά της κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του προσανατολισμού της ακτογραμμής και τη μείωση της γωνίας μεταξύ αυτής και της διεύθυνσης των επικρατούντων κυματισμών, καθώς η ακτογραμμή τείνει να γίνει παράλληλη με αυτούς. Η νέα ακτογραμμή διαμορφώνεται έτσι ώστε να είναι κάθετη στις ορθογωνικές των προσπιπτόντων θραυόμενων κυματισμών με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού της καθαρής στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής (οι στερεοπαροχές προς τις δύο αντίθετες κατευθύνσεις τείνουν να έρθουν σε ισορροπία), τον περιορισμό της απομάκρυνσης του ιζήματος και την απόθεση και/ή την ανακατανομή του ιζήματος ανάντη του προβόλου. Η αποτελεσματικότητα των προβόλων εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της αρχικής και της νέας ακτογραμμής, που δίνει μηδενική στερεομεταφορά. Εάν η γωνία αυτή είναι μικρή τότε το σύστημα είναι αποτελεσματικό, ενώ όταν είναι μεγάλη,

δηλαδή στην περίπτωση πολύ λοξής πρόσπτωσης των κυματισμών, το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό.

Για μια πρώτη εκτίμηση της μεταβολής του ρυθμού της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς, που μπορεί δυνητικά να προκαλέσει ένα σύστημα προβόλων, μπορεί να θεωρηθεί ότι η στερεοπαροχή είναι ανάλογη του ημιτόνου της διπλάσιας γωνίας μεταξύ της ακτογραμμής και των κυματισμών στη γραμμή θραύσης. Έτσι ο λόγος των στερεοπαροχών με και χωρίς το σύστημα των προβόλων ( $Q_g$  και  $Q_o$  αντίστοιχα) δίνεται από τη σχέση (Reeve et al., 2004)

$$\frac{Q_g}{Q_o} = \frac{\sin 2(\alpha_o - \alpha_g)}{\sin 2\alpha_o} \approx \frac{(\alpha_o - \alpha_g)}{\alpha_o} \quad (2.1)$$

όπου  $\alpha_o$  η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών σε μια ακτή χωρίς προβόλους και  $\alpha_g$  η μεταβολή της γωνίας (ως προς τη νέα ακτογραμμή) εξαιτίας της παρουσίας των κατασκευών.

Στην κατάντη πλευρά του έργου παρατηρείται διάβρωση, καθώς η ποσότητα του ιζήματος που περνά περιορίζεται σημαντικά. Τα αποτελέσματα της παρουσίας του προβόλου ή ενός συστήματος προβόλων στην παράκτια ζώνη είναι εμφανή τόσο ανάντη όσο και κατάντη αυτού. Το ποσοστό συσσώρευσης και διάβρωσης εξαρτάται από το ρυθμό στερεομεταφοράς στην περιοχή. Μετά την έναρξη παρακάμψεως του προβόλου, δηλαδή μετά την πλήρωσή του στα ανάντη από το ίζημα, η ζώνη διαβρώσεως αρχίζει να προσχώνεται και η ακτογραμμή επεκτείνεται προς τη θάλασσα ως μια νέα θέση ισορροπίας.

Κατά τη διάρκεια καταιγίδας, κυρίως όταν οι κυματισμοί προσπίπτουν κάθετα στην ακτή, ο ρόλος ενός προβόλου περιορίζεται καθώς τα ιζήματα παρασύρονται προς τα ανοιχτά. Η αποτελεσματικότητα της κατασκευής όσον αφορά την προστασία της ακτής περιορίζεται καθώς δεν συνεισφέρει στη μείωση της κυματικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση οι πρόβολοι συμπεριφέρονται ως κατασκευές μικρού μήκους (σε σχέση με το πλάτος της ζώνης θραύσης (καθώς κύματα μεγάλου ύψους θραύονται σε βαθύτερα νερά και αυξάνεται έτσι το πλάτος της ζώνης θραύσης) και εμφανίζεται διάβρωση γύρω από αυτούς.

Η απόκριση της ακτογραμμής (διάβρωση/επέκταση) εξαρτάται από πολλές παραμέτρους οι οποίες ταξινομούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες, που αφορούν την κατασκευή, την ακτή και το κυματικό καθεστώς, και αναφέρονται στον Πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1: Παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η απόκριση της ακτογραμμής (USACE, 2006)**

Πρόβολος	Ακτή και Ίζημα	Κύματα, Άνεμος, Παλίρροια
Μήκος	Βάθος στο άκρο του προβόλου	Ύψος κυματισμών
Στέψη	Οριακό βάθος	Περίοδος κυματισμών
Διαπερατότητα	Δαθεσιμότητα ιζήματος	Γωνία πρόσπτωσης κυματισμών
Σχήμα	Μέσος μέγεθος κόκκου	Εύρος παλίρροιας
Γωνία με την Ακτογραμμή	Πυκνότητα ιζήματος	Ταχύτητα ανέμου
Απόσταση μεταξύ προβόλων		Διάρκεια ανέμου
Κατά μήκος κλίση		Κατεύθυνση ανέμου

### **2.2.2 Βασικές αρχές σχεδιασμού**

Σημαντικές παράμετροι που πρέπει να προσδιορισθούν κατά το σχεδιασμό ενός προβόλου ή ενός συστήματος προβόλων είναι το μήκος, το ύψος της στέψης του, το σχήμα και ο προσανατολισμός του, η μεταξύ τους απόσταση (σε ένα σύστημα) και τέλος το υλικό κατασκευής. Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού που συνδέονται άμεσα με τις παραμέτρους απόκρισης της ακτογραμμής και την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος προβόλων.

- Μήκος Προβόλου

Το μήκος του προβόλου, το οποίο σχετίζεται με το μέσο πλάτος της ζώνης θραύσης, ορίζει το βάθος στο άκρο του και ως εκ τούτου την ποσότητα του ιζήματος που παρακάμπτει την κατασκευή. Όσο αυξάνεται το μήκος, αυξάνεται η ποσότητα του ιζήματος που συγκρατείται ανάντη και η επίδρασή του προβόλου στην ακτογραμμή, όσον αφορά τη χρονική εξέλιξή της. Όταν αυξάνεται η γωνία μεταξύ των προσπιπτόντων κυματισμών και της ακτογραμμής αυξάνεται το ενεργό μήκος των προβόλων. Από το μήκος ενός προβόλου εξαρτάται η απόσταση στην οποία εκτείνεται η επίδραση της κατασκευής στην ακτογραμμή (διάβρωση/πρόσχωση). Η απόσταση αυτή μπορεί να είναι ακόμα και δεκαπλάσια του μήκους.



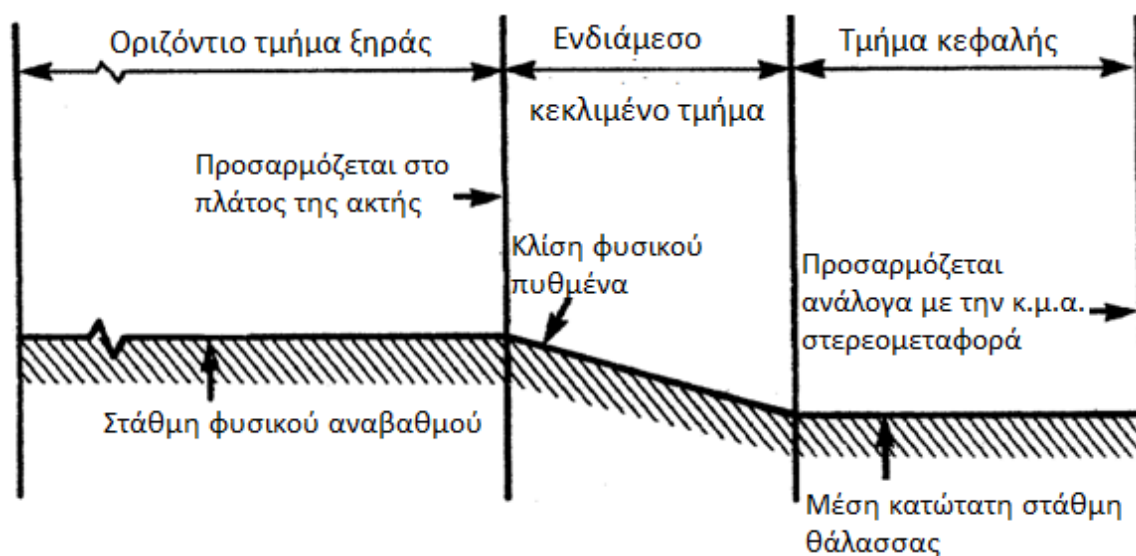
Παλαιότερα μια από τις βασικές αρχές στο σχεδιασμό των προβόλων ήταν να φθάνουν τουλάχιστον μέχρι τη γραμμή θραύσης, παγιδεύοντας σημαντικές ποσότητες ιζημάτων. Σήμερα συνιστάται οι πρόβολοι να σχεδιάζονται έτσι ώστε να μην παγιδεύουν ολόκληρη την ποσότητα των ιζημάτων που κινούνται κατά μήκος της ακτής, να διατηρείται κάποιο ισοζύγιο και να περιορίζεται η διάβρωση κατάντη του έργου. Μετά από έρευνες και παρατηρήσεις προτείνεται το μήκος ενός προβόλου στη θάλασσα να μην ξεπερνά το 40÷50% του πλάτους της ζώνης θραύσης σε περίπτωση κυματικής καταγίδας. Το μήκος του χερσαίου τμήματος του προβόλου πρέπει να είναι επαρκές ώστε να επιτυγχάνεται αγκύρωση του έργου και να αποφεύγεται η διάβρωση του, ιδιαίτερα στα κατάντη.

- Στάθμη Στέψης

Η επιλογή του ύψους της στέψης ενός προβόλου βασίζεται σε διάφορους παράγοντες όπως ο έλεγχος της κίνησης των ιζημάτων πάνω από την κατασκευή, η ανάκλαση των κυματισμών, ο βαθμός προστασίας της ακτής κατάντη του έργου και η ελαχιστοποίηση του όγκο των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή.

Ένας πρόβολος του οποίου η στέψη βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη ηρεμίας της θάλασσας χαρακτηρίζεται υψηλός, ενώ στην αντίθετη περίπτωση χαρακτηρίζεται χαμηλός. Η στέψη ενός υψηλού προβόλου είναι οριζόντια, εκτός από το τμήμα της ξηράς το οποίο μπορεί να είναι κεκλιμένο. Σε ένα τυπικό χαμηλό πρόβολο διακρίνονται το τμήμα ξηράς, το ενδιάμεσο κεκλιμένο τμήμα και το οριζόντιο τμήμα κεφαλής. Γενικά το άκρο του τμήματος της ξηράς διαμορφώνεται στη στάθμη του έξαλου φυσικού αναβαθμού (berm) και το κεκλιμένο τμήμα προσαρμόζεται στην κλίση του μετώπου της ακτής στη ζώνη διαβροχής. Τέλος το τμήμα κεφαλής διαμορφώνεται σε χαμηλότερη στάθμη, όπως η μέση κατώτατη στάθμη θάλασσας (MLW), ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά ιζημάτων κατά μήκος της ακτής πάνω από την κατασκευή. Μια χαμηλή στέψη επιτρέπει στα κύματα να μεταφέρουν κάποια ποσότητα των φερτών πάνω από την κατασκευή και μειώνει τις ανακλάσεις των κυματισμών από τον πρόβολο.

Οι περισσότεροι πρόβολοι έχουν κατασκευαστεί με σταθερή στάθμη στέψης κατά το διαμήκη άξονά τους, προκαλώντας έτσι αύξηση των απωλειών των ιζημάτων προς την ανοιχτή θάλασσα.



*Σχήμα 2.1: Τυπική μηκοτομή προβόλου με ενδιάμεσο κεκλιμένο τμήμα (USACE, 2006)*

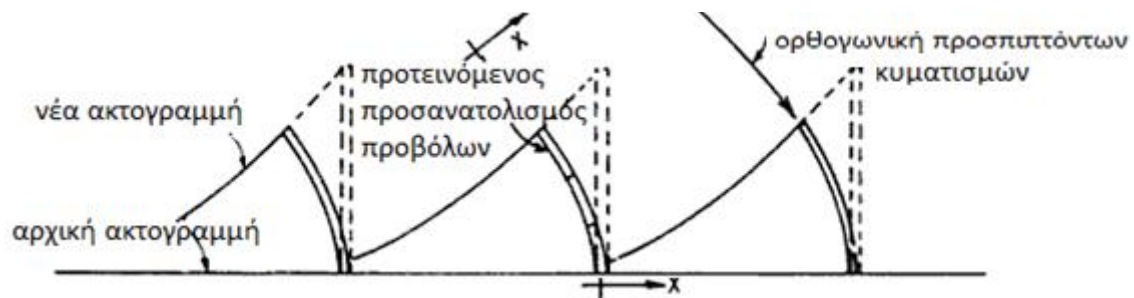
- Προσανατολισμός προβόλου – Σχήμα προβόλου

Ο προσανατολισμός ενός προβόλου είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών στην ακτή. Συνήθως οι πρόβολοι κατασκευάζονται ευθείς με τον διαμήκη άξονα τους κάθετο στην ακτογραμμή. Μπορεί όμως να κατασκευαστούν και πρόβολοι με καμπύλο άξονα, ο οποίος ξεκινά κάθετα στην ακτογραμμή και καταλήγει παράλληλα στις ορθογωνικές των προσπιπτόντων κυματισμών, δηλαδή το τμήμα της κεφαλής κάθε προβόλου είναι κάθετο στη νέα ακτογραμμή. Σε αυτή την περίπτωση ο όγκος του ιζήματος που συγκρατείται ανάντη των κατασκευών είναι ελαφρώς μικρότερος από τη συνήθη περίπτωση των ευθύγραμμων προβόλων που κατασκευάζονται κάθετα στη ακτογραμμή, αλλά θεωρείται ότι ελέγχουν πολύ αποτελεσματικά την κίνηση των ιζημάτων. Επιπλέον, περιορίζεται η δημιουργία ρευμάτων διαφυγής στην ανάντη πλευρά των κατασκευών.

Όταν οι πρόβολοι κατασκευάζονται με τον άξονά τους παράλληλο στη διεύθυνση των μέγιστων κυμάτων καταιγίδας μειώνονται οι καταστροφές που προκαλούνται σε αυτούς κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Στην πράξη, συνήθως μια τέτοια κατασκευή δεν είναι δυνατή καθώς η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών στις περισσότερες ακτές είναι μεταβλητή και η παράλληλη στερεομεταφορά συμβαίνει και προς τις δύο κατευθύνσεις.

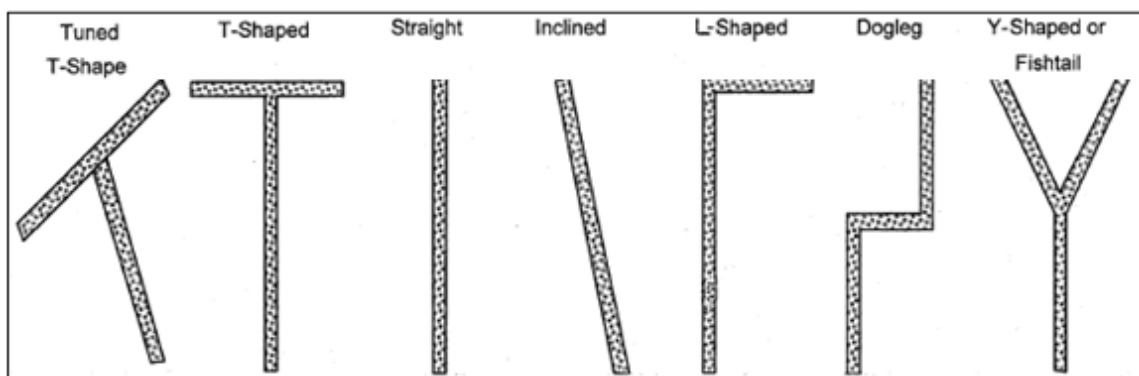
Γενικά λοιπόν, προτιμάται η κατασκευή προβόλων κάθετων στην ακτογραμμή για οικονομικούς λόγους αλλά και επειδή η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών σε μια ακτή συνήθως είναι μεταβλητή. Η κατασκευή προβόλων με καμπύλο άξονα συνιστάται σε

περιπτώσεις όπου αναμένεται σημαντική μεταβολή της ακτογραμμής και όταν η στερεομεταφορά συμβαίνει προς μια μόνο κατεύθυνση.



Σχήμα 2.2: Σύστημα καμπύλων προβόλων (Silvester and Hsu, 1997)

Οι πρόβολοι εκτός από ευθείς, που κατασκευάζονται στις περισσότερες περιπτώσεις, μπορούν να σχεδιαστούν σε σχήμα «Τ», «Γ» ή «Υ». Στις δύο πρώτες περιπτώσεις το τμήμα της κατασκευής που είναι παράλληλο στην ακτή λειτουργεί ως κυματοθραύστης, ανακόπτοντας ένα μέρος της κυματικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τη στερεομεταφορά προς την ανοιχτή θάλασσα, η οποία προκαλείται από τα ρεύματα διαφυγής. Ο πρόβολος σχήματος «Υ» κατασκευάζεται σε περιοχές όπου δεν υπάρχει μια επικρατούσα διεύθυνση της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής, και λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμα και όταν αλλάζει η διεύθυνση των προσπιπτόντων κυματισμών.



Σχήμα 2.3: Πιθανά σχήματα προβόλων (USACE, 2006)

- Διαπερατότητα

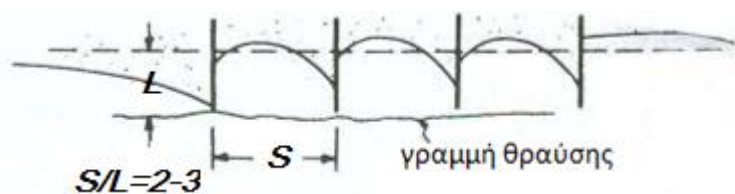
Η αποτελεσματικότητα των προβόλων εξαρτάται επίσης από τη διαπερατότητά τους. Όταν αυξάνεται η διαπερατότητα της κατασκευής μειώνεται η επίδραση της στην ακτογραμμή καθώς μειώνεται ο βαθμός συσσώρευσης ιζήματος στα ανάντη και η πιθανότητα

διάβρωσης της ακτής στα κατάντη. Η διαπερατότητα επιτυγχάνεται με κατάλληλα ανοίγματα στον κορμό του έργου αλλά και με κατάλληλη διαβάθμιση του υλικού της κατασκευής ή διαμορφώνοντας χαμηλή στέψη (όταν πρόκειται για κατασκευή από φυσικούς ογκολίθους) και ποικίλλει ανάλογα με τη στάθμη της θάλασσας και τις κυματικές συνθήκες. Τοποθετώντας γεωύφασμα στο εσωτερικό της κατασκευής περιορίζεται σημαντικά η ποσότητα του ιζήματος που περνά μέσα από αυτή. Οι διαπερατοί πρόβολοι επιτρέπουν τόσο στο νερό όσο και στο ίζημα να περάσει μέσα από την κατασκευή και παράλληλα περιορίζουν το σχηματισμό ρευμάτων διαφυγής (tip currents).

- Απόσταση μεταξύ διαδοχικών προβόλων

Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών προβόλων επιδρά στην κίνηση του νερού ανάμεσα τους και στη διαδικασία μεταβολής της ακτογραμμής. Ένα σύστημα προβόλων παύει να λειτουργεί ως σύστημα όταν η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών προβόλων είναι πολύ μεγάλη. Όταν αντιθέτως η απόσταση αυτή είναι πολύ μικρή το σύστημα τείνει να εκτρέψει τα ιζήματα προς τα ανοιχτά, οπότε δεν εμφανίζονται οι αναμενόμενες συσσωρεύσεις. Δηλαδή, η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος στη σταθεροποίηση μιας ακτογραμμής εξαρτάται από το διάστημα μεταξύ των διαδοχικών κατασκευών.

Για τον προσδιορισμό της απόστασης των προβόλων πρέπει να εκτιμηθεί η μεταβολή της ακτογραμμής, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλιστεί και μια επαρκής ποσότητα υλικού το οποίο θα συσσωρευτεί ανάμεσα στις κατασκευές. Η απόσταση αυτή ( $S$ ) γενικά ορίζεται ως γραμμική συνάρτηση του μήκους των προβόλων, δηλαδή  $S=n \cdot L$  όπου  $L$  το μήκος των προβόλων και  $n$  λαμβάνει τιμές από 2 έως 3 σύμφωνα με το Coastal Engineering Manual (2006).



**Σχήμα 2.4:** Απόσταση μεταξύ διαδοχικών προβόλων (Κουτίτας, 1998)

Ο παραπάνω υπολογισμός της απόστασης ανάμεσα σε δύο πρόβλους θεωρείται ενδεικτικός καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε παράκτιας ζώνης. Όσο αυξάνεται η γωνία μεταξύ των προσπιπτόντων κυματισμών και της ακτογραμμής τόσο

μειώνεται και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών προβόλων. Όταν οι κυματισμοί προσπίπτουν σχεδόν παράλληλα στην ακτογραμμή οι πρόβολοι κατασκευάζονται σε μεγάλες αποστάσεις. Στην περίπτωση αυτή όμως είναι πιθανό το σύστημα των προβόλων να μην αποτελεί την πλέον αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα της διάβρωσης, καθώς ο ρυθμός στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής είναι πολύ μικρός. Για ένα δεδομένο κυματικό καθεστώς μπορούν να μελετηθούν διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών προβόλων ενός συστήματος και τελικά να γίνει επιλογή εκείνου για το οποίο προκύπτει η βέλτιστη ανταπόκριση της ακτογραμμής, δηλαδή μέγιστη ικανότητα παγίδευσης ιζήματος και ταυτόχρονα διάβρωση μεταξύ των προβόλων και κατάντη του συστήματος σε επιτρεπτά όρια.

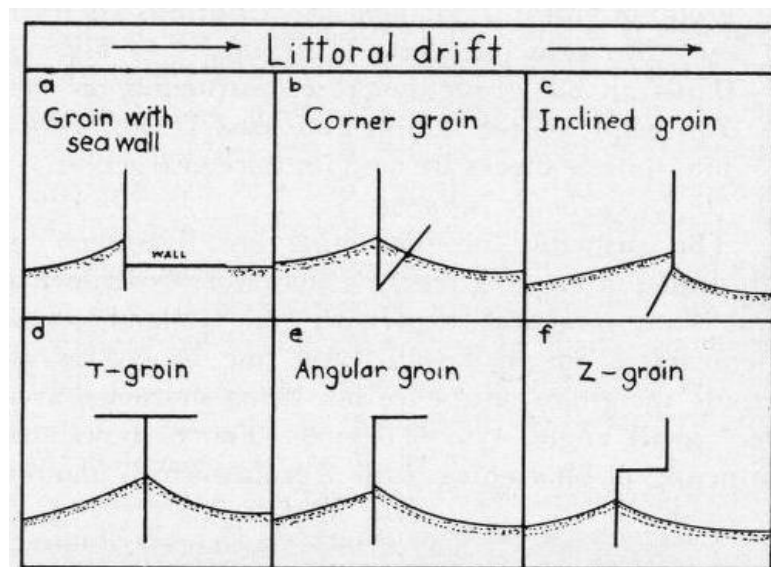


## Κεφάλαιο 3. Σύστημα Προβόλων Μεταβλητού Μήκους

### 3.1 Εισαγωγή

Κατά το σχεδιασμό ενός προβόλου ή ενός συστήματος προβόλων πρέπει να ληφθεί υπόψη και να εξετασθεί η ενδεχόμενη διάβρωση της ακτογραμμής στα κατάντη. Τα μέτρα που προτείνονται για να αποφευχθεί ή να περιοριστεί στο ελάχιστο η διάβρωση στην περιοχή κατάντη του έργου διακρίνονται σε μικρής και μεγάλης εμβέλειας επιρροής. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν

- Συνδυασμός προβόλου και θωράκισης στα κατάντη με θαλάσσιο τοίχο
- Πρόβολοι που σχηματίζουν γωνία μεταξύ του (corner groins)
- Κεκλιμένοι πρόβολοι (inclined groins)
- Πρόβολοι σχήματος-Τ, Γ ή Ζ (T-groins, angular groins, Z-groins).

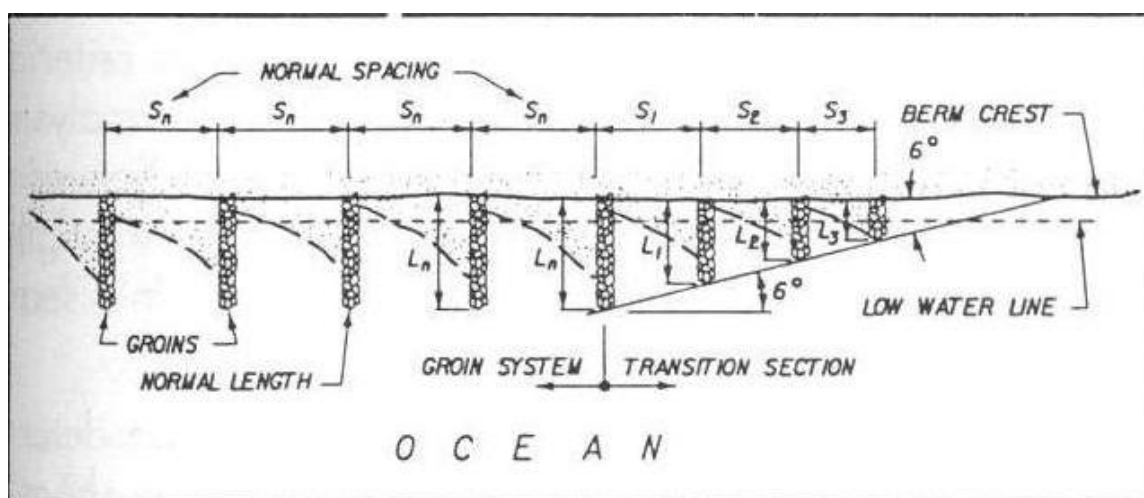


Σχήμα 3.1: Μέτρα έναντι της κατάντη διάβρωσης (Bruun, 1952)

Ως μέτρο έναντι της διάβρωσης με μεγάλη εμβέλεια επιρροής προτείνεται η κατασκευή ενός συστήματος προβόλων με μεταβατική περιοχή (transition section), δηλαδή μια περιοχή όπου θα μειώνεται σταδιακά το μήκος των κατάντη προβόλων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μια ομαλή μετάβαση από το σύστημα στην παρακείμενη φυσική ακτή περιορίζοντας τη διάβρωση σε αυτή. Ύστερα από πειράματα σε φυσικά μοντέλα (model tests) προτάθηκε από

τον Kressner (1928) η μείωση του μήκους των 3-4 κατάντη προβόλων ενός συστήματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Όταν σε μια παράκτια περιοχή παρατηρούνται μεταβολές στη φορά της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς τότε προτείνεται η δημιουργία μεταβατικών περιοχών και στα δύο άκρα του συστήματος των προβόλων. Σε περιπτώσεις όπου το μήκος της προστατευόμενης ακτής είναι αρκετά μικρό, οπότε το σύστημα αποτελείται από λίγους προβόλους, η σταδιακή μείωση του μήκους τους ξεκινά από το δεύτερο πρόβολο. Έτσι ολόκληρο το σύστημα αποτελεί μια μεταβατική περιοχή (Bruun, 1952). Το ελάχιστο μήκος το οποίο μπορεί να έχει ένας πρόβολος, αποτελεί απόφαση του μελετητή. Σε περιοχές με σημαντικό εύρος παλίρροιας προτείνεται ο τελευταίος πρόβολος να εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι τη γραμμή της μέσης κατώτατης στάθμης νερού (MLLW).

Γενικά, τα μήκη των προβόλων μειώνονται κατά μήκος μιας ευθείας που συγκλίνει προς την ακτογραμμή από τον τελευταίο πρόβολο «κανονικού» μήκους, σχηματίζοντας μια γωνία περίπου  $6^\circ$  με αυτή (ASCE, 1994). Η γωνία αυτή εξαρτάται από το ποσοστό της κατά μήκος της ακτής στερεοπαροχής που πρέπει να φθάνει κατάντη του τελευταίου προβόλου. Όσο μειώνεται η γωνία αυτή τόσο μειώνεται και το μήκος των προβόλων, για δεδομένο μήκος προστατευόμενης ακτογραμμής, και ταυτόχρονα αυξάνεται η ποσότητα των φερτών που φθάνει και αποτίθεται κατάντη. Παράλληλα, μειώνεται και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών προβόλων στην μεταβατική περιοχή (transition section) ώστε να παραμένει σταθερός ο λόγος απόστασης-μήκους ( $S/L$ ). Στην περίπτωση αυτή το κατά μήκος της ακτής ρεύμα κινείται ομαλά κατά μήκος του συστήματος των προβόλων, χωρίς να παρασύρει το ίζημα μακριά από την παραλία.



**Σχήμα 3.2:** Μεταβατική περιοχή (transition section) μεταξύ συστήματος προβόλων και παρακείμενης παραλίας (ASCE, 1994)



Καθώς μειώνεται σταδιακά το μήκος των προβόλων, μειώνεται και η ποσότητα του ιζήματος που συγκρατείται από αυτούς και παραμένει στο σύστημα, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η ποσότητα που παρακάμπτει το άκρο τους (bypassing) και τελικά περνά κατάντη του συστήματος. Έτσι κατάντη του τελευταίου προβόλου δεν παρουσιάζεται αρνητικό ισοζύγιο φερτών και επομένως περιορίζεται σημαντικά η διάβρωση της ακτογραμμής (σε σύγκριση με την περίπτωση συστήματος προβόλων σταθερού μήκους).

### 3.2 Παράμετροι σχεδιασμού

Όταν σχεδιάζεται το σύστημα των προβόλων ώστε να υπάρχει μια μεταβατική περιοχή, το μήκος του πρώτου προβόλου ( $L_1$ ) μετά τον τελευταίο πρόβολο «κανονικού» μήκους, υπολογίζεται από τη σχέση

$$L_1 = \frac{1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi}{1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi} L_n \quad (\text{ASCE, 1994}) \quad (3.1)$$

όπου  $R=S/L_n$  ο λόγος της απόστασης των διαδοχικών προβόλων του συστήματος προς το μήκος τους, ο οποίος είναι σταθερός,  $L_n$  το μήκος των προβόλων του συστήματος και  $\varphi$  η γωνία στη μεταβατική περιοχή. Η απόσταση μεταξύ του τελευταίου προβόλου του συστήματος και του πρώτου στην μεταβατική περιοχή δίνεται από τη σχέση

$$S_1 = \frac{R}{1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi} L_n \quad (\text{ASCE, 1994}) \quad (3.2)$$

Σε ένα μη συμβατικό σύστημα, όπου μειώνεται σταδιακά το μήκος όλων των προβόλων, από τη γεωμετρία του συστήματος υπολογίζεται το μήκος του  $i^{\text{ου}}$  προβόλου συναρτήσει της γωνίας ( $\varphi$ ) μεταξύ της ευθείας που συνδέει τα άκρα των προβόλων και της ακτογραμμής, του μήκους του πρώτου προβόλου ( $L_1$ ) και του λόγου ( $R$ ) της απόστασης δύο διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους, από τη σχέση

$$L_i = \left[ \frac{1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi}{1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi} \right]^{i-1} L_1 \quad (3.3)$$

Η απόσταση μεταξύ του  $i^{\text{ου}}$  και του επόμενου προβόλου υπολογίζεται πάλι από τη γεωμετρία του συστήματος ως

$$S_i = R \frac{\left[1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi\right]^{i-1}}{\left[1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan\varphi\right]^i} L_1 \quad (3.4)$$

και μειώνεται σταδιακά προς τα κατόντη ώστε ο λόγος (R) να παραμένει σταθερός.

Η γωνία  $\varphi$ , ο αριθμός των προβόλων και το μήκος του πρώτου προβόλου είναι παράμετροι από τις οποίες εξαρτώνται το μήκος της προστατευόμενης περιοχής καθώς και το ποσοστό της στερεοπαροχής που περνά κατόντη του συστήματος, που αποτελούν και τα δεδομένα για το σχεδιασμό του συστήματος. Το μήκος των προβόλων, οι μεταξύ τους αποστάσεις και το πλήθος τους αποτελούν τις βασικές παραμέτρους για το σχεδιασμό ενός μη συμβατικού συστήματος προβόλων.

### 3.3 Πορεία υπολογισμών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης ενός συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους στη στερεομεταφορά και τη μορφολογία της ακτογραμμής, με απώτερο στόχο τη βελτιστοποίηση της διάταξης τους.

Αρχικά επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικά κυματικά σενάρια (Πίνακας 3.1), σε μια ακτή κλίσης  $m=5\%$  και ιζήματος πυθμένα μέσης διαμέτρου  $D_{50}=0.25$  mm, και υπολογίστηκαν για καθένα από αυτά τα χαρακτηριστικά στη ζώνη θραύση (ύψος κύματος, βάθος και εύρος ζώνης θραύσης) και οι ρυθμοί της κατά μήκος της ακτής και της εγκάρσιας στερεομεταφοράς. Η πορεία των υπολογισμών που ακολουθήθηκαν περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

**Πίνακας 3.1: Παράμετροι κυματικών σεναρίων**

$a/a$	$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ ( $^\circ$ )
1	2.00	7.20	45
2	2.00	7.20	30
3	2.00	7.20	60
4	1.00	5.40	45
5	3.00	8.40	45

### 3.3.1 Υπολογισμός Θραύσης

Στους σύνθετους κυματισμούς δεν υφίσταται η έννοια της γραμμής θραύσης αλλά υπάρχει μια ζώνη θραύσης εξαιτίας των πολλών συνιστωσών διαφορετικών περιόδων και υψών κύματος. Για τον υπολογισμό της θραύσης χρησιμοποιείται το κριτήριο των Thornton & Guza (1982) για σύνθετους κυματισμούς

$$H_{rms,b} = 0.42d \quad (3.5)$$

ή προσεγγιστικά

$$H_{mo,b} = 0.60d \quad (3.6)$$

Επιλέγεται ένα βάθος  $d = 0.42H_{rms,o}$  ( $H_{rms,o}$  το ύψος κύματος στα βαθειά) και υπολογίζεται σε αυτό το ύψος κύματος ( $H_{rms,d}$ ), το οποίο έχει μεταβληθεί από τα βαθειά λόγω των φαινομένων της διάθλαση και της ρήχωσης.

Σε ενδιάμεσα και ρηγά νερά ( $d/L_d < 0.50$ ) το βάθος επιδρά στην ταχύτητα διάδοσης των κυματισμών και εμφανίζεται το φαινόμενο της διάθλασης, σε αναλογία της οπτικής. Η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών μεταβάλλεται και οι κυματοκορυφές τείνουν να γίνουν παράλληλες προς τις ισοβαθείς. Επίσης, μεταβάλλονται το μήκος και το ύψος των κυματισμών. Για την περιγραφή της διάθλασης, από τα βαθειά νερά ως το βάθος  $d$ , χρησιμοποιείται ο νόμος του Snell (αντίστοιχος της οπτικής διάθλασης) και υπολογίζεται η νέα γωνία της διεύθυνσης των κυματισμών ως προς την ακτή  $\alpha_d = \arcsin\left(\frac{L_d \sin \alpha_o}{L_o}\right)$  στο βάθος αυτό. Το μήκος κύματος στο συγκεκριμένο βάθος υπολογίζεται από τη γενική εξίσωση  $L_d = L_o \cdot \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_d}\right)$ . Έτσι, ο συντελεστής διάθλασης είναι  $k_R = \sqrt{\cos \alpha_o / \cos \alpha_d}$ .

Επιπλέον μεταβολή του ύψους κύματος (αρχικά μείωση και στη συνέχεια αύξηση) οφείλεται στη μείωση του βάθους (ρήχωση). Το φαινόμενο της ρήχωσης περιγράφεται με το συντελεστή ρήχωσης  $k_s = \sqrt{n_o L_o / n_d L_d}$ . Για το συντελεστή αυτό υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου  $n_d = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right)$  (όπου  $k=2\pi/L$  ο κυματαριθμός), ενώ είναι γνωστή η τιμή της παραμέτρου αυτής στα βαθειά νερά  $n_o=0.50$ . Γνωρίζοντας τους συντελεστές διάθλασης και ρήχωσης υπολογίζεται το ύψος κύματος στο συγκεκριμένο βάθος  $H_d = H_o \cdot k_s \cdot k_R$ .

Οι παραπάνω υπολογισμοί επαναλαμβάνονται έως ότου σε κάποιο βάθος το ύψος κύματος λάβει τέτοια τιμή ώστε να ισχύει το κριτήριο των Thornton & Guza, οπότε λόγω υδροδυναμικής αστάθειας προκαλείται θραύση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για μια ακτή με κλίση πυθμένα  $m=5\%$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά κυματισμών στη θραύση

$H_{rms,o}$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ (°)	$H_{rms,b}$ (m)	$L_b$ (m)	$\alpha_b$ (°)	$d_b$ (m)	$x_b$ (m)
2.00	7.20	45	1.72	35.08	26.2	4.09	81.70
2.00	7.20	30	1.83	36.51	18.7	4.36	87.20
2.00	7.20	60	1.50	33.66	30.6	3.60	72.00
1.00	5.40	45	0.87	33.50	24.9	2.06	41.20
3.00	8.40	45	2.56	36.42	27.3	6.09	121.80

### 3.3.2 Υπολογισμός ρυθμού στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής

Σε δεύτερο στάδιο υπολογίζεται ο ρυθμός της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς, καθώς αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην επιλογή και το σχεδιασμό ενός συστήματος προβόλων. Για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς χρησιμοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις της §1.4.1.1 (Εξ. 1.3-1.6) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά

$H_{rms,o}$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ (°)	$H_{rms,b}$ (m)	$\alpha_b$ (°)	$C_b$ (m/s)	$Q_l^1$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> /yr)	$Q_l^2$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> /yr)	$Q_l^3$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> /yr)	$Q_l^4$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> /yr)
2.00	7.20	45	1.72	26.2	5.85	10.63	10.99	11.05	5.32
2.00	7.20	30	1.83	18.7	6.01	9.69	9.94	9.93	5.18
2.00	7.20	60	1.50	30.6	5.49	8.45	8.81	8.86	4.37
1.00	5.40	45	0.87	24.9	2.59	1.88	1.92	1.20	0.86
3.00	8.40	45	2.56	27.3	8.55	29.30	30.63	36.88	15.14

$$^1 Q_l = 2.05 \cdot H_o^{\frac{5}{2}} (\cos \alpha_o)^{\frac{1}{4}} \sin 2\alpha_o \quad (\text{USACE, 2006})$$

$$^2 Q_l = 3.60 \cdot H_b^{5/2} \sin 2\alpha_b \quad (\text{USACE, 2006})$$

$$^3 Q_l = 1290 \cdot \frac{1}{16} \rho g H_{sb}^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b \quad (\text{USACE, 2006})$$

$$^4 Q_l = 0.064 \cdot H_{sb}^2 \cdot T_p^{1.5} \cdot m_b^{0.75} \cdot D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\alpha_b \quad (\text{Kamphuis, 1991})$$

Οι τιμές της στερεομεταφοράς που προκύπτουν από τις τρεις πρώτες εξισώσεις παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Από τις εξισώσεις αυτές υπολογίζεται η δυναμική στερεομεταφορά, θεωρώντας ότι το πάχος του πυθμένα και η ποσότητα του ιζήματος που μπορεί να διαβρωθεί είναι άπειρα. Η τιμή που προκύπτει από την εξίσωση του Kamphuis (1991) είναι περίπου υποδιπλάσια των υπολοίπων (στήλη 10). Στην εξίσωση αυτή λαμβάνεται υπόψη τόσο η κλίση του πυθμένα ( $m$ ) όσο και το μέγεθος ( $D_{50}$ ) των κόκκων του ιζήματος, δύο παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά.

### **3.3.3 Υπολογισμός ρυθμού εγκάρσιας στερεομεταφοράς**

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο ρυθμός της εγκάρσιας στερεομεταφοράς, από την Εξ. 1.10 των Stive & Battjes (1984) που περιγράφηκε στην §1.4.2.1, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

Το σύστημα των προβόλων επιλέγεται ως μέτρο προστασίας της ακτής από διάβρωση μόνο στην περίπτωση που η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά είναι μεγαλύτερη της εγκάρσιας και αυτό συμβαίνει σε όλα τα κυματικά σενάρια, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.4.

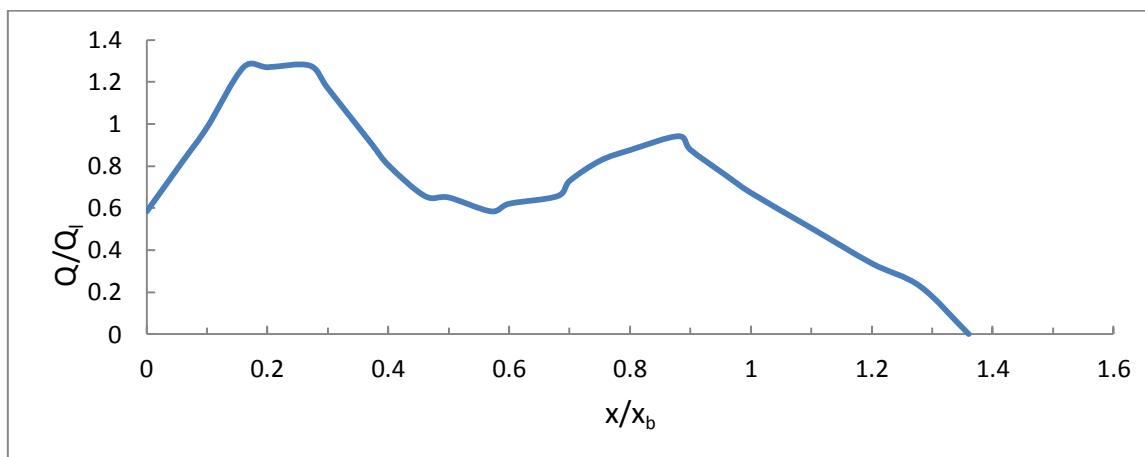
**Πίνακας 3.4: Εγκάρσια στερεομεταφορά**

$H_{rms,o}$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ (°)	$H_{rmsb}$ (m)	$q_{c,b}$ ( $10^6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ )	$q_{c,b/2}$ ( $10^6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ )
2.00	7.20	45	1.72	0.011	0.007
2.00	7.20	30	1.83	0.013	0.008
2.00	7.20	60	1.50	0.008	0.005
1.00	5.40	45	0.87	0.002	0.001
3.00	8.40	45	2.56	0.013	0.009

Ο ρυθμός της εγκάρσιας στερεομεταφοράς υπολογίζεται ανά μέτρο μήκους της ακτής ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{yr}$ ) και μεταβάλλεται με το βάθος. Στην πέμπτη στήλη του Πίνακα 3.4 η τιμή της εγκάρσιας στερεομεταφοράς αντιστοιχεί στο βάθος θραύσης ( $d_b$ ), ενώ στην έκτη στήλη στο μισό του βάθους θραύσης ( $d_b/2$ ). Στην περίπτωση όπου σε μια ακτή υπάρχει σύστημα προβόλων μεταβλητού μήκους, ο ρυθμός της εγκάρσιας στερεομεταφοράς υπολογίζεται στο βάθος που ορίζεται από το μέσο της ευθείας κατά μήκος της οποίας μειώνεται το μήκος των προβόλων.

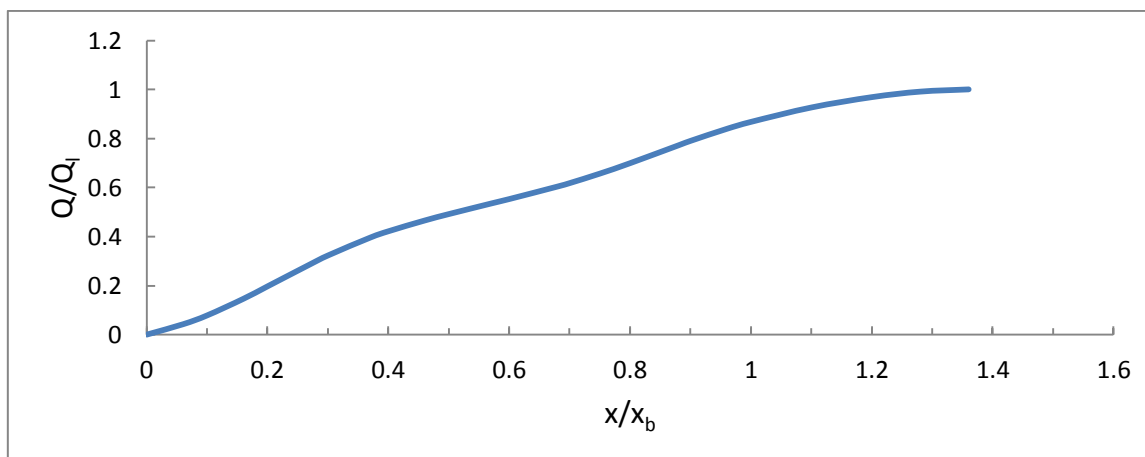
### 3.3.4 Υπολογισμός κατανομής στερεομεταφοράς

Η κατανομή της στερεομεταφοράς αποτελεί σημαντικό στοιχείο για το σχεδιασμό του συστήματος των προβόλων, καθώς είναι δυνατόν να γίνει μια εκτίμηση της ποσότητας του ιζήματος που παραμένει ανάντη του κάθε προβόλου και αυτού που διαφεύγει κατάντη.



**Σχήμα 3.3:** Εγκάρσια κατανομή κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς

Η κατανομή του Kamphuis (1991) (Σχ. 3.3) έχει προκύψει από πειράματα με σύνθετους κυματισμούς σε δεξαμενή κλίσης 10%. Το ποσοστό της στερεομεταφοράς που διέρχεται από μια διατομή ορίζεται από το ολοκλήρωμα της καμπύλης για τη συγκεκριμένη διατομή. Αυτό γραφικά υπολογίζεται από το λόγο του εμβαδού που περικλείεται από την καμπύλη και τον άξονα  $x$  προς το συνολικό εμβαδόν της. Έτσι, προκύπτει η αθροιστική καμπύλη της κατανομής της στερεομεταφοράς (Σχ. 3.4), η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ποσοστού του ιζήματος που περνά κατάντη ενός προβόλου.

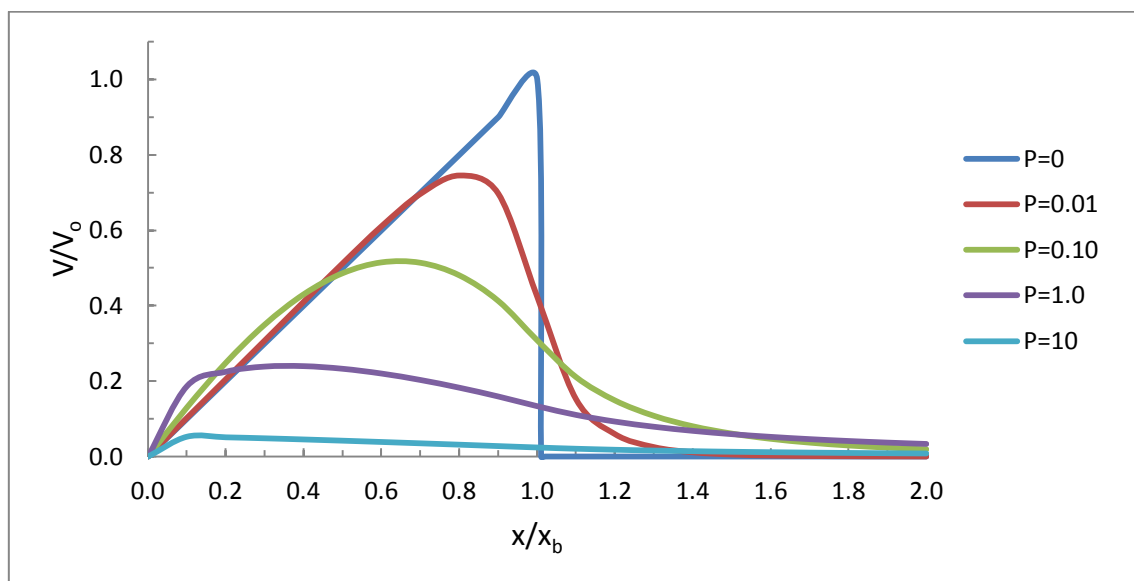


**Σχήμα 3.4:** Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής

Για ακτές με κλίση πυθμένα διαφορετική από 10% μπορεί να παραχθεί η κατανομή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς από το αντίστοιχο προφίλ της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος. Γνωρίζοντας την κλίση του πυθμένα μιας ακτής και το συντελεστή τριβής του πυθμένα μπορεί να υπολογιστεί το προφίλ του παράλληλου προς την ακτή ρεύματος για συγκεκριμένες κυματικές συνθήκες από τη σχέση του Longuet-Higgins (1970b)

$$V/V_o = \begin{cases} B_1(X/X_b)^{p_1} + A(X/X_b), & 0 < X/X_b < 1 \\ B_2(X/X_b)^{p_2}, & 1 < X/X_b < \infty \end{cases}$$

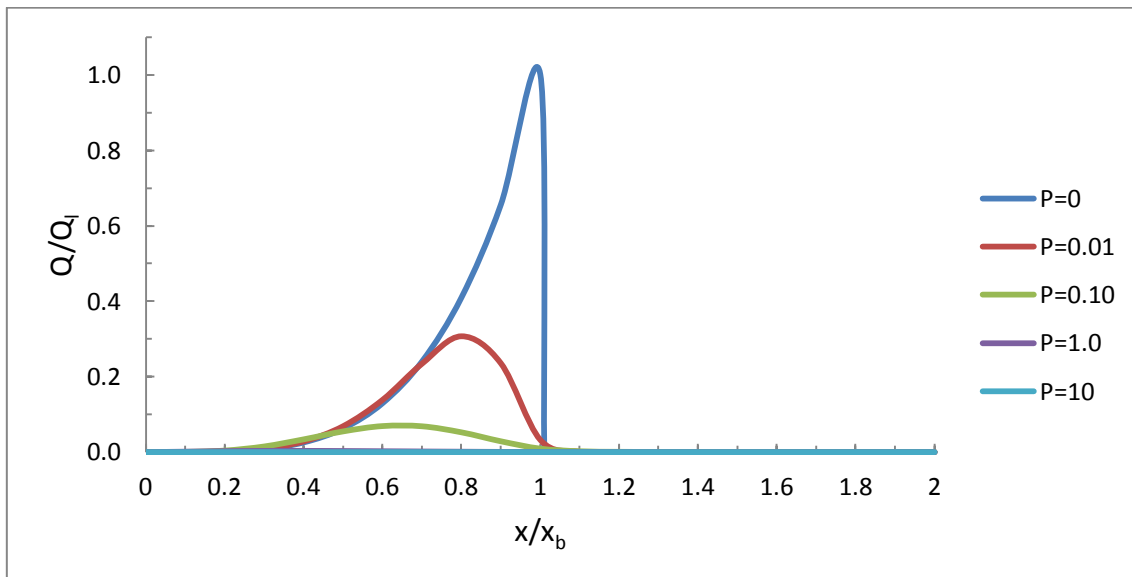
που περιγράφεται στην παράγραφο 1.4.1.2. Το προφίλ της ταχύτητας του ρεύματος, εξαρτάται, από την κλίση και την μορφολογία του πυθμένα μιας ακτής και τροποποιείται ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου ανάμειξης (P) η οποία εκφράζει την εγκάρσια ανάμειξη στην υπό μελέτη παράκτια ζώνη. Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.5 παρουσιάζονται τα προφίλ του κατά μήκος της ακτής ρεύματος για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης.



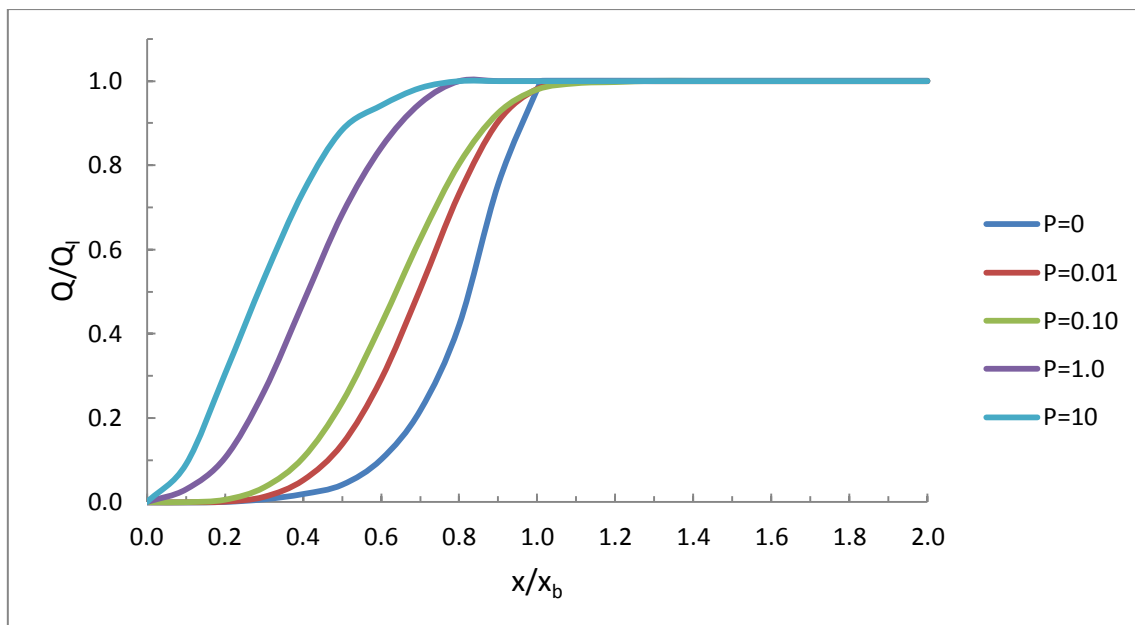
**Σχήμα 3.5:** Εγκάρσιο προφίλ ταχύτητας του κατά μήκος της ακτής ρεύματος στη ζώνη θραύσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης P

Με δεδομένο το εγκάρσιο προφίλ της ταχύτητας (V) του ρεύματος στη ζώνη θραύσης και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ρυθμός της στερεομεταφοράς είναι ανάλογος του  $V^4$  γίνεται εκτίμηση της κατανομής της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς, από την οποία προκύπτει η αθροιστική καμπύλη του διερχόμενου ποσοστού της στερεομεταφοράς από μια

διατομή εγκάρσια στην ακτογραμμή, ως το ολοκλήρωμα της καμπύλης της κατανομής για τη συγκεκριμένη διατομή.



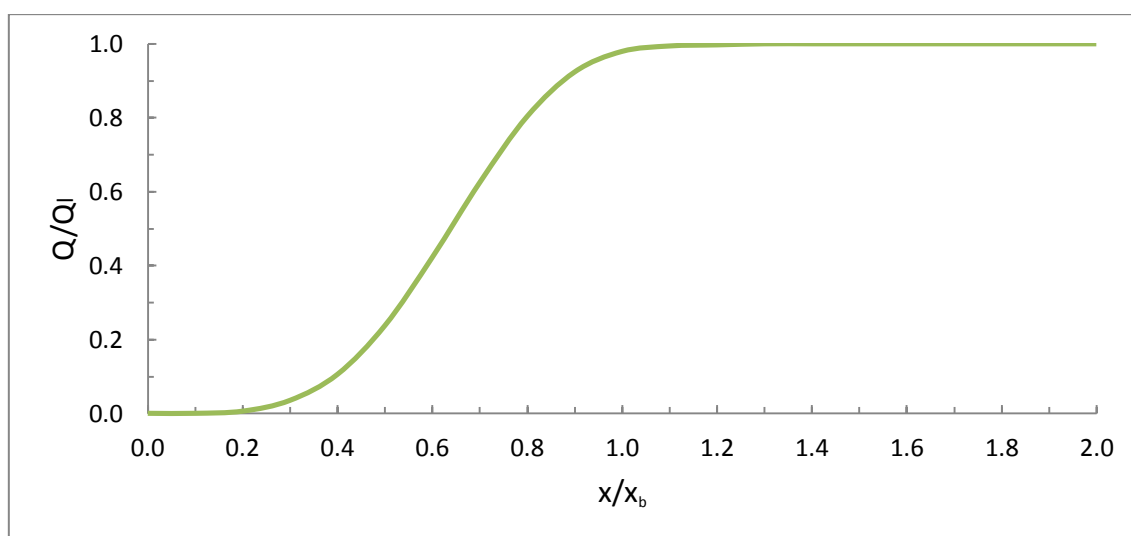
**Σχήμα 3.6:** Εγκάρσια κατανομή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης  $P$



**Σχήμα 3.7:** Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος ακτής για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης  $P$



Επιλέγεται το πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_0=45^\circ$ ) για να μελετηθεί η επίδραση ενός συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους στο καθεστώς της στερεομεταφοράς και το ισοζύγιο των φερτών μιας παράκτιας ζώνης με κλίση πυθμένα 5% και μέση διάμετρο κόκκων ιζήματος 0.25 mm. Ο ρυθμός της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς για το συγκεκριμένο σενάριο υπολογίστηκε, από την εξίσωση (1.6) του Kamphuis, ίση με  $Q_i=5.32 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/yr. Για τον υπολογισμό της ποσότητας του ιζήματος που διαφεύγει κατόντη του τελευταίου προβόλου του συστήματος χρησιμοποιείται η αθροιστική καμπύλη της κατανομής της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς που αντιστοιχεί σε τιμή παραμέτρου ανάμειξης  $P=0.10$  (Σχ.3.8).



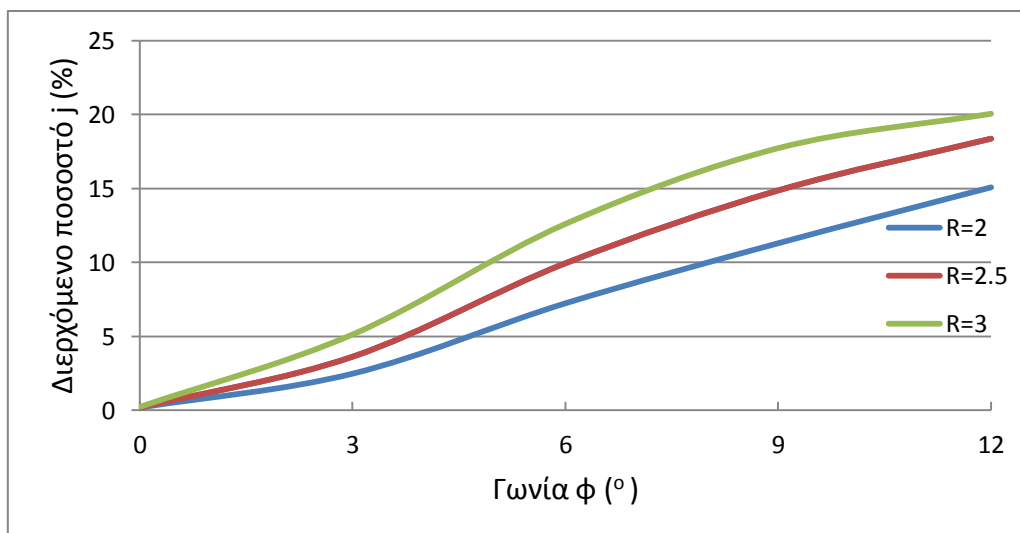
**Σχήμα 3.8:** Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής (παράμετρος ανάμειξης  $P=0.10$ )

Συνολικά εξετάζονται δεκαπέντε συστήματα τεσσάρων προβόλων, για διαφορετικούς συνδυασμούς γωνίας  $\varphi$ , που σχηματίζει η ακτογραμμή με την ευθεία που ενώνει τα άκρα των κατασκευών, και λόγου ( $R$ ) της απόστασης των διαδοχικών προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους. Η γωνία  $\varphi$  λαμβάνει τις τιμές 3, 6, 9 και 12, ενώ ο λόγος  $R$  2, 2.5 και 3. Από

τις σχέσεις  $L_i = \left[ \frac{1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi}{1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi} \right]^{i-1} L_1$  (Εξ.3.3) και  $S_i = R \frac{[1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi]^{i-1}}{[1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi]^i} L_1$  (Εξ.3.4) προκύπτουν

τα μήκη και οι αποστάσεις των προβόλων, αντίστοιχα. Το μήκος  $L_1$  του πρώτου προβόλου υπολογίζεται συναρτήσει του εύρους της ζώνης θραύσης, το οποίο για το συγκεκριμένο κυματικό σενάριο είναι  $x_b=81.70$  m. Γενικά, το μήκος των προβόλων δεν πρέπει να ξεπερνά το πλάτος της ζώνης θραύσης για να περιορίζεται το φαινόμενο της κατόντη διάβρωσης που

οφείλεται στην παρουσία των κατασκευών αυτών. Εδώ εξετάζεται η περίπτωση όπου το μήκος του πρώτου προβόλου φτάνει στο 80% της ζώνης θραύσης ( $L_1=0.8x_b$ ). Από το διάγραμμα της αθροιστικής καμπύλης στερεομεταφοράς η τιμή του κατακόρυφου άξονα ( $Q/Q_1$ ) η οποία αντιστοιχεί στην τιμή  $x/x_b=0.80$  του οριζώντιου άξονα αποτελεί το ποσοστό της στερεομεταφοράς που συγκρατείται από τον πρώτο πρόβολο και αποτίθεται ανάντη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ποσοστό αυτό είναι 80%, ενώ διαφεύγει κατάντη το  $j_1=20\%$ . Με την ίδια διαδικασία γίνεται εκτίμηση του ποσοστού της στερεομεταφοράς που περνά από το άκρο κάθε προβόλου ( $j_i\%$ ) και τελικά καταλήγει κατάντη του συστήματος ( $j\%$ ). Ο ρυθμός στερεομεταφοράς κατάντη ενός προβόλου αυξάνεται κατά ένα μικρό ποσοστό, της τάξεως του 5-10%, ως τον επόμενο πρόβολο, καθώς παρασύρεται από το ρεύμα μια μικρή ποσότητα ιζήματος από την περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών κατασκευών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9.



**Σχήμα 3.9:** Διάγραμμα διερχόμενου ποσοστού κατάντη του συστήματος τεσσάρων προβόλων μεταβλητού μήκους

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.9 παρουσιάζεται το ποσοστό της στερεομεταφοράς που διέρχεται κατάντη του συστήματος για κάθε συνδυασμό γωνίας  $\phi$  και λόγου  $R$ . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα συστήματα των προβόλων σχεδιάστηκαν με μήκος πρώτου προβόλου  $L_1=0.80x_b=65.4$  m και οι υπολογισμοί έγιναν για κυματισμό  $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_0=45^\circ$ . Στο διάγραμμα η γωνία  $\phi = 0^\circ$  αναφέρεται σε συμβατικό σύστημα προβόλων, δηλαδή σταθερού μήκους και μεταξύ τους απόστασης. Όσο αυξάνεται η γωνία  $\phi$  και ο λόγος  $R$  τόσο αυξάνεται και το ποσοστό που περνά κατάντη του συστήματος.

## Κεφάλαιο 4. Υπολογιστικό Μοντέλο MIKE 21

### 4.1 Εισαγωγή

Για τον υπολογισμό των κυματικών συνθηκών, του επιμήκους ρεύματος και της στερεομεταφοράς στην παράκτια περιοχή χρησιμοποιήθηκαν ένα μοντέλο ήπιας κλίσης (PMS), ένα υδροδυναμικό μοντέλο διδιάστατης ανάλυσης (HD) και ένα μοντέλο υπολογισμού των ρυθμών στερεομεταφοράς (ST) του λογισμικού MIKE21 του DHI (Danish Hydraulic Institute).

Μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές παράκτιες ζώνες με ευθύγραμμη ακτογραμμή, μέση διάμετρο κόκκων 0.25mm και κλίσεις πυθμένα 5%, 3% και 10%. Επιπλέον μελετήθηκε και η περίπτωση παράκτιας ζώνης με κλίση 5% και μέση διάμετρο κόκκων 0.15 mm. Με αυτό τον τρόπο εξετάστηκαν τόσο η επίδραση της κλίσης του πυθμένα στη στερεομεταφορά όσο και της διαμέτρου των κόκκων του ιζήματος.

Σε πρώτο στάδιο σχεδιάστηκε η βαθυμετρία κάθε παράκτιας περιοχής και ο τετραγωνικός κάνναβος διαστάσεων  $\Delta x = \Delta y = 5$  m. Το μέγεθος του καννάβου επιλέχθηκε με κριτήριο την ύπαρξη τουλάχιστον 5-7 σημείων ανά μήκος κύματος ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής ανάλυση της βαθυμετρίας και του κυματικού πεδίου. Επιπλέον επειδή τα αποτελέσματα από το κυματικό μοντέλο χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση των κυματογενών ρευμάτων, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται ένας επαρκής αριθμός σημείων του καννάβου στη ζώνη θραύσης (τουλάχιστον 8-10 σημεία). Και τα δύο αυτά κριτήρια πληρούνται στην περίπτωση του μικρότερου κυματισμού ( $H=1$  m,  $T_p=5.4$  s), επομένως και στα υπόλοιπα κυματικά σενάρια που εξετάζονται.

Συνολικά εξετάστηκαν πέντε διαφορετικά κυματικά σενάρια, τα χαρακτηριστικά των οποίων (ύψος, περίοδος αιχμής, γωνία πρόσπτωσης στα βαθειά) δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.1: Παράμετροι κυματικών σεναρίων**

$a/a$	$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ ( $^\circ$ )
1	2.0	7.2	45
2	2.0	7.2	30
3	2.0	7.2	60
4	1.0	5.4	45
5	3.0	8.4	45

Ακολούθησε μια σειρά τρεξιμάτων του κυματικού, του υδροδυναμικού και του μοντέλου στερεομεταφοράς τόσο για τις ακτές χωρίς την παρουσία έργων, ώστε να διαπιστωθεί ότι υπάρχει διάβρωση, καθώς και με την παρουσία συστήματος προβόλων διαφορετικών διατάξεων (για διάφορες τιμές της γωνίας  $\phi$ , του μήκους  $L_1$  του πρώτου προβόλου και του λόγου  $R$  της απόστασης δύο διαδοχικών προβόλων προς το ημιάθροισμά τους). Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή των υπολογιστών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

## 4.2 Κυματικό μοντέλο – MIKE21 Parabolic Mild Slope Module (PMS)

Το MIKE21 PMS είναι ένα γραμμικό μοντέλο διάθλασης-περίθλασης το οποίο βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα της διάθλασης και της ρήχωσης, εξαιτίας της μεταβολής του πυθμένα, της περίθλασης κατά μήκος της καθέτου στην κύρια διεύθυνση των κυματισμών και των ενεργειακών απωλειών, εξαιτίας της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών.

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι, όπως η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος ( $H_{rms}$ ), η περίοδος αιχμής ( $T_p$ ) και η μέση κατεύθυνση των κυματισμών, καθώς επίσης και οι τάσεις ακτινοβολίας (υπεύθυνες για τα κυματογενή ρεύματα). Τόσο οι κυματικές συνθήκες όσο και τα κυματογενή ρεύματα είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς στην παράκτια ζώνη και έτσι τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου εισέρχονται ως δεδομένα στο υδροδυναμικό μοντέλο (HD) και εν συνεχεία στο μοντέλο στερεομεταφοράς (ST).

Το MIKE21 PMS χρησιμοποιείται στη μελέτη του κυματικού πεδίου μιας ανοιχτής παράκτιας περιοχής καθώς και σε περιοχές όπου υπάρχουν τεχνικά έργα (π.χ. πρόβολοι, κυματοθραύστες), όταν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ανάκλαση των προσπιπτόντων κυματισμών και η περίθλαση είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνσή τους. Όπως σε όλες τις παραβολικές προσεγγίσεις έτσι και σε αυτό το μοντέλο δεν περιγράφονται η περίθλαση και η ανάκλαση με ακρίβεια (η περίθλαση κατά τη διεύθυνση  $x$  θεωρείται αμελητέα, καθώς επίσης και η διάχυση στη σκιά των έργων (back-scatter)). Επομένως το μοντέλο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η περίθλαση αποτελεί το πιο σημαντικό φαινόμενο στην περιοχή μελέτης, όπως για παράδειγμα στα λιμάνια.

Τα φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου είναι:

- η ρήχωση (shoaling)

- η διάθλαση (refraction)
- η περίθλαση (diffraction)
- η ανάκλαση (reflection)
- η τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- η θραύση (wave breaking)
- η γένεση των κυματισμών λόγω ανέμου (wind generation)
- η διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- η κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- η αλληλεπίδραση μεταξύ των κυματισμών (wave-wave interaction) και
- η αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος (wave-current interaction)

#### **4.2.1 Παραβολική προσέγγιση**

Στο MIKE21 PMS μπορούν να εφαρμοστούν τρεις διαφορετικοί τύποι παραβολικής προσέγγισης για την επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης, οι οποίοι είναι: το απλό μοντέλο (simple model), το μοντέλο του Padé (Padé's model) και το Minimax μοντέλο (Minimax model).

Το απλό μοντέλο αντιστοιχεί στον απλούστερο τύπο παραβολικής προσέγγισης στο ελλειπτικό μοντέλο ήπιας κλίσης. Το μοντέλο αυτό απαιτεί η γωνία ανάμεσα στη θετική κατεύθυνση του άξονα x και τη διεύθυνση του κυματισμού να είναι πολύ μικρή ( $<10^\circ$ ), ώστε να μην παρουσιαστούν σημαντικά σφάλματα στην επίλυση.

Το μοντέλο του Padé αποτελεί μια βελτίωση του απλού μοντέλου καθώς επιτρέπει μεγαλύτερες γωνίες, μέχρι  $\pm 45^\circ$ .

Τέλος, το μοντέλο Minimax βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του μέγιστου σφάλματος στην παραβολική προσέγγιση για ένα δεδομένο πλάτος ανοίγματος. Έτσι υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα Minimax για  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , κλπ. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτό για  $60^\circ$  χρησιμοποιείται μια παραβολική προσέγγιση η οποία ελαχιστοποιεί το σφάλμα που προκύπτει για διάδοση κυματισμών υπό  $60^\circ$  γωνία ως προς τον άξονα x. Ωστόσο, μπορεί να παρουσιαστούν μικρά σφάλματα για κυματισμού που διαδίδονται υπό μικρότερες γωνίες.

#### **4.2.2 Βασική εξίσωση**

Το MIKE21 PMS βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης με την οποία περιγράφονται η διάθλαση, η περίθλαση και η ανάκλαση των

γραμμικών αρμονικών κυματισμών σε μια παράκτια περιοχή με ήπια κλίση πυθμένα. Η εξίσωση αυτή παρουσιάστηκε πρώτα από τον Berkhoff το 1972.

Η ελλειπτική εξίσωση ήπιας κλίσης γράφεται ως

$$\nabla(C C_g \nabla \varphi) + (k^2 C C_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (4.1)$$

όπου

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \text{ διδιάστατος τελεστής κλίσης}$$

$C(x, y)$  η φασική ταχύτητα

$C_g(x, y)$  η ταχύτητα ομάδας κυματισμών

$\varphi(x, y)$  το δυναμικό ταχύτητας της μέση ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο συνδέεται με το δυναμικό της ταχύτητας με τη σχέση  $\varphi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} \varphi(x, y) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{-i\omega t}$

$W = Ediss/E$  όρος διάχυσης

$Ediss$  ο μέσος ρυθμός διάχυσης της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας

$E$  η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας

$k = 2\pi/L$  ο κυματαριθμός

$\omega = 2\pi f$  η κυκλική συχνότητα

$L$  το μήκος κύματος

$f$  η συχνότητα

Επίσης να σημειωθεί ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ( $\eta$ ) μπορεί να γραφτεί ως (Dean & Darymple, 1984)

$$\eta = \left. \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{z=0} \quad (4.2)$$

$$\eta = \varphi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (4.3)$$

Για διαδιδόμενους κυματισμούς μιας κατεύθυνσης, το δυναμικό της μέση ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται από τη σχέση

$$\varphi = A^*(x, y) e^{i\psi} \quad (4.4)$$

$$\text{όπου } \psi = \int^x k \cos \theta dx + \int^y k \sin \theta dy$$

και  $\theta$  η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών με τον άξονα  $x$ . Θεωρώντας ότι οι επικρατέστεροι κυματισμοί διαδίδονται κατά μήκος του άξονα  $x$  η συνάρτηση  $\psi$  μπορεί να γραφτεί  $\psi = \int^x k dx$ .

Μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης (4.1) προκύπτει θεωρώντας ως επικρατούσα διεύθυνση των κυματισμών τη διεύθυνση  $x$  και θεωρώντας αμελητέα τα

φαινόμενα της διασποράς (back-scatter) και της περίθλασης κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Η ελλειπτική εξίσωση μπορεί να μετατραπεί στην

$$(CC_g\varphi_x)_x + (CC_g\varphi_y)_y + (k^2CC_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (4.5)$$

όπου οι δείκτες  $x, y$  εκφράζουν παραγώγους ως προς  $x$  και  $y$  αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (4.4) οι όροι κλίσης μπορούν να εκφραστούν ως

$$\varphi_x = (ikA^* + A_x^*)e^{i\psi} \quad (4.6)$$

$$CC_g\varphi_x = (i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*)e^{i\psi} \quad (4.7)$$

$$(CC_g\varphi_x)_x = [ik(i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) + i\omega C_g A_x^* + i\omega A^*(C_g)_x + (CC_g A_x^*)_x]e^{i\psi} \quad (4.8)$$

Ο τελευταίος όρος  $(CC_g A_x^*)_x$  της Εξίσωσης 4.8 εκφράζει την επίδραση της διασποράς (back-scatter) και της περίθλασης κατά μήκος της διεύθυνσης  $x$  και επομένως παραλείπεται στην παραβολική προσέγγιση. Έτσι,

$$(CC_g\varphi_x)_x \cong \{[-k\omega C_g + i\omega(C_g)_x]\}A^* + 2i\omega C_g A_x^* e^{i\psi} \quad (4.9)$$

Τελικά, χρησιμοποιώντας την εξίσωση της μέσης ελεύθερης στάθμης (4.4) προκύπτει

$$(CC_g\varphi_y)_y = (CC_g A_y^*)e^{i\psi} \quad (4.10)$$

Αντικαθιστώντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις στην (4.5) προκύπτει η εξίσωση

$$A_x^* - \frac{i}{2\omega C_g} = (CC_g A_y^*)_y + A^* \frac{(C_g)_x}{2C_g} + A^* \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.11)$$

Τώρα γίνεται η υπόθεση ότι

$$\varphi = A(x, y)e^{ik_o x} \quad (4.12)$$

όπου  $k_o$  είναι ένας κυματαριθμός αναφοράς και  $A(x, y)$  μια σύνθετη μεταβλητή.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι

$$A^*(x, y) = A(x, y)e^{i\theta} \quad (4.13)$$

$$\theta = k_o x - \int^x k dx \quad (4.14)$$

Έτσι η εξίσωση (4.11) γράφεται

$$A_x - i(k - k_o)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y)_y + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.15)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την απλούστερη παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης και ισχύει για διάδοση κυματισμών κατά μήκος μιας επικρατούσας διεύθυνσης (θετικός ημιάξονας  $x$ ) ή υπό μικρή γωνία ως προς τον άξονα  $x$ .

Ο Kirby (1986) τροποποίησε την τελευταία εξίσωση ώστε να ισχύει και στην περίπτωση διάδοσης κυματισμών υπό μεγαλύτερη γωνία και παρήγαγε την εξίσωση

$$A_x - i(k_o - \beta_1 k)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} (CC_g A_y)_y - \frac{\sigma_2}{\omega C_g} (CC_g A_y)_{yx} + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.16)$$

όπου  $\sigma_1 = i \left( \beta_2 - \beta_3 \frac{k_o}{k} \right) + \beta_3 \left( \frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2kC_g} \right)$  και  $\sigma_2 = -\beta_3/k$ .

Οι τιμές των συντελεστών  $\beta_1, \beta_2$  και  $\beta_3$  δίνονται στον παρακάτω πίνακα για διαφορετικές παραβολικές προσεγγίσεις.

**Πίνακας 4.2: Τιμές συντελεστών  $\beta_1, \beta_2$  και  $\beta_3$  (DHI, 2007)**

Aperture	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Simple	1	-0.50	0
Padé	1	-0.75	-0.25
10°	0.999999972	-0.752858477	-0.252874920
20°	0.999998178	-0.761464683	-0.261734267
30°	0.999978391	-0.775898646	-0.277321130
40°	0.999871128	-0.796244743	-0.301017258
50°	0.999465861	-0.822482968	-0.335107575
60°	0.985273164	-0.854229482	-0.383283081
70°	0.994733030	-0.890064831	-0.451640568
80°	0.985273164	-0.925464479	-0.550974375
90°	0.956311082	-0.943396628	-0.704401903

Η Εξίσωση 4.16 ονομάζεται παραβολική εξίσωση ήπιας κλίσης, καθώς αποτελεί μια παραβολική προσέγγιση της εξίσωσης ήπιας κλίσης, και είναι η βασική εξίσωση επίλυσης του MIKE21 PMS.

### **4.2.3 Οριακές συνθήκες**

Το MIKE21 PMS επιλύει μια μερικώς διαφορική εξίσωση και, όπως σε όλες τις διαφορικές εξισώσεις, απαιτείται ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών σε όλα τα ανοιχτά όρια. Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται σε κυματικές συνθήκες ανοιχτής θαλάσσης (offshore wave conditions) και σε πλευρικές οριακές συνθήκες (lateral boundary conditions).

Ως ανοιχτό όριο (offshore boundary), δηλαδή το όριο μέσω του οποίου εισέρχονται οι κυματισμοί στην περιοχή προσομοίωσης, θεωρείται πάντα το δυτικό. Στο όριο αυτό προσδιορίζονται οι κυματικές παράμετροι  $H_{rms}$ ,  $T_p$ ,  $\alpha$  ή η κατανομή της κυματικής ενέργειας



στην περίπτωση των σύνθετων κυματισμών (irregular waves), από τα οποία καθορίζεται η εισερχόμενη ενέργεια στην περιοχή προσομοίωσης.

Το βόρειο και το νότιο όριο του μοντέλου συμπληρώνουν τις οριακές συνθήκες του υπολογιστικού πεδίου. Συνήθως δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις κυματικές συνθήκες που επικρατούν στα πλευρικά όρια (lateral boundaries) και θεωρούνται συμμετρικά, με την έννοια ότι η κλίση των κυματικών συνθηκών κατά μήκος τους ( $d/dy$ ) είναι μηδενική, που σημαίνει ότι γίνεται η υπόθεση πως οι ισοβαθείς τοπικά είναι ευθείες και παράλληλες σε αυτά. Εναλλακτικά τα όρια μπορούν να θεωρηθούν είτε απορροφητικά (absorbing), που σημαίνει ότι στο κατάντη όριο οι κυματισμοί απορροφώνται πλήρως χωρίς ανακλάσεις ενώ στο ανάντη δεν μπορεί να γίνει διάδοση των κυματισμών στην περιοχή προσομοίωσης, είτε ανακλαστικά (reflecting), οπότε οι προσπίπτοντες κυματισμοί ανακλώνται πλήρως.

#### **4.2.4 Θραύση κυματισμών**

Το φαινόμενο της θραύσης οφείλεται στην υδροδυναμική αστάθεια των κυματισμών. Στην ανοιχτή θάλασσα η αστάθεια αυτή εκφράζεται με μια κρίσιμη τιμή της καμπυλότητας ( $H/L$ ) των κυματισμών, ενώ στα ρηχά νερά με μια κρίσιμη τιμή του λόγου του ύψους κύματος προς το βάθος του νερού ( $H/d$ ).

Στο MIKE21 PMS η θραύση των κυματισμών βασίζεται στο μοντέλο των Battjes and Janssen (1978), σύμφωνα με το οποίο ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας εξαιτίας της θραύσης των κυματισμών είναι

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{\alpha}{8\pi} Q\omega H_{max}^2 \quad (4.17)$$

όπου  $E$  η συνολική ενέργεια,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $Q$  το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών και  $\alpha$  μια σταθερά από την οποία ελέγχεται ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας. Στην παραπάνω εξίσωση  $H_{max}$  είναι το μέγιστο επιτρεπτό ύψος των κυματισμών και υπολογίζεται από τη σχέση

$$H_{max} = \gamma_1 k^{-1} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kd}{\gamma_1}\right) \quad (4.18)$$

όπου  $k=2\pi/L$  ο κυματαριθμός,  $d$  το βάθος του νερού,  $\gamma_1$  μια παράμετρος της θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας και  $\gamma_2$  μια άλλη παράμετρος που έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους.

Η παραπάνω έκφραση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών κατά τη θραύση τους χρησιμοποιείται τόσο για μονοχρωματικούς όσο και για τυχαίους κυματισμούς.

Ανάλογα με τον τύπο των κυματισμών γίνεται και ο υπολογισμός του ποσοστού  $Q$  των θραυόμενων κυματισμών. Στην περίπτωση των μονοχρωματικών κυματισμών το ποσοστό αυτό είναι 0 όταν θραύονται τα κύματα, δηλαδή όταν  $H > H_{max}$ , και 1 όταν δεν συμβαίνει θραύση, δηλαδή  $H < H_{max}$ . Για τυχαίους κυματισμούς το ποσοστό αυτό υπολογίζεται κάνοντας την υπόθεση της κατανομής Rayleigh για το ύψος των κυματισμών, οπότε ισχύει

$$\frac{1-Q_b}{\ln(Q_b)} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^2 \quad (4.19)$$

#### **4.2.5 Υπολογισμός κυματικών παραμέτρων**

Από τους υπολογισμούς του μοντέλου προκύπτουν οι τρεις ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι: το ύψος κύματος  $H_{rms}$ , η περίοδο αιχμής  $T_p$  και η μέση διεύθυνση  $\theta_m$  του κύματος.

Το μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος  $H_{rms}$  και το σημαντικό ύψος κύματος  $H_{m0}$  ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις

$$H_{rms} = 2\sqrt{2E_1} \quad (4.20)$$

και

$$H_{m0} = 4\sqrt{4E_1} \quad (4.21)$$

όπου  $E_1 = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f, \theta) df d\theta$  η ολική κυματική ενέργεια,  $\theta_{max}$ ,  $\theta_{min}$  τα όρια της διεύθυνσης του κυματισμού και  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  το ανώτατο και το κατώτατο όριο αντίστοιχα για την κυματική συχνότητα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ενεργειακού φάσματος.

Η περίοδος αιχμής  $T_p$  ορίζεται ως η περίοδος μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας.

Η μέση διεύθυνση κύματος ( $\theta_m$ ) ορίζεται ως

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.22)$$

όπου  $a = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \cos\theta E(\theta) d\theta$  και  $b = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \sin\theta E(\theta) d\theta$ .

Από το MIKE21 PMS προκύπτουν επίσης οι τρεις συνιστώσες των τάσεων ακτινοβολίας  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  και  $S_{xy}$  οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των κυματογενών ρευμάτων. Οι τάσεις ακτινοβολίας ορίζονται από τις σχέσεις

$$S_{xx} = \rho \frac{g}{2} (F_u + F_p) \quad (4.23)$$

$$S_{yy} = \rho \frac{g}{2} (F_v + F_p) \quad (4.24)$$

$$S_{xy} = \rho \frac{g}{2} F_{uv} \quad (4.25)$$

όπου

$$F_u = \int_0^{2\pi} \cos^2\theta \cdot (1 + G)E(\theta)d\theta \quad (4.26)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sin^2\theta \cdot (1 + G)E(\theta)d\theta \quad (4.27)$$

$$F_{uv} = \int_0^{2\pi} \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot (1 + G)E(\theta)d\theta \quad (4.28)$$

$$F_p = \int_0^{2\pi} G \cdot E(\theta)d\theta \quad (4.29)$$

$$\text{και } G = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \quad (4.30)$$

Τέλος από το μοντέλο αυτό προκύπτουν ως αποτελέσματα οι x και y συνιστώσες ενός διανύσματος  $U=(u,v)$  οι οποίες ορίζονται ως

$$u = H_{m0}\cos\theta \quad (4.31)$$

και

$$v = H_{m0}\sin\theta \quad (4.32)$$

Το διάνυσμα αυτό  $U=(u,v)$  απεικονίζει τη μέση διεύθυνση του κύματος στην περιοχή μελέτης και το μέγεθός του είναι ανάλογο του ύψους κύματος σε κάθε σημείο.

#### **4.2.4 Εφαρμογή μοντέλου**

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε τρεις βασικές καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα εισάγεται η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής που εξετάζεται, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της, ο προσανατολισμός της, καθώς και η αριθμητική τιμή που ορίζει την ξηρά. Επίσης ορίζονται τα στοιχεία της περιόδου προσομοίωσης, δηλαδή τα χρονικά βήματα και ο τύπος της προσομοίωσης (stationary ή quasi-stationary). Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο ένα κυματικό γεγονός κάθε φορά, όπως στους υπολογισμούς που έγιναν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η περίοδος προσομοίωσης χαρακτηρίζεται ως στατική (stationary).

Στη δεύτερη καρτέλα ορίζονται οι οριακές συνθήκες τόσο στο ανοιχτό όριο (κυματικά χαρακτηριστικά, είδος κυματισμών) όσο και στα πλευρικά όρια.

Στην τρίτη καρτέλα εισάγονται οι παράμετροι επίλυσης του μοντέλου, όπως ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης, η τριβή στον πυθμένα και οι παράμετροι που αφορούν τη θραύση. Για όλες τις εφαρμογές που έγινε χρήση του κυματικού μοντέλου PMS ορίστηκε ως τύπος παραβολικής προσέγγισης το μοντέλο Minimax. Η τριβή που αναπτύσσεται στον πυθμένα εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος και η τραχύτητα εκφράζεται με τον αριθμό Nikuradse ο οποίος ορίζεται ως  $k_N=2.5D_{50}$ . Τέλος, όσον αφορά τη θραύση ορίστηκαν οι προκαθορισμένες από το μοντέλο τιμές των παραμέτρων  $\gamma_1=1.0$ ,  $\gamma_2=0.8$  και  $\alpha=1.0$ .

Σε τελευταίο στάδιο καθορίζονται τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από το μοντέλο. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εκτός από τα χαρακτηριστικά των κυματισμών σε κάθε σημείο (ύψος, περίοδος, διεύθυνση διάδοσης) υπολογίζονται και οι τάσεις ακτινοβολίας καθώς είναι απαραίτητες ως δεδομένο για το υδροδυναμικό μοντέλο HD.

### **4.3 Υδροδυναμικό μοντέλο – MIKE21 Flow Model/Hydrodynamic Module (HD)**

Το MIKE21 Flow Model είναι ένα μοντέλο υπολογισμού διδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στην προσομοίωση υδραυλικών και περιβαλλοντικών φαινομένων, σε λίμνες, εκβολές ποταμών, παράκτιες περιοχές και στην ανοιχτή θάλασσα. Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) αποτελεί τη βάση στο MIKE21 Flow Model καθώς προσομοιώνει τη μεταβολή της στάθμης του νερού και τη ροή, παράγοντας στοιχεία που αποτελούν δεδομένα για άλλα μοντέλα όπως αυτό της στερεομεταφοράς (ST). Μεταξύ άλλων μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των ανεμογενών και κυματογενών ρευμάτων σε μια παράκτια περιοχή, των κυματικών καταγίδων και τη μοντελοποίηση των παλιρροιών.

Στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη:

- η διατμητική τάση στον πυθμένα
- η διατμητική τάση από τον άνεμο
- η μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης
- η δύναμη Coriolis
- η διασπορά της ορμής
- οι παροχές εισόδου και εξόδου
- η εξάτμιση
- οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας
- οι τάσεις ακτινοβολίας

#### **4.3.1 Βασικές εξισώσεις**

Το MIKE21 HD είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει διδιάστατες μη μόνιμες ροές (ομογενείς κατά βάθος) σε κάθε σημείο του καννάβου. Οι εξισώσεις συνεχείας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης, ολοκληρωμένες

στο βάθος, περιγράφουν τη ροή και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας και αποτελούν τη βάση για την επίλυση του υδροδυναμικού μοντέλου.

- Εξίσωση συνεχείας

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (4.33)$$

- Εξίσωση διατήρησης της ποσότητας κίνησης κατά x

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_x + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

- Εξίσωση διατήρησης της ποσότητας κίνησης κατά y

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (4.35)$$

$h(x, y, t)$  το βάθος του νερού (=ζ-d, m)

$d(x, y, t)$  χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος νερού (m)

$\zeta(x, y, t)$  η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (m)

$p, q(x, y, t)$  η ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα ( $m^3/s/m$ )

$C(x, y)$  ο συντελεστής Chézy ( $m^{1/2}/s$ )

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )

$f(V)$  συντελεστής τριβών ανέμου

$V, V_x, V_y(x, y, t)$  η ταχύτητα του ανέμου και οι συνιστώσες της κατά x και y (m/s)

$\Omega(x, y)$  συντελεστής Coriolis, εξαρτώμενος από το γεωγραφικό πλάτος ( $s^{-1}$ )

$p_a(x, y, t)$  η ατμοσφαιρική πίεση ( $kg/m^2/s^2$ )

$\rho_w$  η πυκνότητα του νερού ( $kg/m^3$ )

$x, y$  οι χωρικές συντεταγμένες (m)

$t$  ο χρόνος (s)

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$  συνιστώσες ενεργών διατμητικών τάσεων.

Το MIKE21 HD χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ADI (Alternating Direction Implicit) για την ολοκλήρωση των εξισώσεων συνεχείας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης στο χώρο και το χρόνο.

### **4.3.2 Οριακές συνθήκες**

Το MIKE21 HD επιλύει μερικές διαφορικές εξισώσεις και επομένως είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών. Ως δεδομένα στα ανοιχτά όρια του μοντέλου απαιτούνται είτε η στάθμη της επιφάνειας και οι ποσότητες κίνησης (flux densities) παράλληλα στα όρια είτε οι ποσότητες κίνησης κάθετα και παράλληλα προς αυτά. Η στάθμη της επιφάνειας και οι ποσότητες κίνησης κάθετα στα όρια αποτελούν τις αρχικές οριακές συνθήκες και πρέπει να προσδιορίζονται σε όλα τα σημεία του ορίου και για κάθε χρονικό βήμα. Οι ποσότητες κίνησης κατά μήκος των ορίων αποτελούν δευτερεύουσες οριακές συνθήκες και είναι απαραίτητες καθώς μόνο με τις αρχικές δεν επιλύεται ο αλγόριθμος όταν χρησιμοποιούνται μη γραμμικοποιημένες εξισώσεις. Επιπλέον εισάγονται στο μοντέλο ως δεδομένα η βαθυμετρία, η αντίσταση του πυθμένα, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου και οι βαρομετρικές πιέσεις.

### **4.3.3 Εφαρμογή μοντέλου**

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε δύο βασικές καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ. υδροδυναμική). Επίσης εισάγεται η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής που εξετάζεται και καθορίζεται αν η προσομοίωση αποτελεί συνέχεια κάποιας προηγούμενης (Hot Start) ή όχι (Cold Start). Επιπλέον, ορίζονται τα ανοιχτά όρια και τα σημεία πιθανών εισροών (π.χ. εκβολές ποταμών) ή εκροών. Αν το μοντέλο βρίσκεται σε μια περιοχή όπου είναι σημαντική η παλίρροια, ρυθμίζεται το ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος του νερού ενός σημείου ώστε αυτό να μην λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς (drying depth), καθώς επίσης και το βάθος του νερού για το οποίο το σημείο θα ληφθεί ξανά υπόψη (flooding depth). Το εύρος των τιμών αυτών είναι 0.1-0.2 m και 0.2-0.4 m αντίστοιχα. Τέλος ορίζονται τα στοιχεία της περιόδου προσομοίωσης της ανάλυσης, δηλαδή το χρονικό βήμα  $\Delta t$ , ο αριθμός των χρονικών βημάτων και η χρονική στιγμή έναρξης της ανάλυσης. Κριτήριο για την επιλογή του χρονικού βήματος αποτελεί ο αριθμός Courant, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση  $C_R = C \frac{\Delta t}{\Delta x}$  (όπου  $C = \sqrt{gd}$  η ταχύτητα διάδοσης του κύματος,  $\Delta t$  το χρονικό βήμα και  $\Delta x$  η διάσταση του καννάβου) και δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 5 στις συνήθεις περιπτώσεις. Ο αριθμός Courant μπορεί να λάβει μεγαλύτερη τιμή ( $C_R \leq 20$ ) όταν η βαθυμετρία της εξεταζόμενης περιοχής είναι ομαλή, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα κατά την ανάλυση. Σε όλα τα κυματικά σενάρια που εξετάστηκαν επιλέγεται χρονικό βήμα  $\Delta t=2$  s και η τιμή του αριθμού Courant κυμαίνεται από 4.85 έως 6.26.

Στη δεύτερη καρτέλα προσδιορίζονται οι υδροδυναμικές παράμετροι του μοντέλου, όπως το ιξώδες ( $\varepsilon=1.5\text{m}^2/\text{s}$ ), η αντίσταση του πυθμένα στη ροή (στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε ο αριθμός Manning) και στοιχεία που αφορούν τα ανοιχτά όρια και τον άνεμο. Επίσης εισάγεται και το αρχείο των αποτελεσμάτων των τάσεων ακτινοβολίας που προέκυψε από το κυματικό μοντέλο PMS.

Όσον αφορά την αντίσταση του πυθμένα, αυτή εκφράζεται είτε από τον αριθμό Manning (M) είτε από τον Chézy ( $C=M \cdot h^{1/6}$ ) και ορίζεται από τη σχέση  $g|u|/C^2$ . Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται ο αριθμός Manning, ο οποίος αρχικά τίθεται σταθερός ( $M=32\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ) σε όλα τα σημεία της βαθυμετρίας, για χρονική διάρκεια προσομοίωσης ίση με μία ώρα, ενώ στη συνέχεια γίνεται εκ νέου υπολογισμός της τιμής του για κάθε μια ώρα. Έτσι η τιμή του Manning προσαρμόζεται στις υδροδυναμικές συνθήκες της περιοχής. Για τον υπολογισμό της φαινομενικής αντίστασης του πυθμένα και του αριθμού Manning σε κάθε σημείο της βαθυμετρίας χρησιμοποιείται το εργαλείο “Apparent Bed Roughness” της καρτέλας “Hydrodynamics” του MIKE21 Toolbox. Σε αυτό εισάγονται τα αποτελέσματα από την πρώτη ώρα προσομοίωσης του υδροδυναμικού μοντέλου HD και τα κυματικά δεδομένα (περίοδος κυματισμού και αποτελέσματα PMS) και ορίζονται η περιοχή μελέτης, η περίοδος προσομοίωσης και οι ιδιότητες του ιζήματος του πυθμένα (διάμετρος κόκκων και σχετική πυκνότητα). Το αρχείο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται αρχικά για τον υπολογισμό των κυματογενών ρευμάτων κατά μήκος των ανοιχτών ορίων της περιοχής μελέτης και εν συνεχεία εισάγεται στο υδροδυναμικό μοντέλο HD για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί για την επόμενη μία ώρα.

Για τον υπολογισμό των κυματογενών ρευμάτων κατά μήκος των ανοιχτών ορίων χρησιμοποιείται το εργαλείο “Wave Generated and Setup” της καρτέλας “Waves” του MIKE21 Toolbox. Σε αυτό εισάγονται οι τάσεις ακτινοβολίας που υπολογίστηκαν από το κυματικό μοντέλο και ορίζονται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, η θέση του ανοιχτού ορίου όπου θα γίνει ο υπολογισμός, το ιξώδες ( $\varepsilon=1.5\text{m}^2/\text{s}$ ), ο αριθμός Manning και η περίοδος προσομοίωσης, ίση με αυτή του υδροδυναμικού μοντέλου. Την πρώτη ώρα της προσομοίωσης ο αριθμός Manning λαμβάνει σταθερή τιμή  $M=32\text{m}^{1/3}/\text{s}$ , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ στις επόμενες ώρες η τιμή μεταβάλλεται στα διάφορα σημεία της βαθυμετρίας ώστε να προσαρμόζεται στις υδροδυναμικές συνθήκες.

Η ανάλυση του υδροδυναμικού μοντέλου γίνεται για χρονική διάρκεια μίας ώρας. Κάθε νέα ώρα υπολογίζονται και πάλι η αντίσταση του πυθμένα και το κυματογενές ρεύμα κατά μήκος των ορίων και εισάγονται στο υδροδυναμικό μοντέλο. Επειδή κάθε νέα ανάλυση του

υδροδυναμικού, πέραν της πρώτης, αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης, όταν εισάγεται η βαθυμετρία γίνεται η επιλογή “Hot Start”. Οι υπολογισμοί αυτοί (υδροδυναμικό μοντέλο, αντίσταση πυθμένα, κυματογενές ρεύμα κατά μήκος των ορίων) επαναλαμβάνονται διαδοχικά έως ότου επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή όταν δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών των αποτελεσμάτων δύο διαδοχικών αναλύσεων του υδροδυναμικού μοντέλου.

#### 4.4 Μοντέλο στερεομεταφοράς – MIKE21 Non - Cohesive Sediment Transport Module (ST)

Το MIKE21 ST είναι ένα αριθμητικό μοντέλο του λογισμικού MIKE21 που υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων σε περιπτώσεις αμιγούς ρεύματος ή για συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος. Επιπλέον υπολογίζονται και οι αρχικοί ρυθμοί μεταβολής της στάθμης του πυθμένα. Το MIKE21 ST δεν αποτελεί ένα πλήρες μορφολογικό μοντέλο, αλλά είναι δυνατόν με αυτό να προσδιορισθούν οι περιοχές πιθανής διάβρωσης ή απόθεσης ιζήματος. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη η παλίρροια, ο άνεμος, οι κυματισμοί και τα ρεύματα. Το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή σε φυσικά περιβάλλοντα, όπως εκβολές ποταμών και ακτογραμμές, καθώς επίσης και σε ανθρώπινες κατασκευές, όπως λιμάνια και γέφυρες.

##### 4.4.1 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος

Στο μοντέλο MIKE21 ST είναι διαθέσιμες 5 διαφορετικές θεωρίες υπολογισμού της στερεομεταφοράς, σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος.

- Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Hansen.

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται ως

$$\Phi_t = 0.1 \frac{C^2}{2g} \theta^{2.5} \quad (4.36)$$

και

$$\Phi_t = \frac{q_t}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (4.37)$$



• Θεωρία ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Engelund & Fredsøe  
Ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου ( $q_t$ ) υπολογίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πυθμένα ( $q_b$ ) και του φορτίου σε αιώρηση ( $q_s$ ),  $q_t = q_b + q_s$ .

Γίνεται η θεώρηση ότι η στερεομεταφορά στον πυθμένα λαμβάνει χώρα σε ένα στρώμα πάχους ίσου με τη διάμετρο των κόκκων του ιζήματος και η στερεοπαροχή υπολογίζεται από τη σχέση

$$q_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gd} \text{ όταν } \theta' > \theta_c \quad (4.38)$$

όπου  $p$  η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση,  $\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd}$  η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή και  $\theta_c$  η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης. Η πιθανότητα  $p$  ορίζεται ως  $p = [1 + (\frac{\pi\beta/6}{\theta' - \theta_c})^4]^{-1/4}$  όπου  $\beta$  ο δυναμικός συντελεστής τριβής.

Το φορτίο σε αιώρηση υπολογίζεται ως

$$q_s = 11.6U_f'c_b a [I_1 \ln(30h/k_N) + I_2] \quad (4.39)$$

όπου  $c_b$  η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος,  $U_f'$  η διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή,  $a = 2d$  το επίπεδο αναφοράς για το  $c_b$ ,  $I_1$  και  $I_2$  τα ολοκληρώματα του Einstein,  $h$  το βάθος του νερού και  $k_N = 2.5D$  η ισοδύναμη τραχύτητα του Nikuradse. Τα ολοκληρώματα  $I_1$  και  $I_2$  αποτελούν μια συνάρτηση του αδιάστατου επίπεδο αναφοράς  $A = r/h$  και του αριθμού Rouse  $z^* = w/\kappa U_{f,wc}$  ( $w$  η ταχύτητα καθίζησης του αιρούμενου ιζήματος,  $\kappa$  η σταθερά του von Karman ( $\approx 0.40$ ) και  $U_{f,wc}$  η διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος) και έχουν όρια  $y = a$  και  $y = h$  όπου το  $y$  μετράται πάνω από το σταθερό επίπεδο του πυθμένα.

Στο επίπεδο αναφοράς  $a = 2d$  η συγκέντρωση  $c_b$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$c_b = 0.65/(1 + 1/\lambda)^3 \quad (4.40)$$

όπου  $\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \pi\beta/6}{0.027s\theta'}}$  για  $\theta' > \theta_c + \pi\beta/6$

Η θεωρία των Engelund & Fredsøe αναπτύχθηκε από αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα με αμμώδες υλικό πυθμένα και για το λόγο αυτό πρέπει το υλικό που εισάγεται ως δεδομένο να έχει διάμετρο κόκκων του μεγέθους της άμμου.

- Διατύπωση ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Zyserman & Fredsøe

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς του συνολικού φορτίου  $q_i$  είναι παρόμοια με αυτή των Engelund & Fredsøe, με μόνη διαφορά ότι η συγκέντρωση του φορτίου στον πυθμένα υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n} \text{ όταν } \theta' > \theta_c \quad (4.41)$$

- Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα των Meyer-Peter & Müller

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα υπολογίζεται ως

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (4.42)$$

και

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (4.43)$$

Σε περιπτώσεις όπου το ίζημα είναι πολύ λεπτόκοκκο και/ή η ταχύτητα του ρεύματος μεγάλη με τη φόρμουλα αυτή υπολογίζονται μικρότεροι ρυθμοί στερεομεταφοράς καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνεισφορά του φορτίου πυθμένα.

- Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Ackers & White

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από την εξίσωση

$$G_{gr} = C \left[ \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right]^m \quad (4.44)$$

όπου C, m και A είναι παράμετροι του μοντέλου που εξαρτώνται από το αδιάστατο μέγεθος

$$D_{gr} = D[g(s-1)/\nu^2]^{1/3} \quad (4.45)$$

όπου D το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, s η σχετική πυκνότητα του ιζήματος και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του νερού.

$F_{gr}$  είναι ένα γενικός αριθμός της κινητικότητας του ιζήματος και ορίζεται ως

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gd(s-1)}} \left[ \frac{V}{\sqrt{32 \log \left( \frac{10h}{d} \right)}} \right]^{1-n} \quad (4.46)$$

όπου  $U_f$  είναι η συνολική διατμητική ταχύτητα, h το βάθος του νερού, V η μέση κατά βάθος ταχύτητα του ρεύματος, n μια σταθερά που εξαρτάται από το  $D_{gr}$  που κυμαίνεται από 0 για χονδρόκοκκα υλικά έως 1 για λεπτόκοκκα. Η παράμετρος μεταφοράς  $G_{gr}$  ορίζεται ως

$$G_{gr} = \frac{Xh}{sd} \left( \frac{U_f}{V} \right)^n, \text{ όπου } X \text{ η μαζική ροή ιζημάτων ανά μονάδα μαζικού ρυθμού ροής.}$$

#### 4.4.2 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες ρεύματος-κύματος

Στο μοντέλο MIKE21 ST είναι διαθέσιμες 2 διαφορετικές μέθοδοι προσομοίωσης της στερεομεταφοράς, για συνδυασμό ρεύματος και κύματος.

- Εφαρμογή του ντετερμινιστικού μοντέλου στερεομεταφοράς της DHI, STP
- Μέθοδος ολικού φορτίου μεταφοράς του Bijker

Το  $Q$  είναι ένας αδιάστατος παράγοντας που ορίζεται από τη σχέση

$$Q = \left[ I_1 \ln \left( \frac{33h}{r} \right) + I_2 \right] \quad (4.47)$$

όπου  $h$  το βάθος,  $r$  η τραχύτητα του πυθμένα και  $I_1, I_2$  είναι ολοκληρώματα του Einstein. Η τραχύτητα  $r$  μπορεί να συνδεθεί με τον αριθμό Chézy μέσω της σχέσης  $C = 18 \log \left( \frac{12h}{r} \right)$ .

Ακολουθώντας τον Bijker, η διατμητική ταχύτητα για συνδυασμό κυματισμών και ρεύματος υπολογίζεται ως

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{\widehat{u}_b}{V} \right)^2} = \frac{\sqrt{gV}}{c} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{\widehat{u}_b}{V} \right)^2} \quad (4.48)$$

όπου  $U_{f,c}$  η διατμητική ταχύτητα λόγω ρεύματος,  $V$  η μέση στο βάθος ταχύτητα του ρεύματος,  $\widehat{u}_b$  το πλάτος της τροχιάς της ταχύτητας λόγω κύματος στον πυθμένα και  $\xi$  ο αδιάστατος παράγοντας που μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του συντελεστή τριβής λόγω

κύματος ( $f_w$ ) και του αριθμού Chézy ( $C$ )  $\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}}$ .

Ο συντελεστής τριβής λόγω κύματος υπολογίζεται σύμφωνα με τον Swart ως

$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{a_b}{r} \right)^{-0.194} \right] \text{ όταν } 1.47 < \frac{a_b}{r} < 3000 \text{ και}$$

$$f_w = 0.32 \text{ όταν } \frac{a_b}{r} \leq 1.47$$

όπου  $a_b = \frac{\widehat{u}_b T}{2\pi}$  το πλάτος της τροχιάς των υγρών μορίων, λόγω κύματος, στον πυθμένα. Τόσο το  $a_b$  όσο και το  $\widehat{u}_b$  υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη γραμμική θεωρία των κυματισμών.

Το φορτίο πυθμένα ( $q_b$ ) και το φορτίο σε αιώρηση ( $q_s$ ) υπολογίζονται από τη σχέση

$$q_b = B d_{50} U_{f,c} \exp \left( -\frac{0.27 \Delta d_{50} g}{\mu U_{f,wc}^2} \right) \quad (4.49)$$

όπου  $B$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής και  $\Delta = \rho_s / \rho - 1$  η σχετική πυκνότητα του ιζήματος. Το  $\mu$  είναι ένας συντελεστής που ονομάζεται συντελεστής αμμοκυμάτων και ισούται με

$\mu = (C/C')^{3/2}$ , όπου  $C' = 18 \log \left( \frac{12h}{d_{90}} \right)$  ο αριθμός Chézy που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα.

#### **4.4.3 Εφαρμογή μοντέλου**

Η εισαγωγή στο μοντέλο των διαφόρων παραμέτρων γίνεται σε δύο βασικές καρτέλες. Στην πρώτη καρτέλα επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης, δηλαδή αν θα γίνει για συνθήκες αμιγούς ρεύματος (Current only) ή για συνδυασμό ρεύματος και κυματισμών (Current and waves). Εισάγονται τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου, επιλέγεται η περιοχή μελέτης και ορίζονται τα στοιχεία που αφορούν την περίοδο προσομοίωσης (χρονικά βήματα και υποσειρές). Επιλέγεται χρονικό βήμα ίσο με αυτό της υδροδυναμικής ανάλυσης.

Στη δεύτερη καρτέλα ορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, που η ανάλυση γίνεται για συνθήκες συνδυασμένης δράσης ρεύματος και κυματισμών, επιλέγεται ως μέθοδος υπολογισμού των ρυθμών στερεομεταφοράς η διδιάστατη προσέγγιση (2DH) του ντετερμινιστικού μοντέλου STP. Το STP αποτελεί ένα προηγμένο μοντέλο στερεομεταφοράς, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση στην κίνηση των ιζημάτων, μεταξύ άλλων, της θραύσης των κυματισμών, της ύπαρξης ή μη αμμοκυμάτων, της διαβάθμισης των κόκκων του υλικού του πυθμένα και της διάδοσης των κυματισμών υπό γωνία ως προς το παράκτιο ρεύμα. Ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση με αυτή τη μέθοδο είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο άλλων απλούστερων μεθόδων. Για να μειωθεί ο χρόνος αυτός γίνεται παρεμβολή μεταξύ των τιμών των ρυθμών στερεομεταφοράς που περιέχονται σε πίνακα ο οποίος δημιουργείται από το χρήστη και εισάγεται στο MIKE21 ST.

Για τη δημιουργία ενός πίνακα στερεομεταφοράς χρησιμοποιείται το εργαλείο “Generation of Sediment Tables” της καρτέλας “Sediments” του MIKE21 Toolbox. Ο χρήστης ορίζει το εύρος διακύμανσης των υδροδυναμικών παραμέτρων (ταχύτητα ρεύματος, ύψος και περίοδος κύματος, λόγος ύψους κύματος προς βάθος νερού) και των παραμέτρων του ιζήματος (διάμετρος  $D_{50}$  και διακύμανση κόκκων  $\sigma_g = (D_{84}/D_{16})^{1/2}$ ) για το οποίο υπολογίζονται οι ρυθμοί στερεομεταφοράς. Έτσι καθορίζεται η πρώτη τιμή κάθε παραμέτρου, το διάστημα μεταξύ διαδοχικών τιμών καθώς και ο αριθμός των τιμών. Επίσης ορίζεται αν στους υπολογισμούς θα ληφθούν υπόψη η επίδραση των αμμοκυμάτων και της κλίσης του πυθμένα.

Στην καρτέλα των παραμέτρων του μοντέλου της στερεομεταφοράς εισάγονται επιπλέον τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου, το αρχείο της αντίστασης του πυθμένα

που αντιστοιχεί στην τελευταία ώρα της ανάλυσης καθώς και δεδομένα που αφορούν το ίζημα του πυθμένα, όπως το μέγεθος και η διαβάθμιση των κόκκων και το πορώδες. Τέλος, για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα επιλέγεται το μορφολογικό σχήμα επίλυσης Lax-Wendroff.

Το αρχείο των αποτελεσμάτων του MIKE21 ST περιλαμβάνει τους ρυθμούς της εγκάρσιας ( $P_s$ ) και της κατά μήκος της ακτής ( $Q_s$ ) στερεομεταφοράς, το ρυθμό μεταβολής του πυθμένα ( $dz/dt$ ) και τη νέα βαθυμετρία.



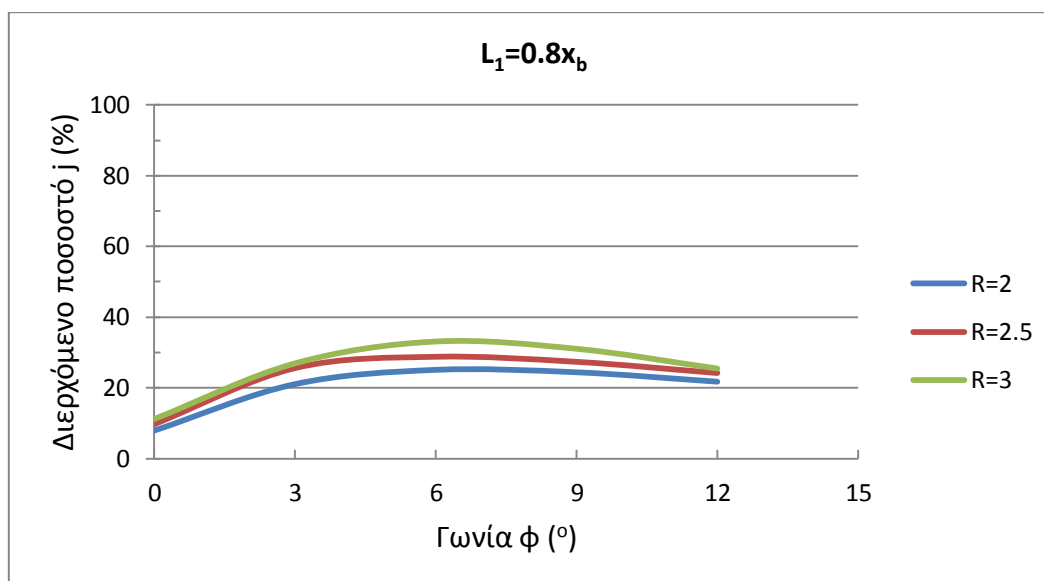
## Κεφάλαιο 5. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

### 5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης MIKE21

Από την ανάλυση του MIKE21 ST υπολογίστηκαν οι μέσοι ρυθμοί της δυνητικής στερεομεταφοράς εγκάρσια ( $P_s$ ) και κατά μήκος ( $Q_s$ ) της ακτής, σε κάθε σημείο του καννάβου της βαθυμετρίας, οι οποίοι εκφράζονται σε μονάδες  $m^3/yr/m$ . Για τον υπολογισμό του ρυθμού της στερεομεταφοράς που περνά από μια διατομή αθροίζονται οι τιμές των σημείων που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη διατομή. Οι εγκάρσιες διατομές καλύπτουν μήκος μεγαλύτερο της ζώνης θραύσης και ίσο με  $1.20 \cdot x_b$ , όπου λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο ποσοστό της μεταφοράς των ιζημάτων.

Γνωρίζοντας την τιμή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς σε δύο εγκάρσιες σε αυτή διατομές, μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα για το αν το τμήμα της ακτής μεταξύ των δύο διατομών υφίσταται διάβρωση ή απόθεση. Για παράδειγμα, όταν ο ρυθμός της στερεομεταφοράς στην κατάντη διατομή είναι μεγαλύτερος από αυτόν στην ανάντη η ακτή διαβρώνεται καθώς το παράκτιο ρεύμα παρασύρει ίζημα από την περιοχή μεταξύ των δύο διατομών. Και στις τρεις περιπτώσεις ακτών (με κλίση πυθμένα 3%, 5% και 10%) που εξετάστηκαν, εμφανίζεται διάβρωση της ακτογραμμής για όλα τα κυματικά σενάρια. Επιπλέον σε κάθε περίπτωση η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εγκάρσια, επομένως το σύστημα των προβόλων αποτελεί το πλέον κατάλληλο μέτρο προστασίας της ακτής από διάβρωση.

Αρχικά μελετάται η περίπτωση μιας ακτής με κλίση 5% και ίζημα πυθμένα διαμέτρου  $D_{50} = 0.25$  mm, για το πρώτο κυματικό σενάριο του Πίνακα 4.1 ( $H_{rms} = 2.0$  m,  $T_p = 7.2$  s,  $\alpha_0 = 45^\circ$ ). Εξετάζονται, όπως και στην §3.3.4, διατάξεις συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους, που προκύπτουν για διαφορετικούς συνδυασμούς γωνίας  $\phi$  ( $\phi = 3, 6, 9$  και  $12$ ), λόγου  $R$  ( $R = 2, 2.5$  και  $3$ ) και μήκους πρώτου προβόλου ( $L_1 = 80\%, 60\%$  και  $50\%$  του πλάτους της ζώνης θραύσης). Δηλαδή γίνεται ανάλυση για 36 συνολικά διαφορετικά συστήματα προβόλων για το συγκεκριμένο κυματικό σενάριο σε αυτή την ακτή. Επιπλέον εξετάζονται και τρεις περιπτώσεις συστήματος προβόλων σταθερού μήκους ( $L = 0.8x_b$ ) και αποστάσεων, ώστε να συγκριθούν με τις βελτιστοποιημένες διατάξεις.



**Σχήμα 5.1:** Διάγραμμα διερχόμενου ποσοστού κατάντη του συστήματος τεσσάρων προβόλων (μήκος πρώτου προβόλου  $L_1=0.8x_b$ )

Στα Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις του μοντέλου στερεομεταφοράς MIKE21 ST. Οι τιμές στον οριζόντιο άξονα αφορούν τη γωνία ( $\phi$ ) που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει τα άκρα των προβόλων με την ακτογραμμή, ενώ στον κατακόρυφο άξονα το ποσοστό ( $j$ ) της στερεομεταφοράς που διέρχεται από τον τελευταίο πρόβολο.

Για συγκεκριμένη τιμή του λόγου ( $R$ ) της απόστασης δύο διαδοχικών προβόλων προς το ημιάθροισμα των μηκών τους, το διερχόμενο ποσοστό της στερεομεταφοράς κατάντη του συστήματος των προβόλων μεγιστοποιείται όταν η γωνία  $\phi$  γίνει ίση με  $6^\circ$ . Η γωνία αυτή προτείνεται ως βέλτιστη και από την ASCE (1994). Το ποσοστό αυτό ελαχιστοποιείται στην περίπτωση του συμβατικού συστήματος προβόλων. Στην περίπτωση αυτή το ποσοστό της στερεομεταφοράς που περνά στην κατάντη παράκτια ζώνη είναι της τάξης του 10%. Για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας  $\phi$  το ποσοστό της στερεομεταφοράς που περνά στην παρακείμενη ακτή αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή του λόγου  $R$ .

### **5.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων**

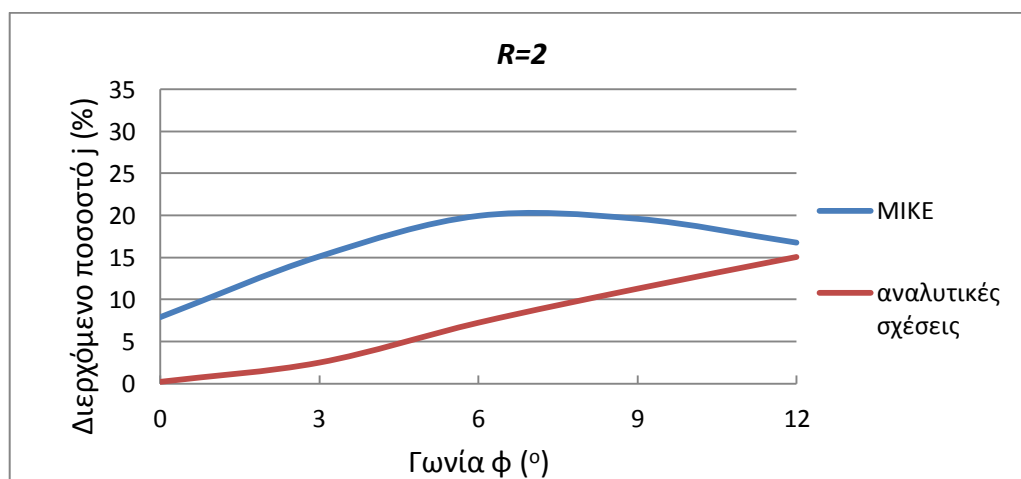
Από τα αποτελέσματα του MIKE21 προκύπτει ότι η βέλτιστη διάταξη προβόλων είναι αυτή στην οποία το μήκος των προβόλων μειώνεται κατά μήκος μιας ευθείας που σχηματίζει γωνία  $6^\circ$  με την ακτογραμμή. Στην περίπτωση αυτή μεγιστοποιείται η διερχόμενη ποσότητα ιζήματος στην παρακείμενη ακτή. Από τις αναλυτικές σχέσεις και το διάγραμμα της



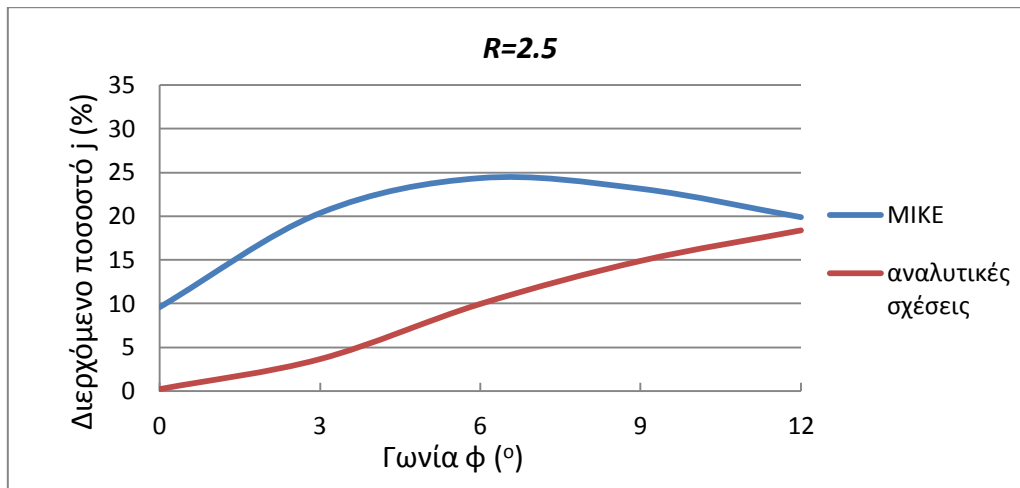
κατανομής της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς προκύπτει ως βέλτιστη η γωνία των  $12^\circ$  (Σχ.5.2). Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση του διερχόμενου ποσοστού με αύξηση του λόγου ( $R$ ) της απόστασης δύο διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους.

Οι τιμές των διερχόμενων ποσοστών που προέκυψαν από τις αναλύσεις του MIKE21 είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των αναλυτικών σχέσεων. Τα αποτελέσματα του MIKE21 κρίνονται πιο αξιόπιστα καθώς κατά τους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη διάφορες διεργασίες που επηρεάζουν το υδροδυναμικό καθεστώς και τη μεταφορά των φερτών υλών. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης κάποια ποσότητα ιζήματος αποτίθεται ανάντη του πρώτου προβόλου, μεταβάλλοντας τη βαθυμετρία και αναμορφώνοντας τις υδροδυναμικές συνθήκες στο συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής μελέτης. Καθώς η νέα ακτογραμμή μετατοπίζεται προς τα ανοιχτά, μετατοπίζεται και η κατανομή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς και ταυτόχρονα μειώνεται το ενεργό μήκος του θαλάσσιου τμήματος του προβόλου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της διερχόμενης ποσότητας ιζήματος στα κατάντη του πρώτου προβόλου. Η διεργασία αυτή δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς με τις αναλυτικές σχέσεις και τα διαγράμματα.

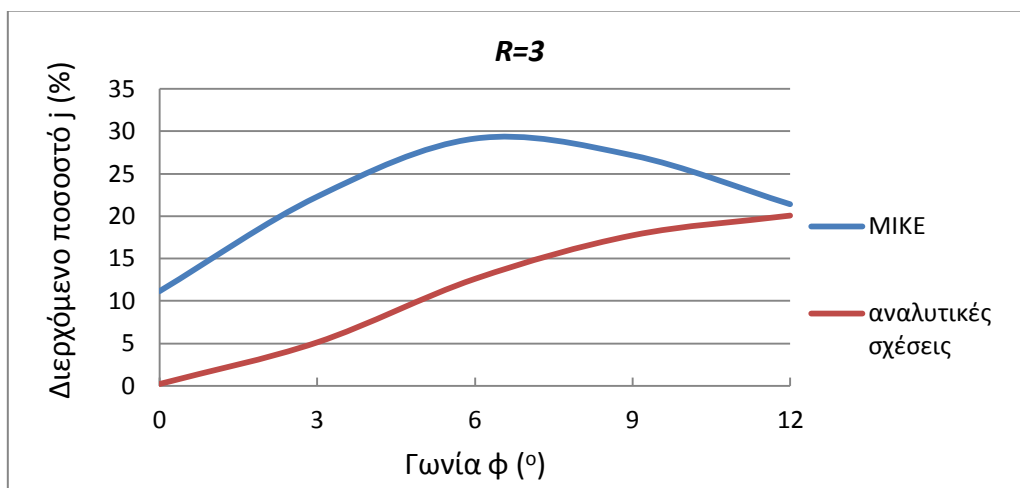
Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.2, 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διερχόμενου ποσοστού ιζήματος στα κατάντη συστήματος τεσσάρων προβόλων (με μήκος πρώτου προβόλου  $L_1=0.8x_b$ ) ως προς τη γωνία  $\phi$ , τα οποία προέκυψαν από τις αναλύσεις του MIKE21 και τους υπολογισμούς με τις αναλυτικές σχέσεις.



**Σχήμα 5.2:** Αποτελέσματα αναλύσεων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων (λόγος απόστασης διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους  $R=2.0$ )



**Σχήμα 5.3:** Αποτελέσματα αναλύσεων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων (λόγος απόστασης διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους  $R=2.5$ )

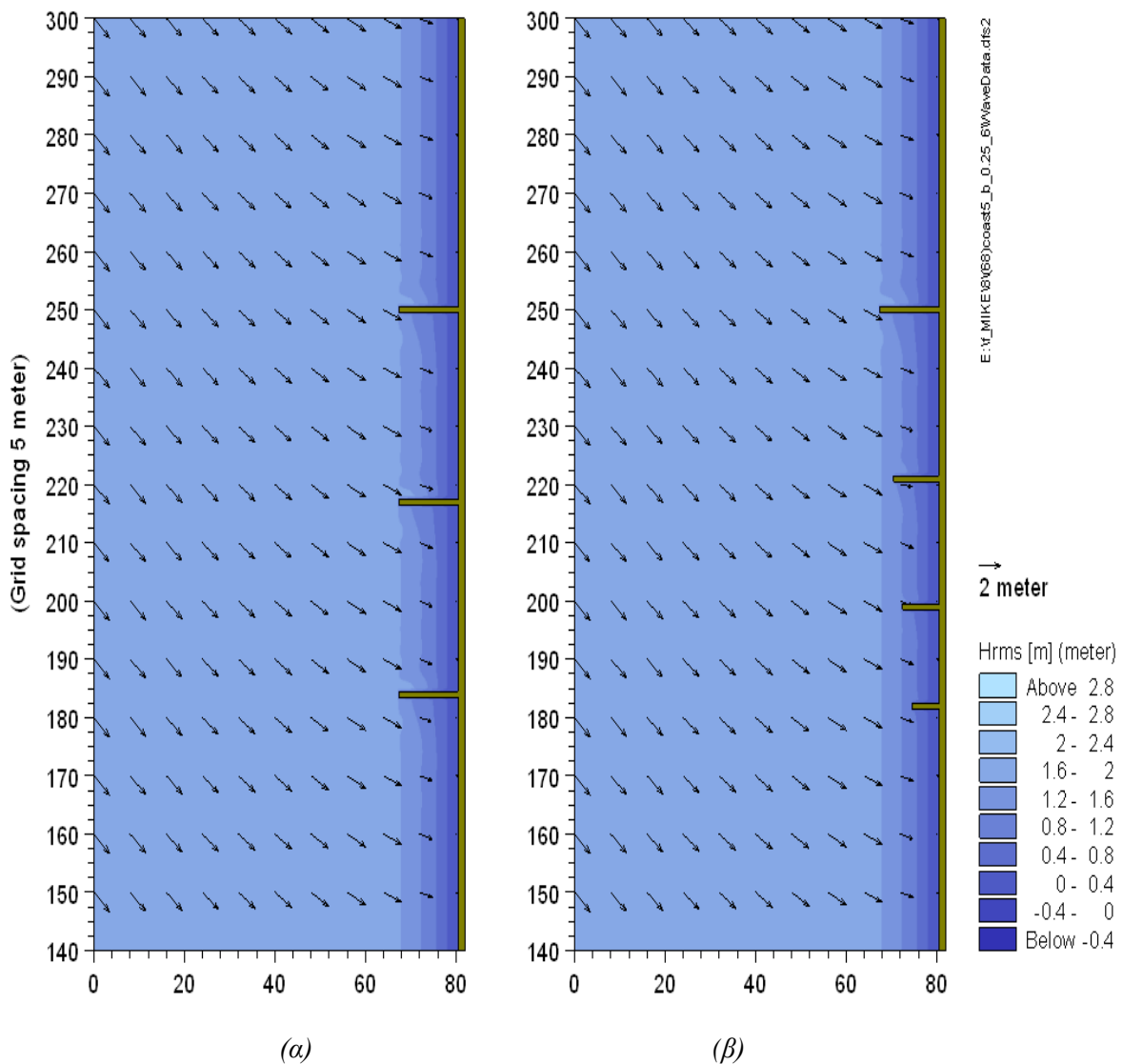


**Σχήμα 5.4:** Αποτελέσματα αναλύσεων MIKE21 και αναλυτικών σχέσεων (λόγος απόστασης διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους  $R=3.0$ )

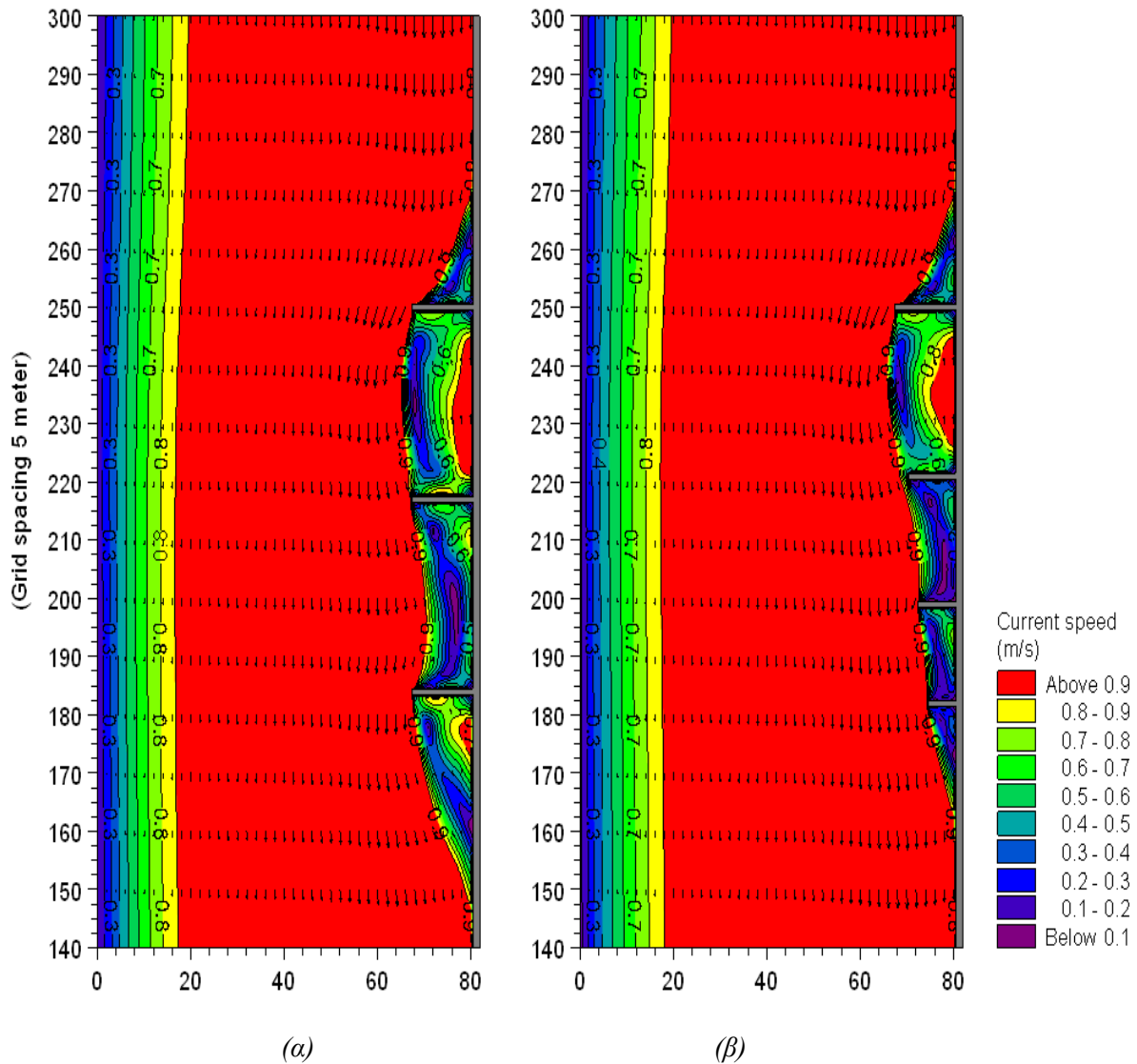
Οι υπολογισμοί έγιναν για κυματισμό  $H_{rms,0}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_0=45^\circ$  σε ακτή με κλίση πυθμένα 5% και μέση διάμετρο κόκκων ιζήματος  $D_{50}=0.25$  mm. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους για μικρές τιμές της γωνίας  $\phi$  μεταξύ της ακτογραμμής και της ευθείας που ενώνει τα άκρα των προβόλων, ενώ συγκλίνουν για γωνία  $\phi=12^\circ$ . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω περισσότερο αξιόπιστα κρίνονται τα αποτελέσματα του MIKE21.

## 5.2 Σύγκριση συμβατικής με βελτιωμένη διάταξη

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση δύο διαφορετικών διατάξεων προβόλων και γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση. Στην πρώτη περίπτωση μελετάται ένα συμβατικό σύστημα προβόλων σταθερού μήκους, ενώ στη δεύτερη ένα σύστημα προβόλων όπου το μήκος τους και οι μεταξύ τους αποστάσεις μειώνονται προς τα κατάντη. Ο αριθμός των προβόλων διαφέρει στις δύο περιπτώσεις ώστε να καλύπτουν ίδιο μήκος ακτογραμμής. Η προσομοίωση και στις δύο περιπτώσεις έγινε για κυματισμό ύψους  $H_{rms,0}=2.0$  m, περιόδου  $T_p=7.2$  s και γωνίας διεύθυνσης στα βαθιά  $\alpha_0=45^\circ$  σε αμμώδη ( $D_{50}=0.25$  mm) ακτή κλίσης 5%.



**Σχήμα 5.5:** Ύψος και διεύθυνση διάδοσης κυματισμού  
 (α) Σύστημα προβόλων σταθερού μήκους ( $L=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ )  
 (β) Σύστημα προβόλων μεταβλητού μήκους ( $L_1=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ ,  $\varphi=6^\circ$ )

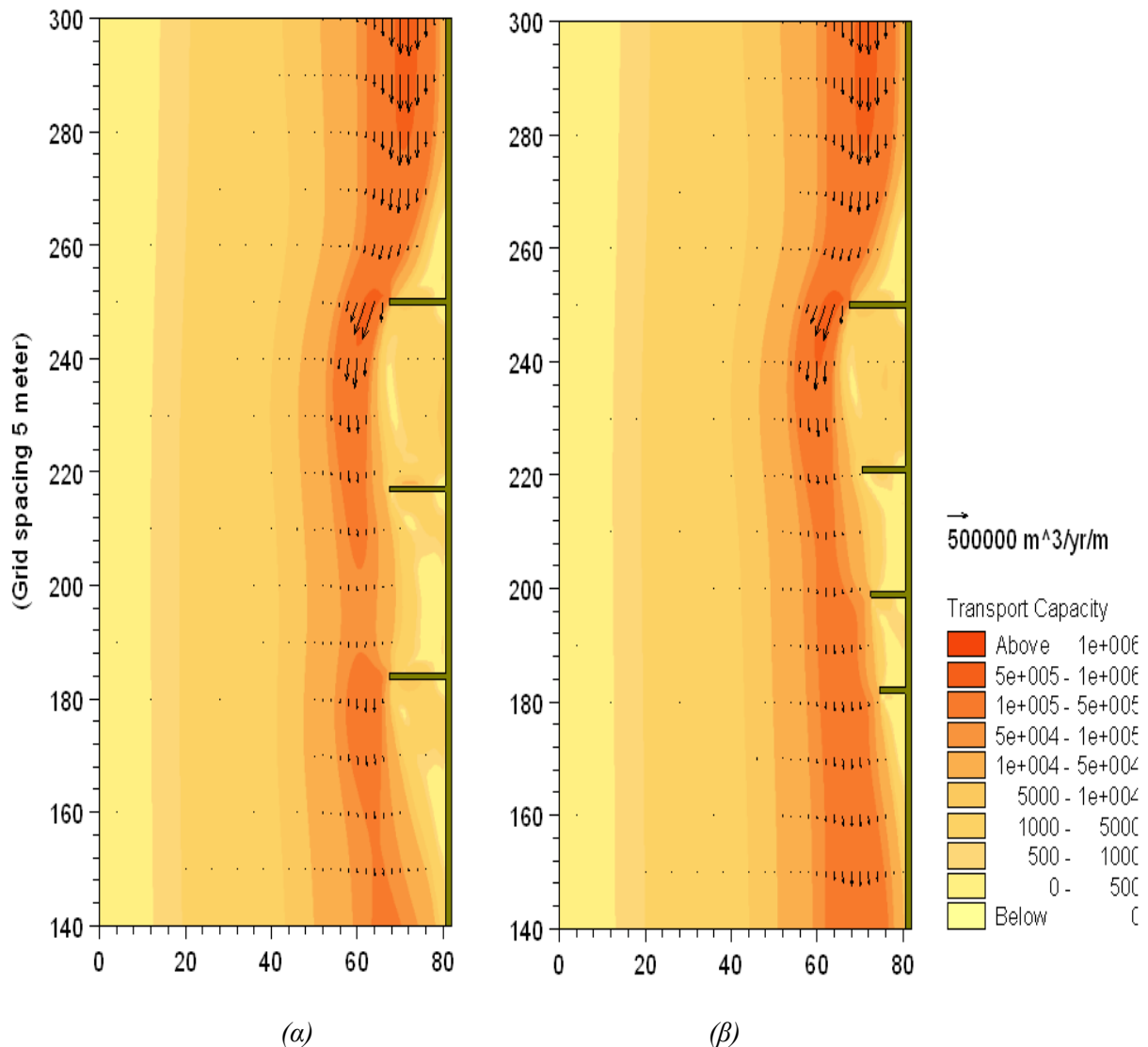


**Σχήμα 5.6:** Παράκτιο ρεύμα κατά μήκος της ακτής

(α) Σύστημα προβόλων σταθερού μήκους ( $L=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ )

(β) Σύστημα προβόλων μεταβλητού μήκους ( $L_1=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ ,  $\varphi=6^\circ$ )

Το παράκτιο ρεύμα αναμορφώνεται εξαιτίας της παρουσίας των προβόλων. Οι κατασκευές αυτές αποτελούν εμπόδια στην παράκτια ζώνη που επιδρούν στο υδροδυναμικό καθεστώς. Στα διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών προβόλων η ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος μειώνεται και αλλάζει η κατεύθυνσή της (Σχ. 5.6). Μεταβολή της ταχύτητας παρατηρείται επίσης ανάντη και κατάντη του συστήματος, σε μικρή απόσταση από τις κατασκευές.

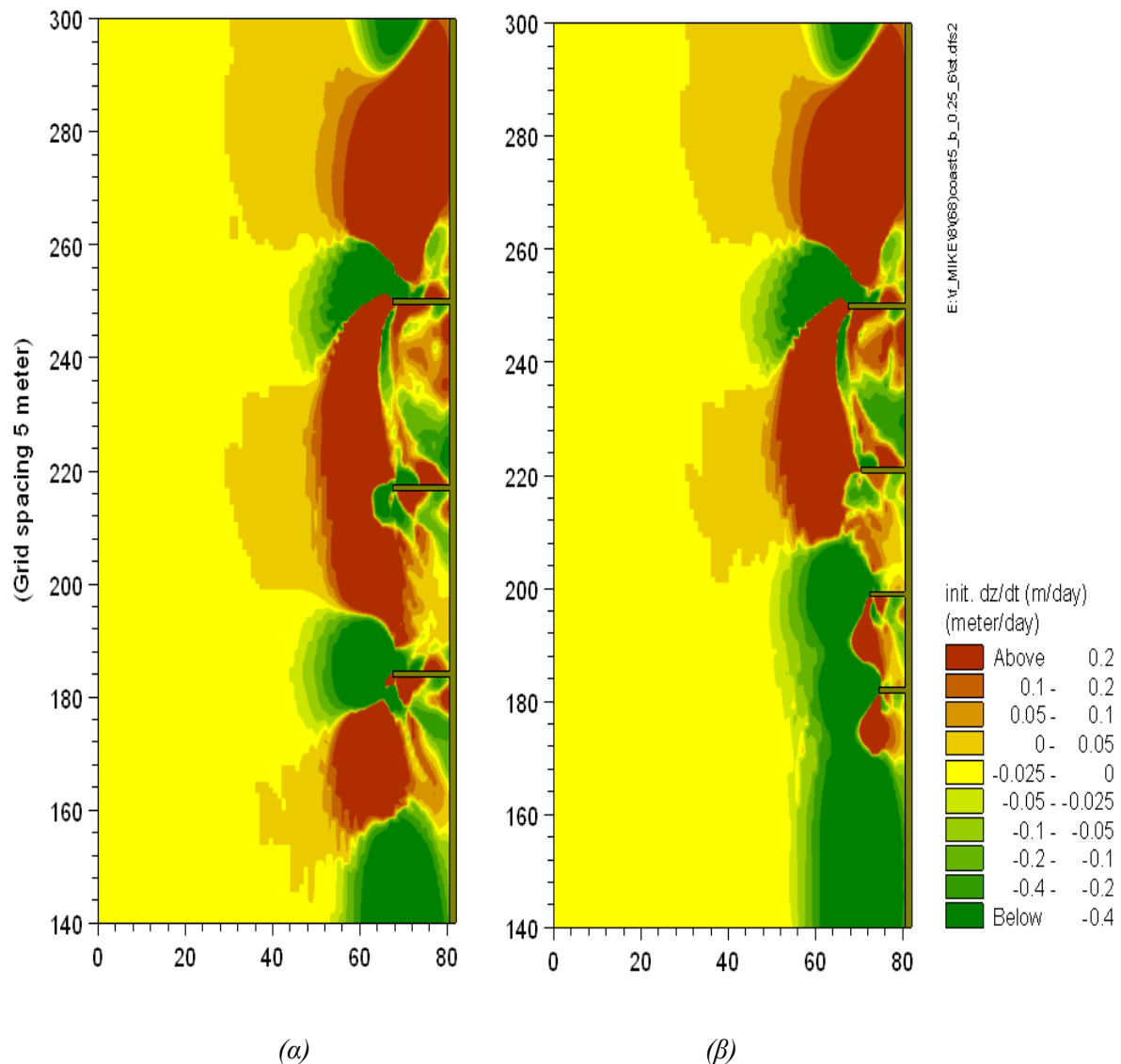


**Σχήμα 5.7:** Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

(α) Σύστημα προβόλων σταθερού μήκους ( $L=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ )

(β) Σύστημα προβόλων μεταβλητού μήκους ( $L_1=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ ,  $\varphi=6^\circ$ )

Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται η κατεύθυνση της στερεομεταφοράς για δύο διαφορετικές διατάξεις προβόλων. Από τη γραφική απεικόνιση, όπως και από τα αριθμητικά δεδομένα, είναι φανερό ότι η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά υπερισχύει της εγκάρσιας και για το λόγο αυτό άλλωστε επιλέχθηκε το σύστημα των προβόλων ως μέτρο προστασίας της ακτής από διάβρωση.



**Σχήμα 5.8:** Ρυθμός μεταβολής πυθμένα

(α) Σύστημα προβόλων σταθερού μήκους ( $L=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ )

(β) Σύστημα προβόλων μεταβλητού μήκους ( $L_1=0.8x_b$ ,  $R=2.5$ ,  $\varphi=6^\circ$ )

Στην περίπτωση του συμβατικού συστήματος προβόλων (Σχ. 5.8α) παρατηρείται σημαντική απόθεση ιζήματος στα ανοιχτά, μακριά από την ακτογραμμή. Στα άκρα των προβόλων δημιουργούνται στρόβιλοι λόγω αδράνειας της μάζας του νερού, οι οποίοι αναμορφώνουν το παράκτιο ρεύμα και εκτρέπουν μεγάλο μέρος της παράκτιας στερεομεταφοράς στα ανοιχτά. Αντιθέτως στη διάταξη του Σχήματος 5.8β ( $\varphi = 6^\circ$ ), όπου το μήκος των κατόντη προβόλων μειώνεται, αυτό το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο. Το σύστημα με τους προβόλους μεταβλητού μήκους κρίνεται πιο αποδοτικό από αυτή την άποψη, παρόλο που το μήκος της προστατευόμενης ακτής είναι λίγο μικρότερο από αυτό της πρώτης περίπτωσης.

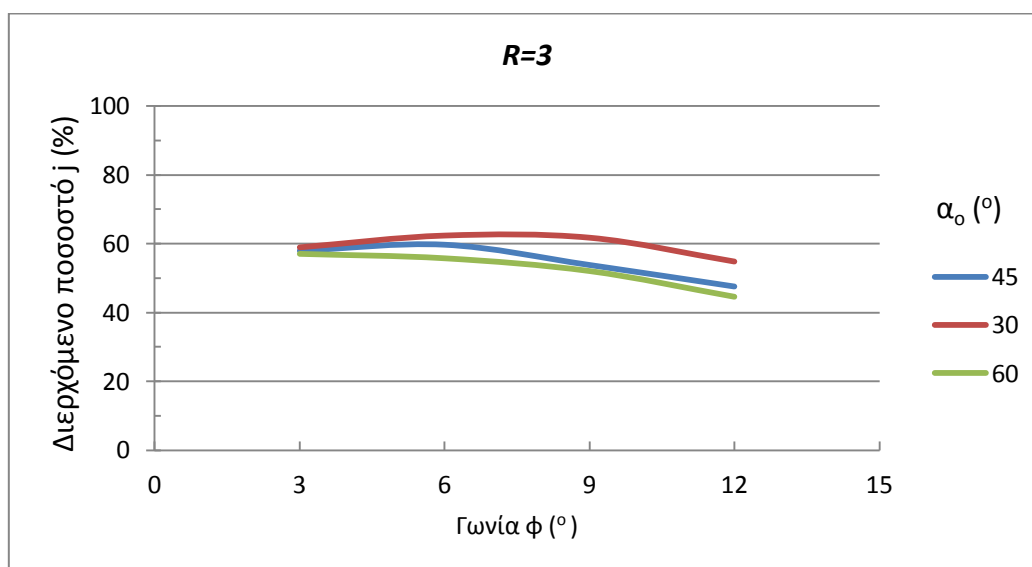
Το μοντέλο στερεομεταφοράς MIKE21 ST δεν αποτελεί ένα πλήρες μορφολογικό μοντέλο από το οποίο να προκύπτει η νέα ακτογραμμή. Από τα αποτελέσματα όμως του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι περιοχές πιθανής διάβρωσης ή απόθεσης ιζήματος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση δεν είναι ακριβή, αλλά δίνουν μια γενική εικόνα του καθεστώτος της στερεομεταφοράς που επικρατεί στην περιοχή μελέτης.

### 5.3 Σύγκριση διατάξεων για διαφορετικά κυματικά σενάρια

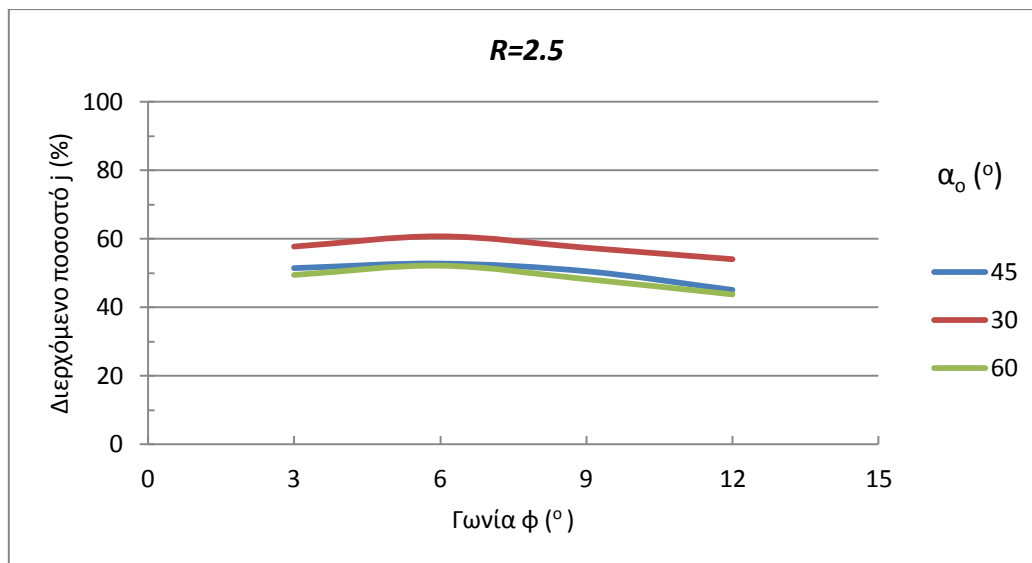
Για να μελετηθεί η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης και του ύψους κύματος στο καθεστώς στερεομεταφοράς μιας ακτής με σύστημα προβόλων, έγιναν στο MIKE21 αναλύσεις για διαφορετικά κυματικά σενάρια.

#### 5.3.1 Γωνία πρόσπτωσης

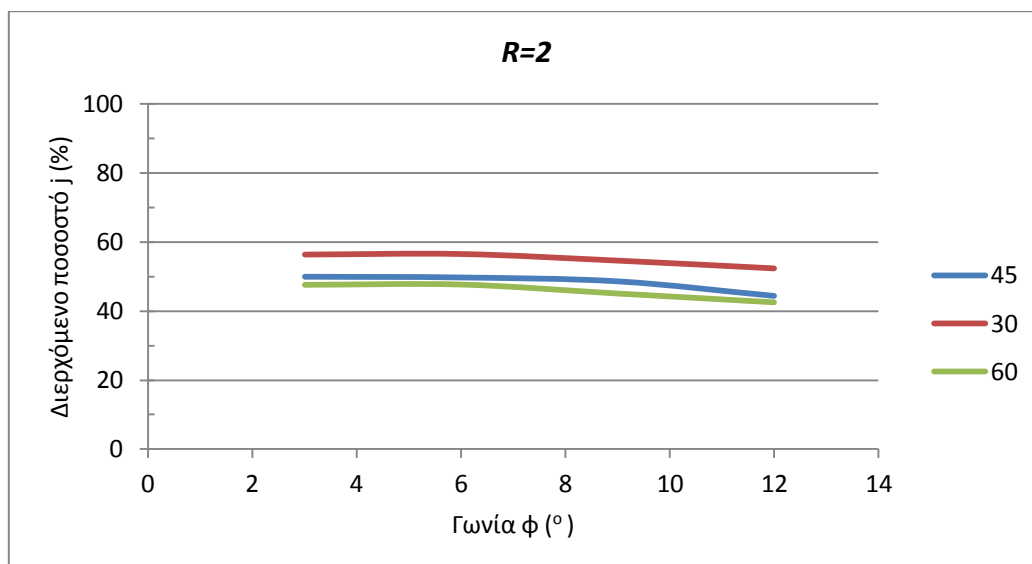
Για να μελετηθεί η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στη στερεομεταφορά μιας παράκτιας ζώνης έγιναν αναλύσεις σε μια ακτή με κλίση  $m=5\%$  και μέγεθος κόκκων ιζήματος  $D_{50}=0.25$  mm για τρία κυματικά σενάρια ίδιου ύψους ( $H_{rms,o}=2.0$  m) και περιόδου ( $T_p=7.2$  s) αλλά διαφορετικών διευθύνσεων ( $\alpha_o=45^\circ$ ,  $30^\circ$  και  $60^\circ$ ). Τα συστήματα των προβόλων σχεδιάστηκαν για μήκος πρώτου προβόλου  $L_1=0.6x_b$  και δώδεκα διαφορετικούς συνδυασμούς γωνίας  $\phi$  και λόγου  $R$ .



**Σχήμα 5.9:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  - γωνίας  $\phi$  - διεύθυνσης κυματισμών  $\alpha_o$  (λόγος απόστασης προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους:  $R=3$ )



**Σχήμα 5.10:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  - γωνίας  $\phi$  - διεύθυνσης κυματισμών  $\alpha_0$  (λόγος απόστασης προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους:  $R=2.5$ )



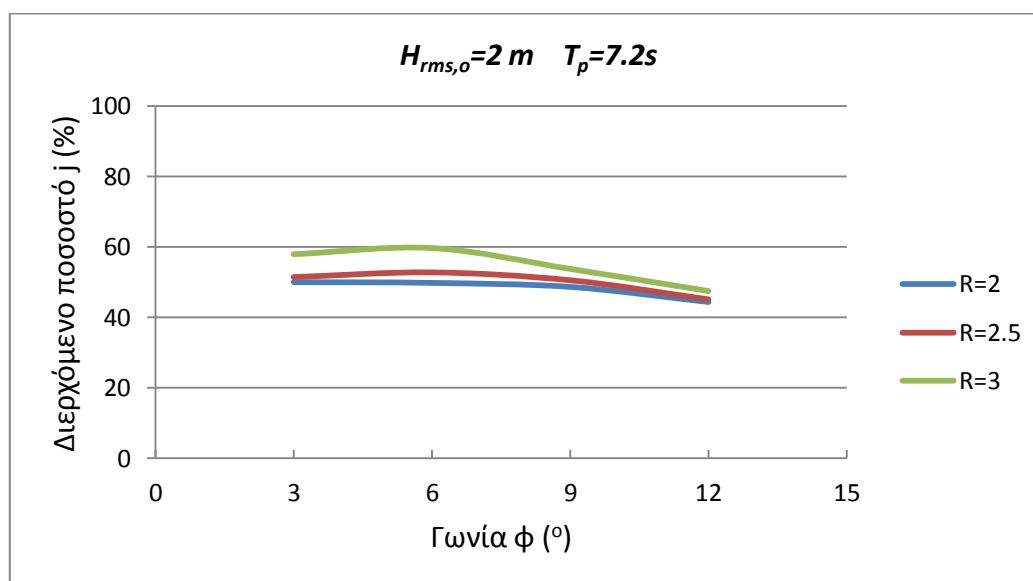
**Σχήμα 5.11:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  - γωνίας  $\phi$  - διεύθυνσης κυματισμών  $\alpha_0$  (λόγος απόστασης προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους:  $R=2$ )



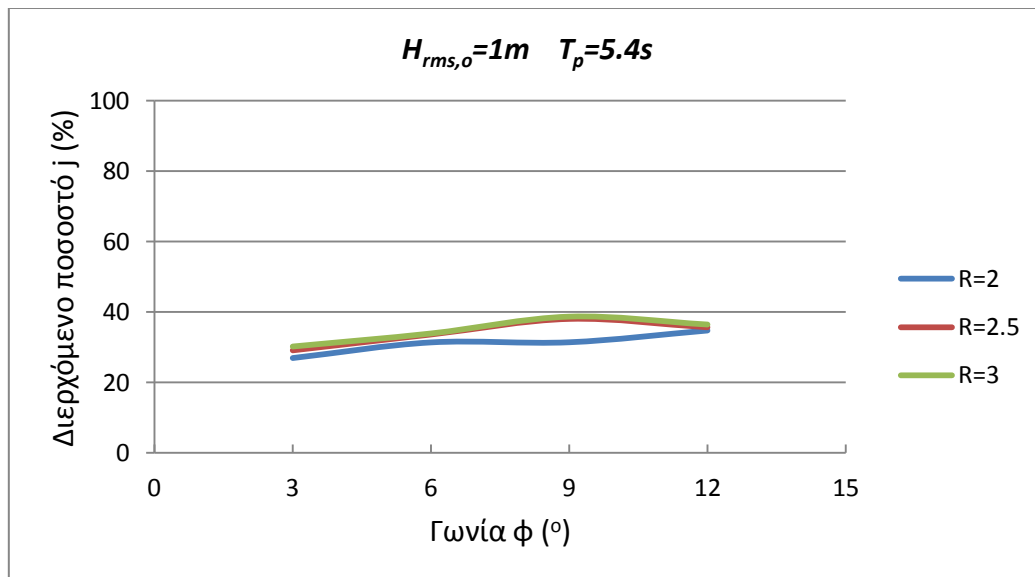
Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάταξη των προβόλων είναι διαφορετική σε κάθε κυματικό σενάριο επειδή το εύρος της ζώνης θραύσης διαφέρει στα τρία σενάρια επομένως διαφέρει και το μήκος του πρώτου προβόλου ( $L_1$ ). Στις περισσότερες περιπτώσεις η βέλτιστη τιμή της γωνίας που σχηματίζει η ακτογραμμή με την ευθεία κατά μήκος της οποίας μειώνεται το μήκος των προβόλων είναι  $\phi=6^\circ$ . Ο ρυθμός της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής μεγιστοποιείται για γωνία διάδοσης του κυματισμού  $\alpha_0=45^\circ$ , ενώ το διερχόμενο ποσοστό της στα κατάντη μεγιστοποιείται για  $\alpha_0=30^\circ$ . Όσο μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών ως προς την ακτή μειώνεται ο ρυθμός της εγκάρσιας στερεομεταφοράς. Μείωση της εγκάρσιας ανάμειξης (παράμετρος P) έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της κορυφής της κατανομής της στερεομεταφοράς προς την ανοιχτή θάλασσα (Σχ.3.6) και επομένως αύξηση του ποσοστού της στερεομεταφοράς που από τα άκρα των προβόλων στα κατάντη.

### 5.3.2 Ύψος και περίοδος κυματισμών

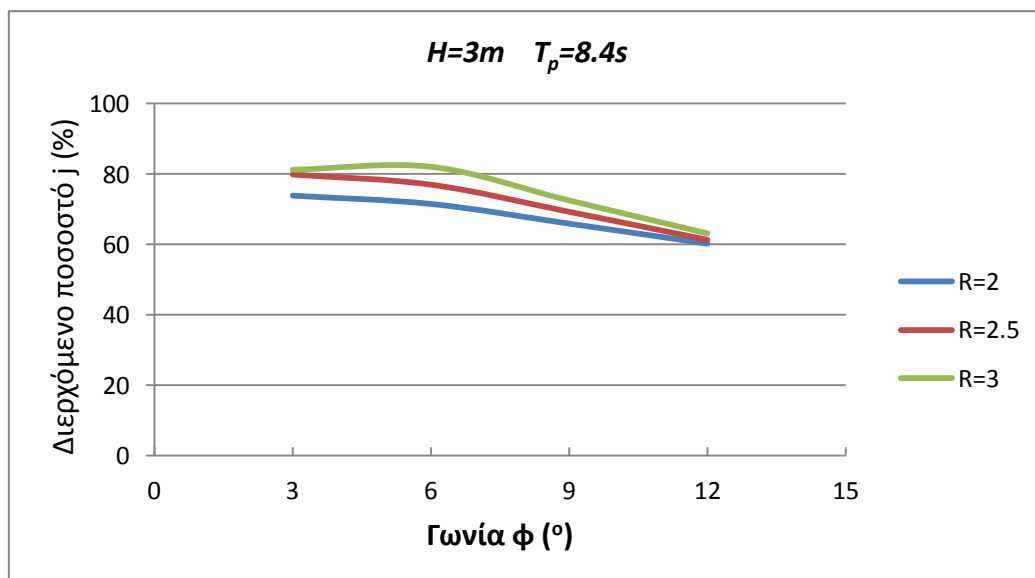
Για να μελετηθεί η επίδραση του ύψους και της περιόδου των κυματισμών στη στερεομεταφορά μιας παράκτιας ζώνης έγιναν αναλύσεις σε μια συγκεκριμένη ακτή ( $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm) για τρία διαφορετικά κυματικά σενάρια. Οι παράμετροι σχεδιασμού των συστημάτων (μήκος και αποστάσεις προβόλων) υπολογίστηκαν για μήκος πρώτου προβόλου  $L_1=0.6x_b$  και δώδεκα διαφορετικούς συνδυασμούς γωνίας  $\phi$  και λόγου R. Επειδή το εύρος της ζώνης θραύσης διαφέρει στα τρία σενάρια, η διάταξη των προβόλων είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση.



**Σχήμα 5.12:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – ύψους κυματισμού  $H_{rms}$   
(κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_0=45^\circ$ )



**Σχήμα 5.13:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – ύψους κυματισμού  $H_{rms}$   
(κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=1.0 \text{ m}$ ,  $T_p=5.4 \text{ s}$ ,  $\alpha_o=45^\circ$ )

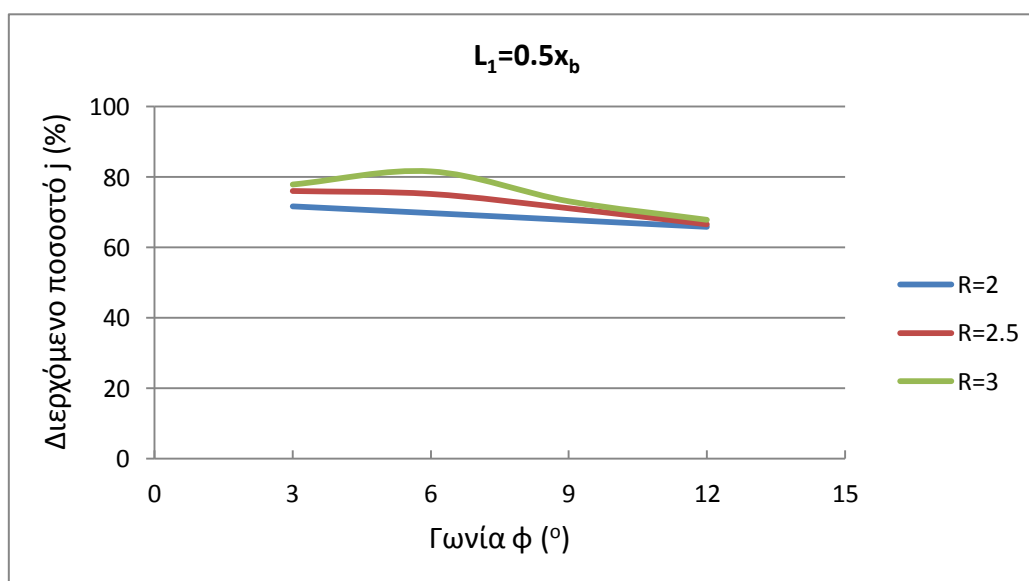


**Σχήμα 5.14:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – ύψους κυματισμού  $H_{rms}$   
(κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=3.0 \text{ m}$ ,  $T_p=8.4 \text{ s}$ ,  $\alpha_o=45^\circ$ )

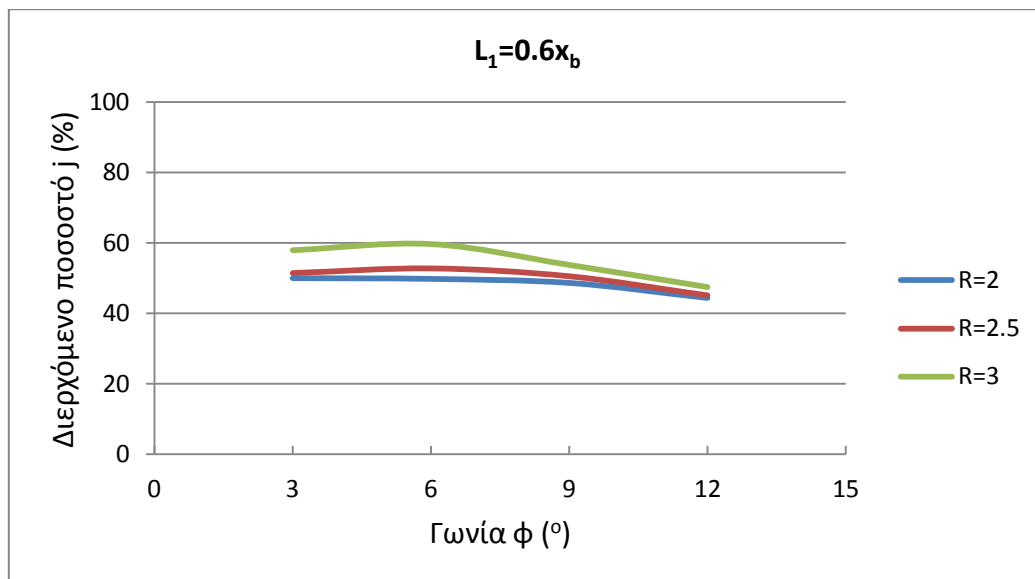
Για την ίδια τιμή του λόγου του μήκους του πρώτου προβόλου προς το πλάτος της ζώνης θραύσης ( $L_1/x_b=0.6$ ) το ποσοστό της στερεομεταφοράς που περνά κατάντη του συστήματος αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του κυματισμού. Στην περίπτωση κυματισμού μικρού ύψους και περιόδου (Σχ.5.13) για ίδια γωνία  $\phi$  αλλά διαφορετικό λόγο  $R$ , οι τιμές των ποσοστών συγκλίνουν, ενώ βέλτιστη είναι η διάταξη για γωνία  $\phi=12^\circ$ .

#### 5.4 Σύγκριση διατάξεων με διαφορετικό μήκος πρώτου προβόλου

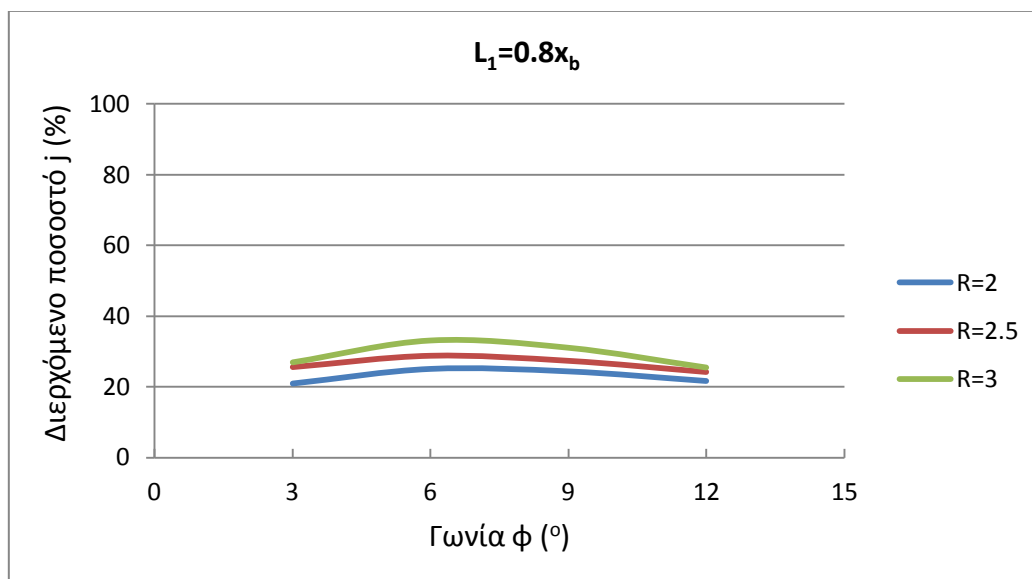
Για να μελετηθεί η επίδραση του μήκους του πρώτου προβόλου στο ισοζύγιο των φερτών υλών μιας παράκτιας ζώνης έγιναν αναλύσεις σε ακτή με κλίση με λεπτόκοκκο ίζημα ( $D_{50}=0.25$  mm) και κλίση πυθμένα 5%, για κυματισμό  $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_0=45^\circ$ . Τα συστήματα των προβόλων σχεδιάστηκαν για μήκος πρώτου προβόλου ( $L_1$ ) 50%, 60% και 80% του πλάτους της ζώνης θραύσης ( $x_b$ ).



**Σχήμα 5.15:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – μήκους πρώτου προβόλου  $L_1$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.50x_b$ )



**Σχήμα 5.16:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – μήκους πρώτου προβόλου  $L_1$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.60x_b$ )



**Σχήμα 5.17:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – μήκους πρώτου προβόλου  $L_1$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.80x_b$ )

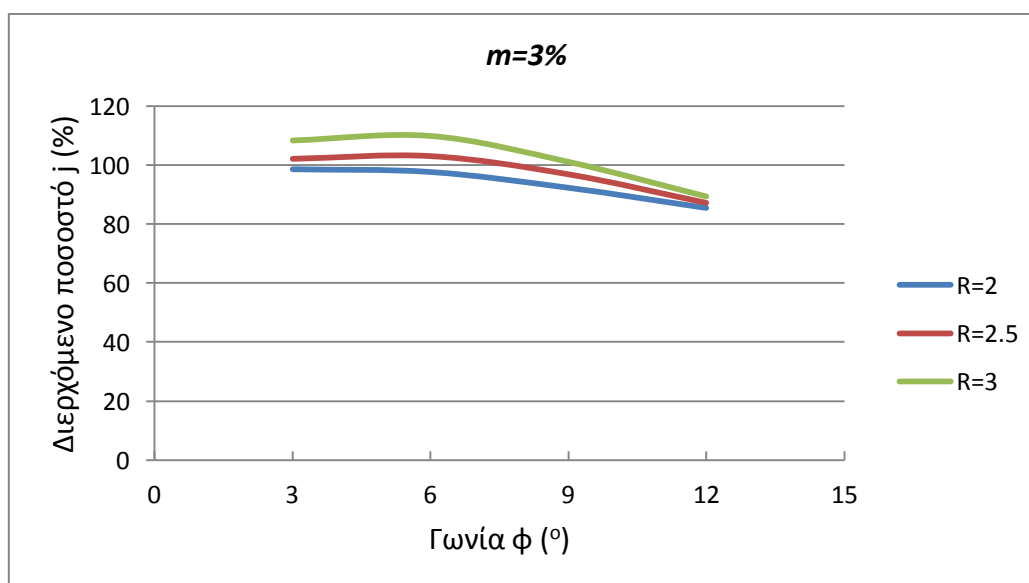
Όσο μειώνεται το μήκος του πρώτου προβόλου τόσο αυξάνεται και η ποσότητα του ιζήματος που διαφεύγει από το άκρο του αλλά και από τους υπόλοιπους προβόλους του συστήματος. Όπως αναφέρεται παρακάτω στο Κεφάλαιο 6, με δεδομένη την απαιτούμενη ποσότητα ιζήματος στα κατάντη για τον περιορισμό της διάβρωσης της παρακείμενης ακτής, επιλέγεται το αντίστοιχο μήκος του πρώτου προβόλου, το οποίο αποτελεί βασική παράμετρο στον υπολογισμό του μήκους των υπολοίπων προβόλων και το σχεδιασμό του συστήματος.

## 5.5 Σύγκριση διατάξεων σε διαφορετικές ακτές

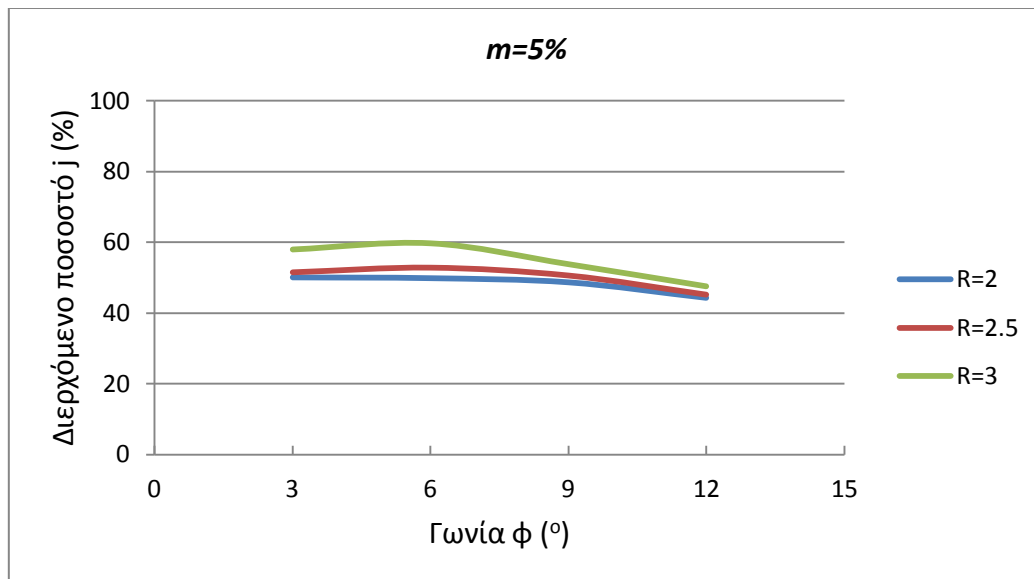
Για να μελετηθεί η επίδραση της κλίσης του πυθμένα της ακτής και του μεγέθους των κόκκων του ιζήματος στη στερεομεταφορά, έγιναν στο MIKE21 αναλύσεις για διαφορετικούς τύπους ακτών.

### 5.5.1 Κλίση πυθμένα ακτής

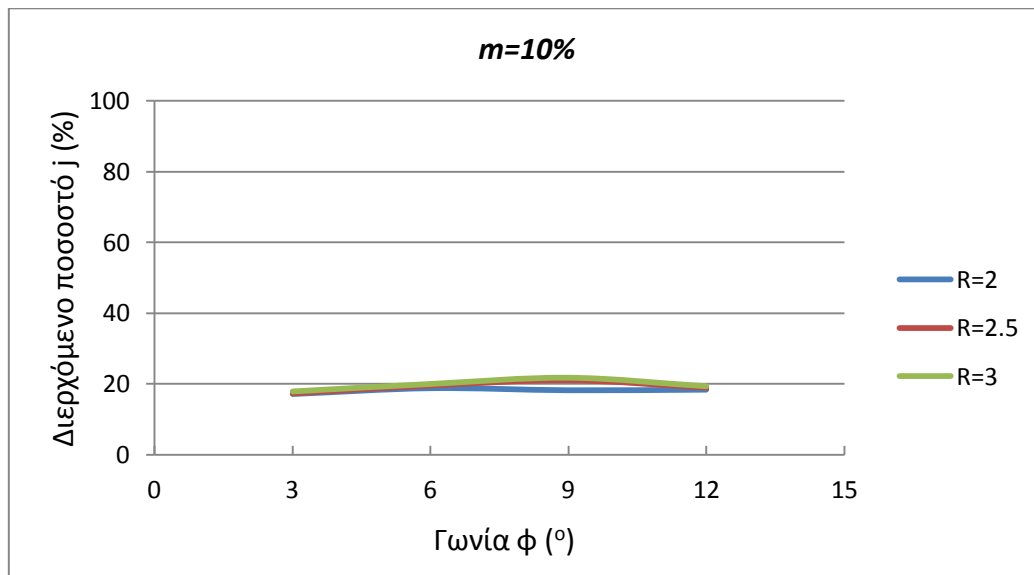
Για να μελετηθεί η επίδραση της κλίσης του πυθμένα στο καθεστώς της στερεομεταφοράς μιας παράκτιας ζώνης έγιναν αναλύσεις για κυματισμό  $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_0=45^\circ$  σε τρεις διαφορετικές ακτές, με κλίση πυθμένα 3%, 5% και 10% και μέγεθος κόκκων ιζήματος  $D_{50}=0.25$  mm. Τα συστήματα των προβόλων σχεδιάστηκαν για μήκος πρώτου προβόλου  $L_1=0.6x_b$ .



**Σχήμα 5.18:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – κλίσης ακτής  $m$   
(κλίση ακτής:  $m=3\%$ )



**Σχήμα 5.19:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – κλίσης ακτής  $m$   
(κλίση ακτής:  $m=5\%$ )

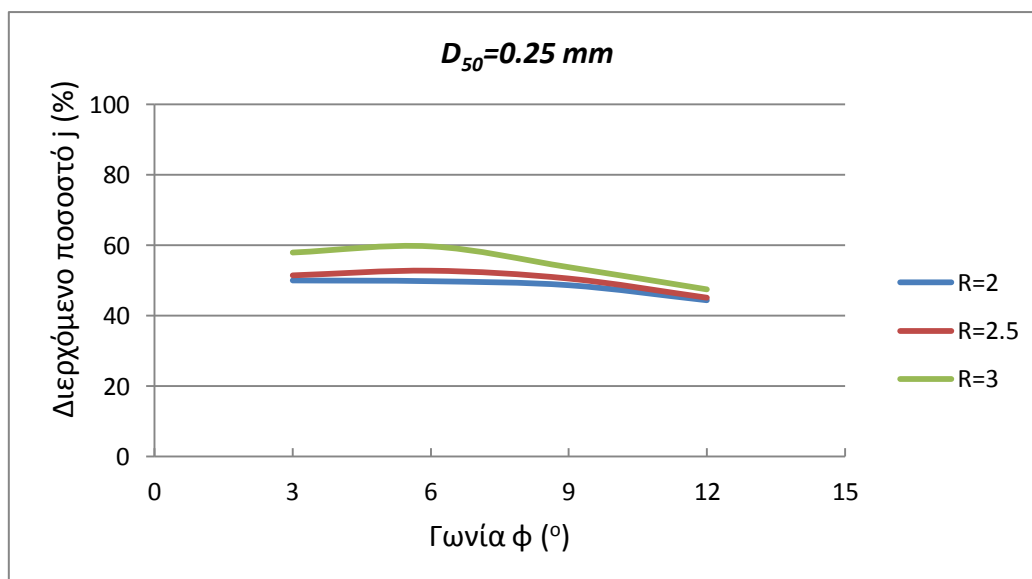


**Σχήμα 5.20:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – κλίσης ακτής  $m$   
(κλίση ακτής:  $m=10\%$ )

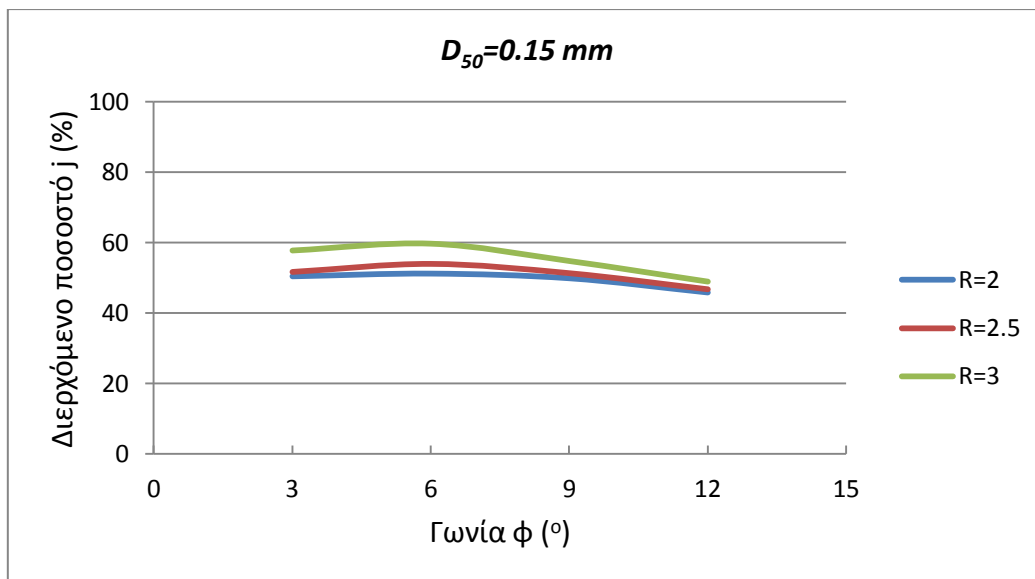
Όσο αυξάνεται η κλίση του πυθμένα της ακτής τόσο αυξάνεται ο ρυθμός της στερεομεταφοράς αλλά μειώνεται το ποσοστό που διέρχεται από το άκρο του τελευταίου προβόλου. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική κατανομή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς στις τρεις ακτές, η οποία εξαρτάται από την κλίση του πυθμένα. Σε ακτές με μεγάλη κλίση πυθμένα το μεγαλύτερο μέρος της στερεομεταφοράς γίνεται πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Αντιθέτως, σε ακτές ήπιας κλίσης η κορυφή της εγκάρσιας κατανομής της στερεομεταφοράς βρίσκεται κοντά στη θραύση. Επομένως, σε ακτές απότομης κλίσης για να περνά στα κατάντη σημαντικό ποσοστό της στερεομεταφοράς ώστε να μη διαταράσσεται η ισορροπία της παρακείμενης ακτής, πρέπει να κατασκευάζονται πρόβολοι μικρότερου μήκους από τους αντίστοιχους σε ακτές ήπιας κλίσης.

### 5.5.2 Ίζημα πυθμένα

Τα παρακάτω διαγράμματα (Σχ.5.21 και 5.22) προέκυψαν από αναλύσεις σε μια ακτή κλίσης  $m=5\%$ , όπου το μήκος του πρώτου προβόλου είναι  $L_1=0.6x_b$ .



**Σχήμα 5.21:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – μεγέθους κόκκων ιζήματος  $D_{50}$   
( μέση διάμετρος κόκκων:  $D_{50}=0.25 \text{ mm}$ )



**Σχήμα 5.22:** Διάγραμμα ποσοστού  $j$  – γωνίας  $\phi$  – μεγέθους κόκκων ιζήματος  $D_{50}$   
(μέση διάμετρος κόκκων:  $D_{50}=0.15 \text{ mm}$ )

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 5.21 και 5.22 φαίνεται ότι το διερχόμενο ποσοστό της στερεομεταφοράς στα κατάντη δεν εξαρτάται από το μέγεθος του κόκκου του ιζήματος του πυθμένα και οι τιμές στις δύο περιπτώσεις είναι παραπλήσιες. Ο ρυθμός της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής είναι μεγαλύτερος στην περιοχή με το πιο λεπτόκοκκο ίζημα ( $D_{50}=0.15 \text{ mm}$ ), αλλά η εγκάρσια κατανομή της στερεομεταφοράς στη ζώνη θραύσης είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις.



## Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα

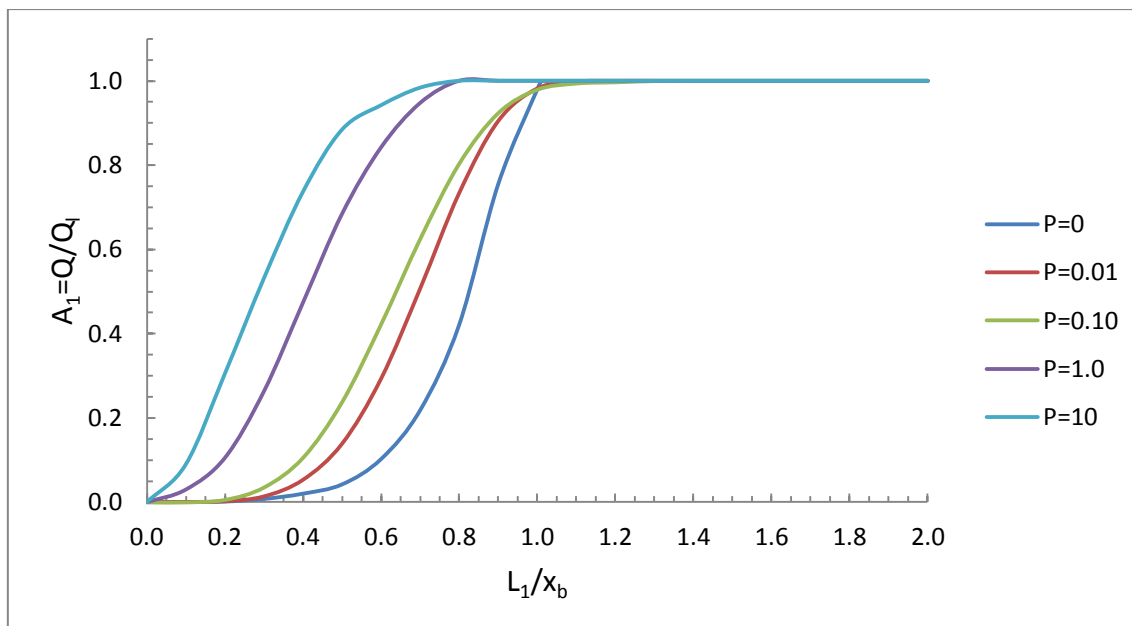
Η επιλογή του τύπου ενός παράκτιου τεχνικού έργου για την προστασία ακτής από διάβρωση εξαρτάται από φυσικά κριτήρια, όπως ο μηχανισμός διάβρωσης, το υδροδυναμικό και κυματικό καθεστώς της περιοχής, ο τύπος της ακτής και των ιζημάτων, καθώς επίσης και από περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες.

Ένα σύστημα προβόλων θεωρείται κατάλληλο έργο για την προστασία μιας παράκτιας ζώνης με ευθύγραμμη ακτογραμμή μεγάλου μήκους. Επίσης, βασικό κριτήριο για την επιλογή των προβόλων είναι η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά να υπερισχύει σημαντικά της εγκάρσιας. Με την κατασκευή ενός τέτοιου έργου διαταράσσεται η ισορροπία της ακτής προκαλώντας πολλές φορές σημαντική διάβρωση της ακτογραμμής κατάντη αυτού. Ένα από τα μέτρα που προτείνονται για τον περιορισμό της κατάντη διάβρωσης στο ελάχιστο είναι η κατασκευή ενός συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους αντί του συμβατικού με ισομήκεις προβόλους. Στην περίπτωση του μη συμβατικού συστήματος προβόλων το μήκος των κατασκευών μειώνεται σταδιακά προς τα κατάντη, με αποτέλεσμα να διαφεύγει μεγαλύτερη ποσότητα ιζήματος στην παρακείμενη κατάντη ακτή και το ισοζύγιο των φερτών να διαταράσσεται σε μικρότερο βαθμό.

Για το σχεδιασμό ενός συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους, όπως και στην περίπτωση του συμβατικού συστήματος, αρχικά είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των ρυθμών της εγκάρσιας και της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς. Εκτός από τους ρυθμούς στερεομεταφοράς, είναι σημαντικό να εξετασθεί ποια είναι η επικρατέστερη φορά της μεταφοράς των ιζημάτων παράλληλα στην ακτογραμμή, για να σχεδιαστεί το σύστημα έτσι ώστε το μήκος των προβόλων να μειώνεται σταδιακά προς τα κατάντη. Για το λόγο αυτό συλλέγονται στοιχεία για το κυματικό κλίμα της περιοχής μελέτης και η ανάλυση του ισοζυγίου της στερεομεταφοράς γίνεται με βάση ένα ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των διαφόρων κυματικών συνθηκών και τον υπολογισμό του αθροίσματος  $\sum_{i=1}^N Q_{ii} f_i$ , όπου  $i=1, 2, \dots, N$  τα διάφορα κυματικά σενάρια ( $H_{si}, \alpha_{bi}$ ),  $Q_{ii}$  ο αντίστοιχος ετήσιος ρυθμός στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής, με πρόσημο ανάλογο με τη φορά κίνησης, και  $f_i$  η συχνότητα εμφάνισης της κατάστασης (Κουτίτας, 1998). Με στατιστική ανάλυση του κυματικού κλίματος γίνεται και ο καθορισμός της ζώνης θραύσης, στοιχείο απαραίτητο για να ορισθεί το απαιτούμενο μήκος του μεγαλύτερου προβόλου του συστήματος.

Το μήκος του πρώτου ανάντη προβόλου, το οποίο συνιστάται να είναι μικρότερο από το πλάτος της ζώνης θραύσης -ώστε να μην εγκλωβίζεται μεγάλη ποσότητα ιζήματος ανάντη του συστήματος, να μην εμφανίζεται έλλειμμα στο ισοζύγιο των φερτών και να περιορίζεται η διάβρωση κατάντη- υπολογίζεται ανάλογα με το ποσοστό της στερεομεταφοράς που πρέπει να περνά στα κατάντη του συστήματος. Το ποσοστό αυτό προκύπτει από την ποσότητα του ιζήματος που απαιτείται ώστε να μην διαταράσσεται η ισορροπία της παρακείμενης ακτής. Κάθε παράκτια ζώνη είναι μοναδική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες, όπως χρήσεις παράκτιας ζώνης, μορφολογία ακτής κλπ, για να γίνει εκτίμηση της ποσότητας του ιζήματος που πρέπει να περνά κατάντη ώστε να μην εμφανίζεται έλλειμμα στο ισοζύγιο των φερτών και επομένως να περιορίζεται η κατάντη διάβρωση. Για παράδειγμα, σε μια αμμώδη ακτή κολύμβησης με ευθύγραμμη ακτογραμμή μεγάλου μήκους η απαιτούμενη ποσότητα ιζήματος είναι αρκετά μεγάλη, ενώ σε έναν κόλπο όπου κατάντη υπάρχει βραχώδες ακρωτήριο μπορεί να είναι μικρότερη. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον ακριβή υπολογισμό αυτής της ποσότητας αλλά γίνεται εκτίμηση κάθε φορά από τον μελετητή, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Η μελέτη των υδροδυναμικών συνθηκών και του καθεστώτος της στερεομεταφοράς, καθώς και η ποσοτική ανάλυση του ισοζυγίου των φερτών κατά τη διάρκεια ενός έτους αποτελούν σημαντικά στοιχεία για την εκτίμηση της απαιτούμενης ποσότητας ιζήματος και του ποσοστού της μέσης στερεομεταφοράς που πρέπει να περνά κατάντη του συστήματος των προβόλων.

Άλλο σημαντικό στοιχείο για το σχεδιασμό του συστήματος των προβόλων και τον καθορισμό του μήκους του πρώτου προβόλου είναι η κατανομή της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς στη ζώνη θραύσης, η οποία προκύπτει από το προφίλ του κατά μήκος της ακτής ρεύματος στην υπό μελέτη παράκτια ζώνη και εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από την κλίση και τη μορφολογία του πυθμένα (Εξ.1.7). Γνωρίζοντας την κατανομή της στερεομεταφοράς εγκάρσια στην ακτή υπολογίζεται η αντίστοιχη αθροιστική καμπύλη ως συνάρτηση της απόστασης από της ακτογραμμή. Από το διάγραμμα της αθροιστικής καμπύλης της στερεομεταφοράς (Σχ.6.1) και με δεδομένο το απαιτούμενο ποσοστό ( $j_1$ ) που πρέπει να περνά από τον πρώτο πρόβολο και αυτό που συγκρατείται ανάντη αυτού ( $A_1=1- j_1$ : άξονας  $y$  – Σχ.6.1) προκύπτει το μήκος αυτού συναρτήσει του πλάτους της ζώνης θραύσης (άξονας  $x$  – Σχ.6.1). Το ποσοστό ( $j_1$ ) της στερεομεταφοράς που περνά από τον πρώτο πρόβολο πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερο, περίπου 1.5 φορά, από το ποσοστό ( $j$ ) που απαιτείται στα κατάντη.



**Σχήμα 6.1:** Αθροιστική καμπύλη κατανομής στερεομεταφοράς κατά μήκος ακτής για διάφορες τιμές της παραμέτρου ανάμειξης  $P$

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αναλύσεις με το υπολογιστικό μοντέλο MIKE21 του DHI. Έχοντας κάνει εκτίμηση του απαιτούμενου διερχόμενου ποσοστού  $j$  στα κατάντη και γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη ακτής, όπως κλίση και ίζημα πυθμένα καθώς και το κυματικό καθεστώς, επιλέγεται ο βέλτιστος συνδυασμός μήκους πρώτου προβόλου  $L_1$ , γωνίας  $\varphi$  μεταξύ της ακτογραμμής και της ευθείας που συνδέει τις κεφαλές των προβόλων και του λόγου  $R$  της απόστασης μεταξύ διαδοχικών προβόλων προς το ημίθροισμα του μήκους τους. Για την επιλογή αυτών των παραμέτρων, οι οποίες είναι βασικές για το σχεδιασμό ενός συστήματος προβόλων μεταβλητού μήκους, πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μήκος της υπό προστασία ακτής ώστε το σύστημα που θα σχεδιαστεί να την καλύπτει. Με δεδομένες πλέον τις τρεις παραμέτρους  $L_1$ ,  $\varphi$  και  $R$  υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$L_i = \left[ \frac{1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi}{1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi} \right]^{i-1} L_1$$

και

$$S_i = R \frac{\left[1 - \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi\right]^{i-1}}{\left[1 + \left(\frac{R}{2}\right) \tan \varphi\right]^i} L_1$$

που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2, τα μήκη των προβόλων του συστήματος και οι μεταξύ τους αποστάσεις αντίστοιχα, και σχεδιάζεται το σύστημα των προβόλων.

Τέλος, όσον αφορά την τοποθέτηση επί της ακτής ενός συστήματος προβόλων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μήκος της ακτής που υφίσταται διάβρωση και πρόκειται να προστατευθεί. Απόθεση ιζήματος δεν συμβαίνει μόνο στις περιοχές μεταξύ των προβόλων αλλά και σε μια έκταση ανάντη του συστήματος, το μήκος της οποίας μπορεί να είναι ακόμα και δεκαπλάσιο του μήκους των κατασκευών.

## Βιβλιογραφία

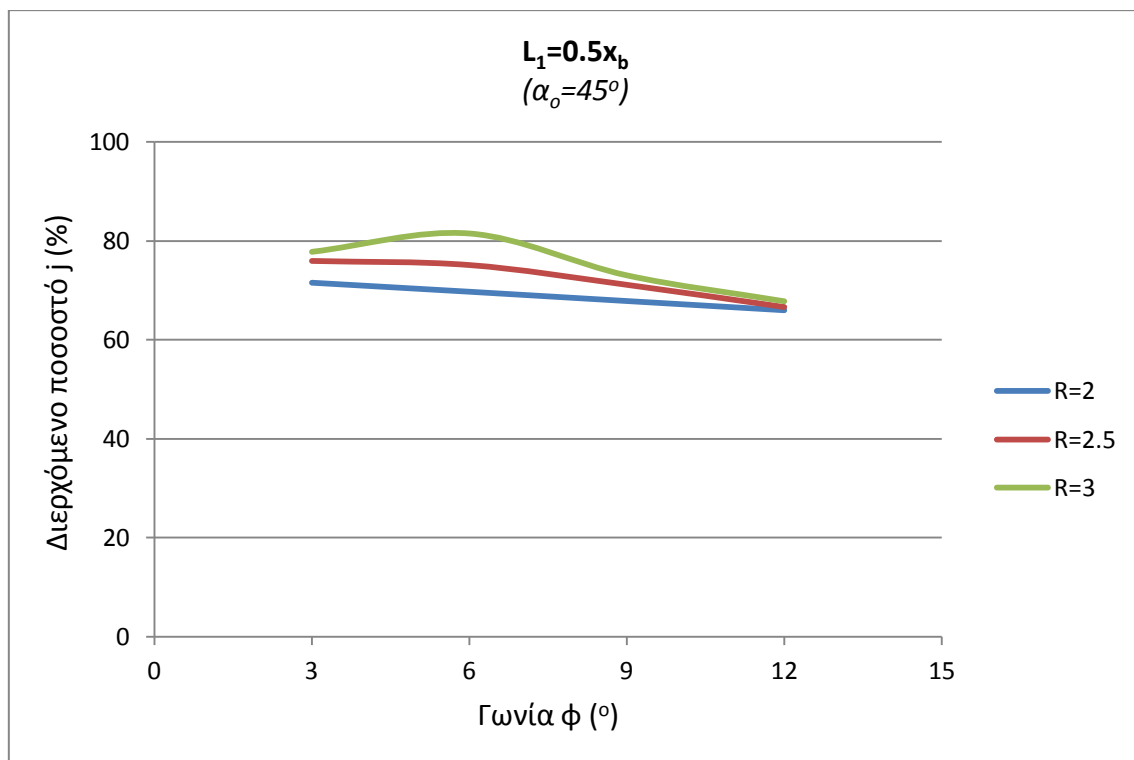
---

- American Society of Civil Engineers (ASCE), 1994. *Coastal Groins and Nearshore Breakwaters*. ASCE, New York.
- Battjes J.A. and Janssen J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, 569-587.
- Berkhoff J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. In *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering*, Vancouver, 471-490.
- Bruun P., 1952. Measures Against Erosion at Groins and Jetties. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on Coastal Engineering*, Cambridge.
- Δουκάκης Ε., 2007. *Μέθοδοι Προσδιορισμού του Ρυθμού Μεταβολής των Ακτογραμμών*. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Dean R.G. and Dalrymple R.A., 1984. *Water Mechanics for Engineers and Scientist*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- DHI, 2007. *User Guide and Reference Manual*. Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.
- Kamphuis W., 1991. Alongshore Sediment Transport Rate. *Journal of Waterway Port Coastal and Oceanic Engineering* Vol. 117 No. 6: 624-640.
- Kamphuis W., 2010. *Introduction to Coastal Engineering and Management (2<sup>nd</sup> Edition)*. World Scientific, Singapore.
- Kirby J.T., 1986. Rational Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves. *Coastal Engineering* Vol. 10: 355-378.
- Κονισπολιάτης Ν., 2009. *Σημειώσεις στο μάθημα Παράκτιο Περιβάλλον*. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κουτίτας Χρ., 1998. *Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα*. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Kressner B., 1928. Tests with Scale Models to Determine the Effect of Currents and Breakers upon a Sandy Beach, and the Advantageous Installation of Groins. *The Technical High School of the Free City of Danzing, Construction Methods* Vol.25

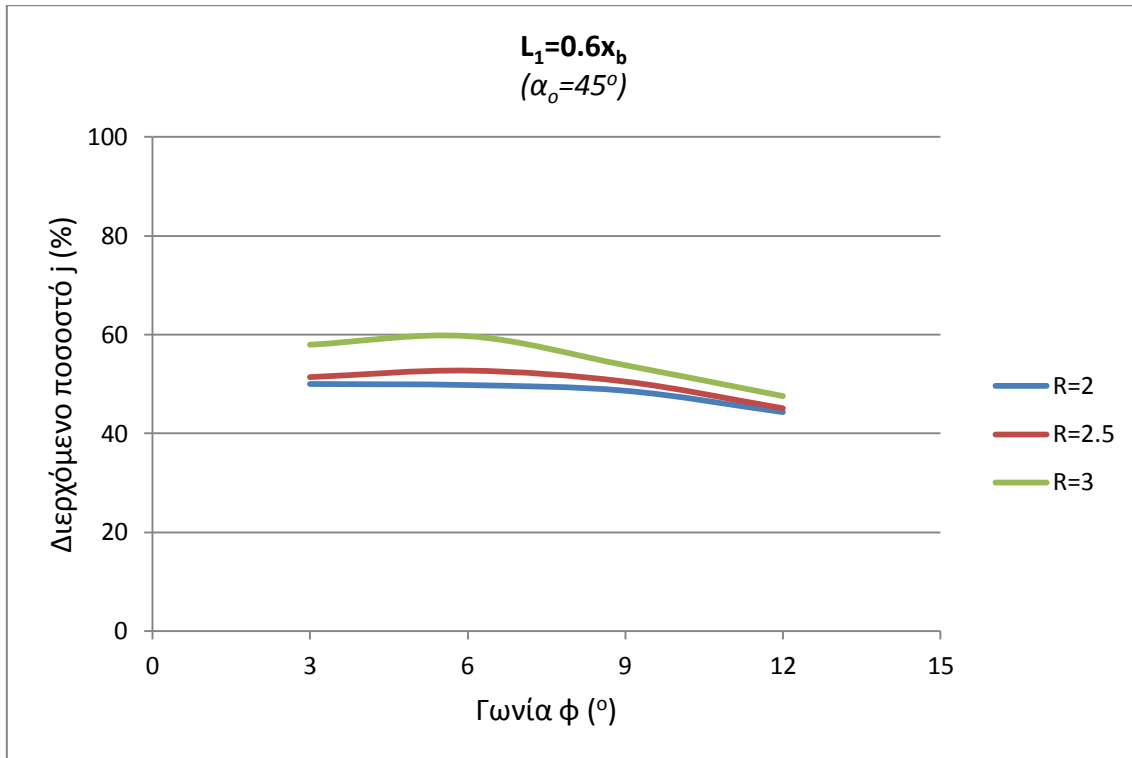
- Longuet-Higgins M.S., 1970a. Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves 1. *Journal of Geophysical Research* Vol. 75 No 33: 6790-6801.
- Longuet-Higgins M.S., 1970b. Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves 2. *Journal of Geophysical Research* Vol. 75 No 33: 6790-6801.
- Memos C.D., 2009. *Shoreline Erosion Management*. International Post-graduate Course “Educate”. WREM 404, Athens.
- Μουτζούρης Κ.Ι., 2005. *Εισαγωγή στην Ακτομηχανική*. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παναγιωτίδης Π., & Χατζημήτρος Κ., 2004. *Παράκτια Οικοσυστήματα και Ανθρωπογενείς Πιέσεις στις Ακτές*. ΕΛΚΕΘΕ, Αθήνα.
- Reeve D., Chadwick A. and Fleming C., 2004. *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*. Spon, New York.
- Silvester R. and Hsu J., 1997. *Coastal Stabilization: Innovative Concepts*. World Scientific, Singapore.
- Stive M.J.F. and Battjes J.A., 1984. A Model for Offshore Sediment Transport. *19<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, Houston
- Thornton E.B. and Guza R.T., 1982. Energy Saturation and Phase Speeds Measured on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research* Vol. 87 No. C12: 9499–9508.
- USACE (US Army Corps of Engineers), 2006. *Coastal Engineering Manual (CEM)*.

## Παράρτημα Α. Διαγράμματα Αποτελεσμάτων MIKE21

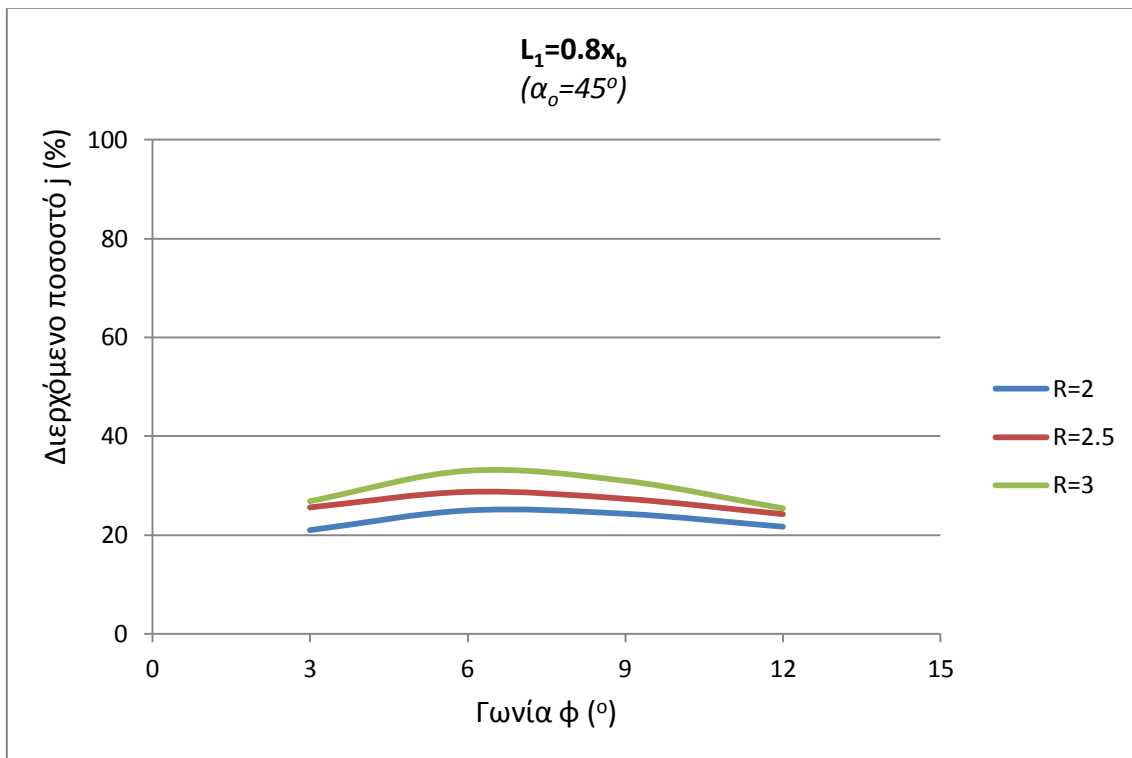
Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις του υπολογιστικού μοντέλου MIKE21 ST. Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται το ποσοστό της στερεομεταφοράς που περνά στα κατάντη ενός συστήματος τεσσάρων προβόλων, συναρτήσει της γωνίας ( $\phi$ ) που σχηματίζει η ευθεία που συνδέει τα άκρα των προβόλων με την ακτογραμμή και του λόγου ( $R$ ) της απόστασης δύο διαδοχικών προβόλων προς το ημιάθροισμα του μήκους τους. Κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό κυματικό σενάριο, ακτή και μήκος πρώτου προβόλου του συστήματος.



**Σχήμα Α.1:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$ ,  $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.5x_b$ )

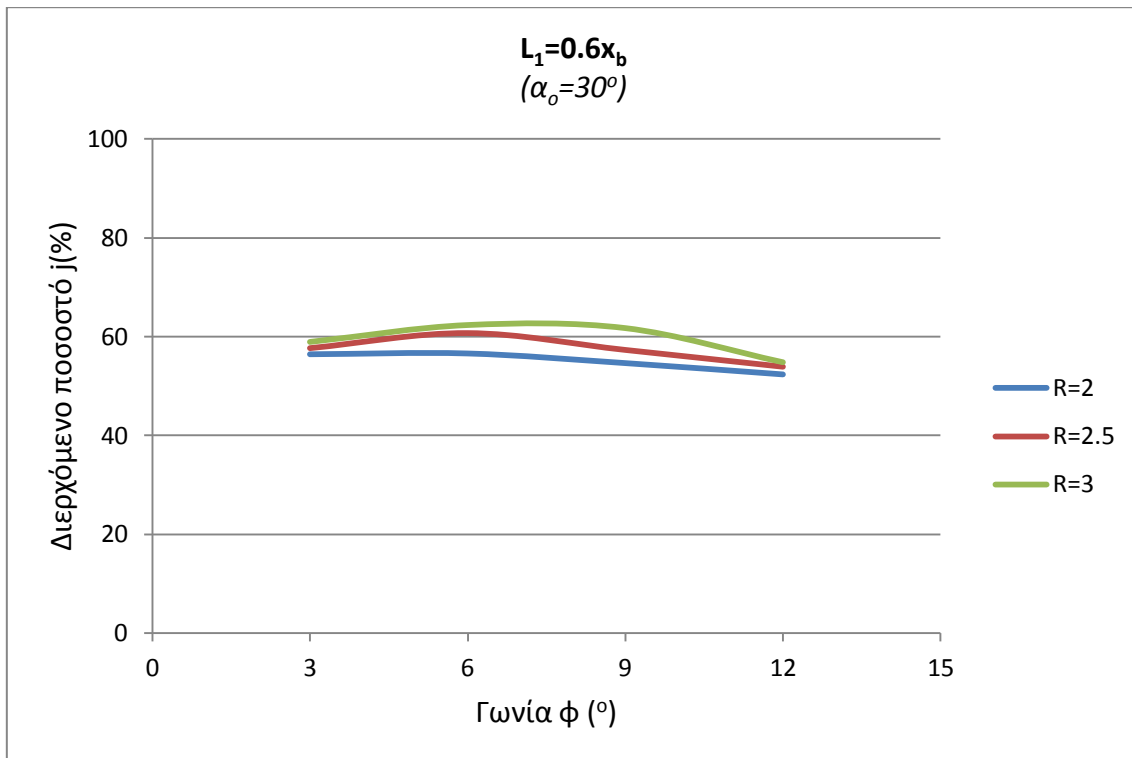


**Σχήμα Α.2:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )

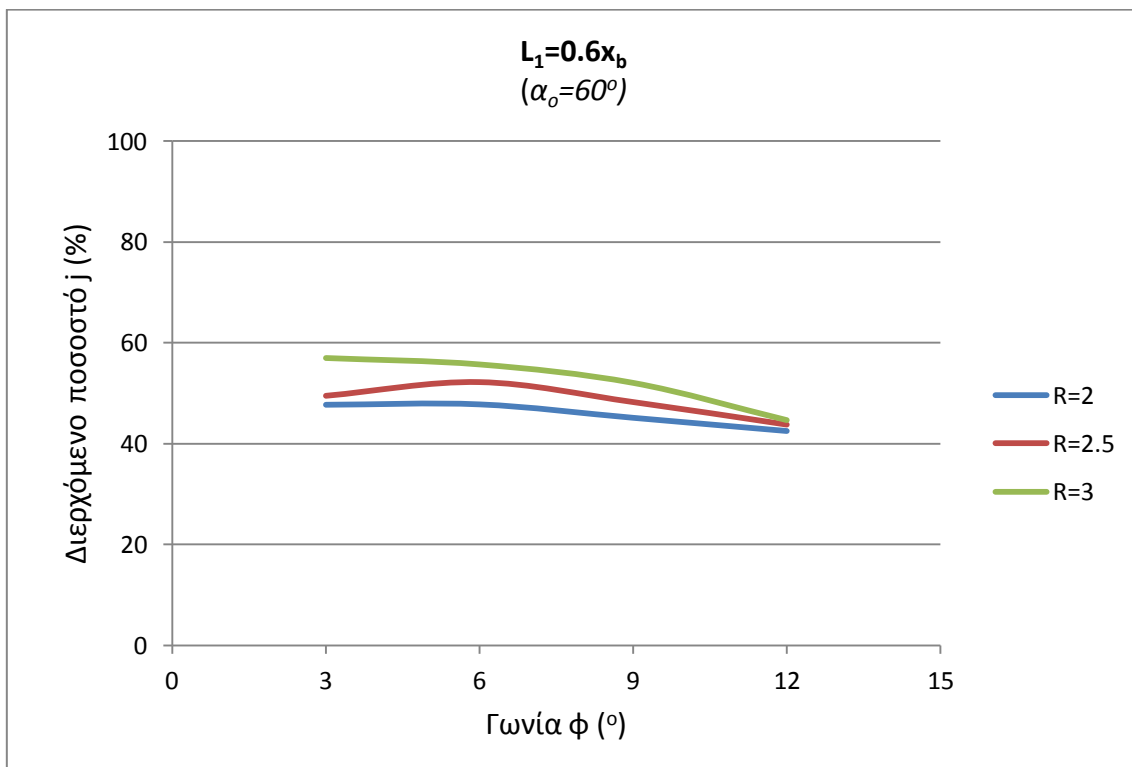


**Σχήμα Α.3:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.8x_b$ )

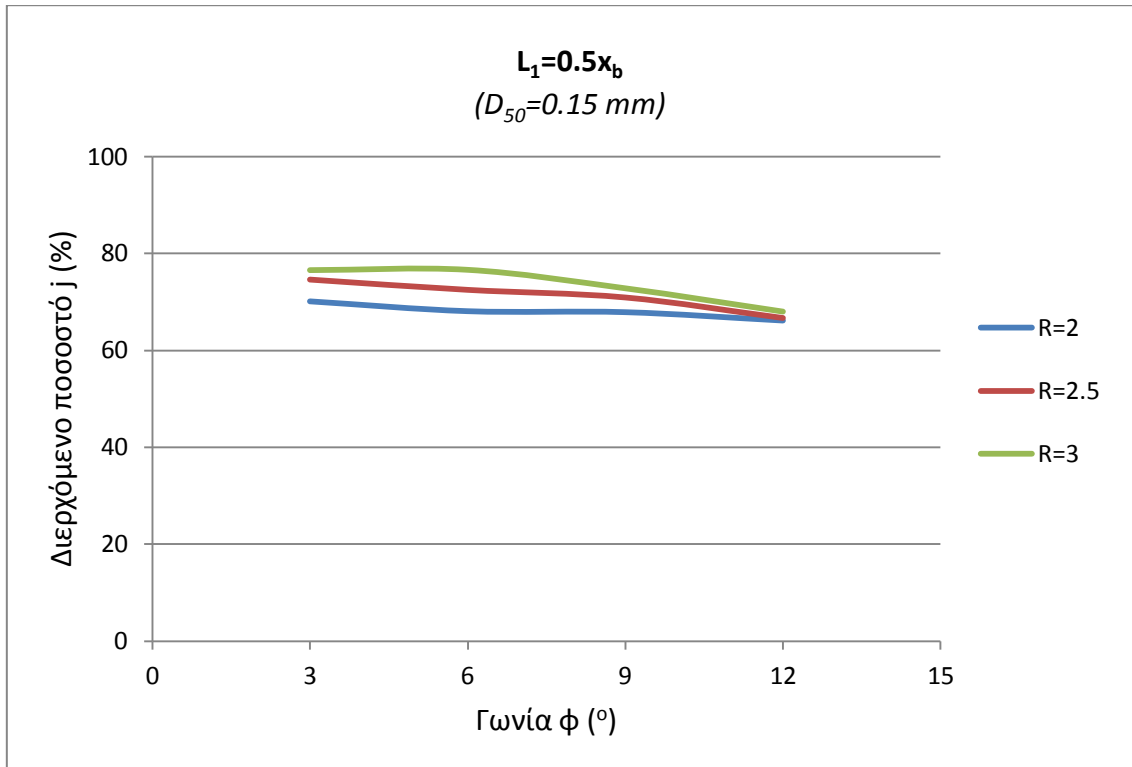




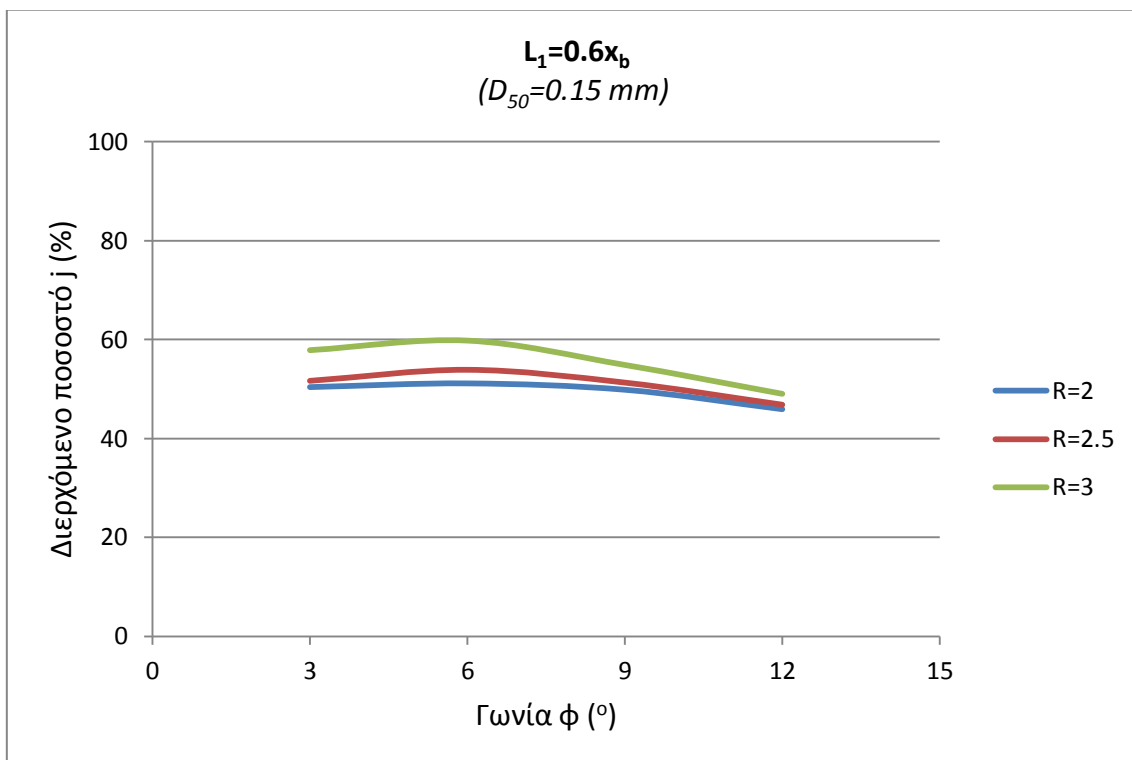
**Σχήμα Α.4:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$ ,  $\alpha_o=30^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



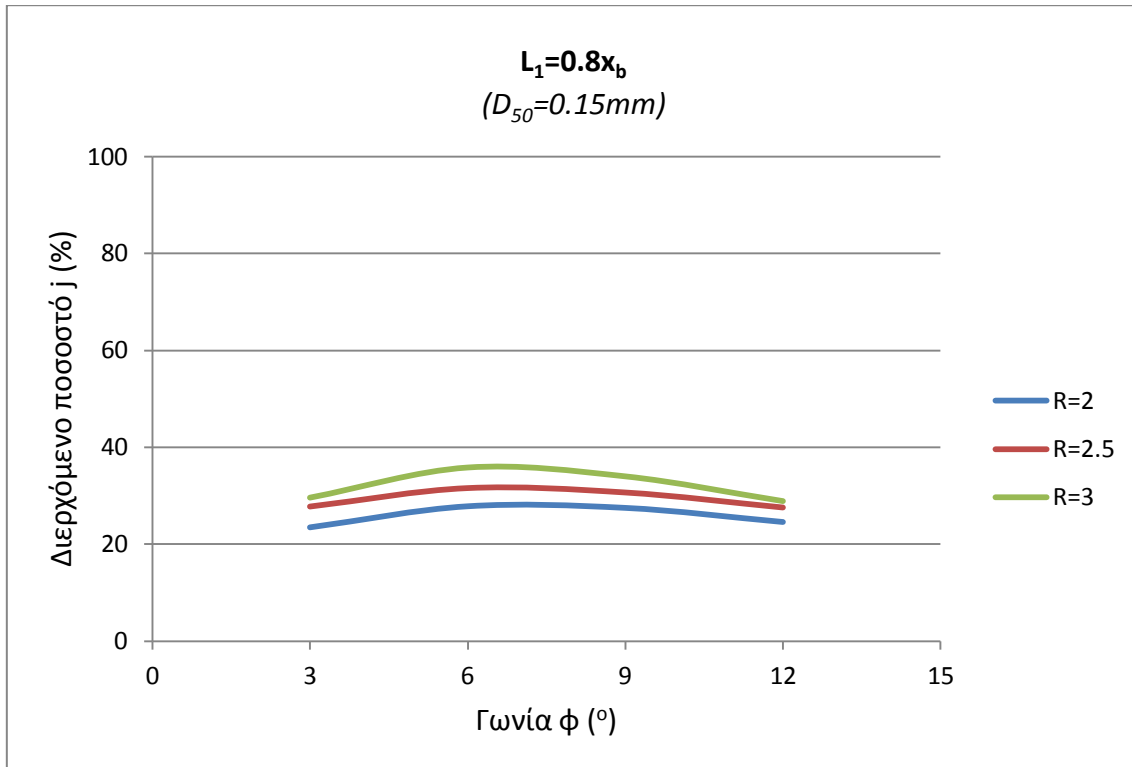
**Σχήμα Α.5:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25\text{mm}$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$ ,  $\alpha_o=60^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



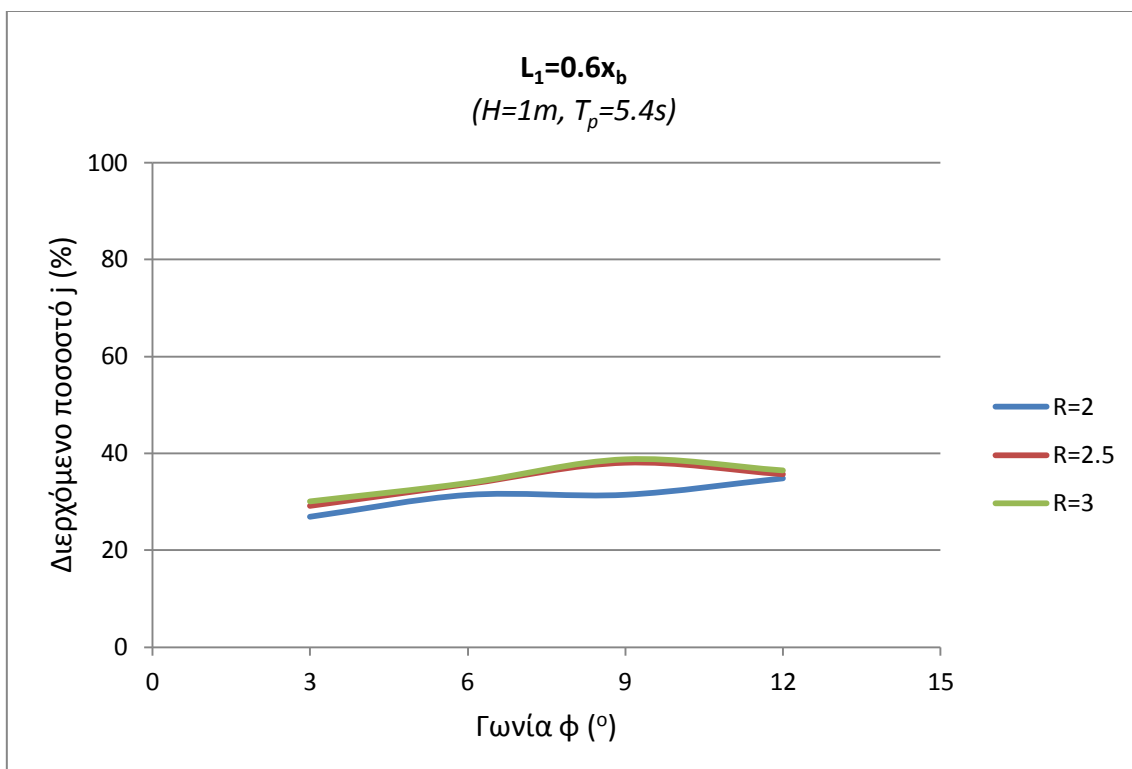
**Σχήμα Α.6:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.15\text{mm}$ /Κυματισμός  $H_{rms}=2.0 \text{ m}$ ,  $T_p=7.2 \text{ s}$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.5x_b$ )



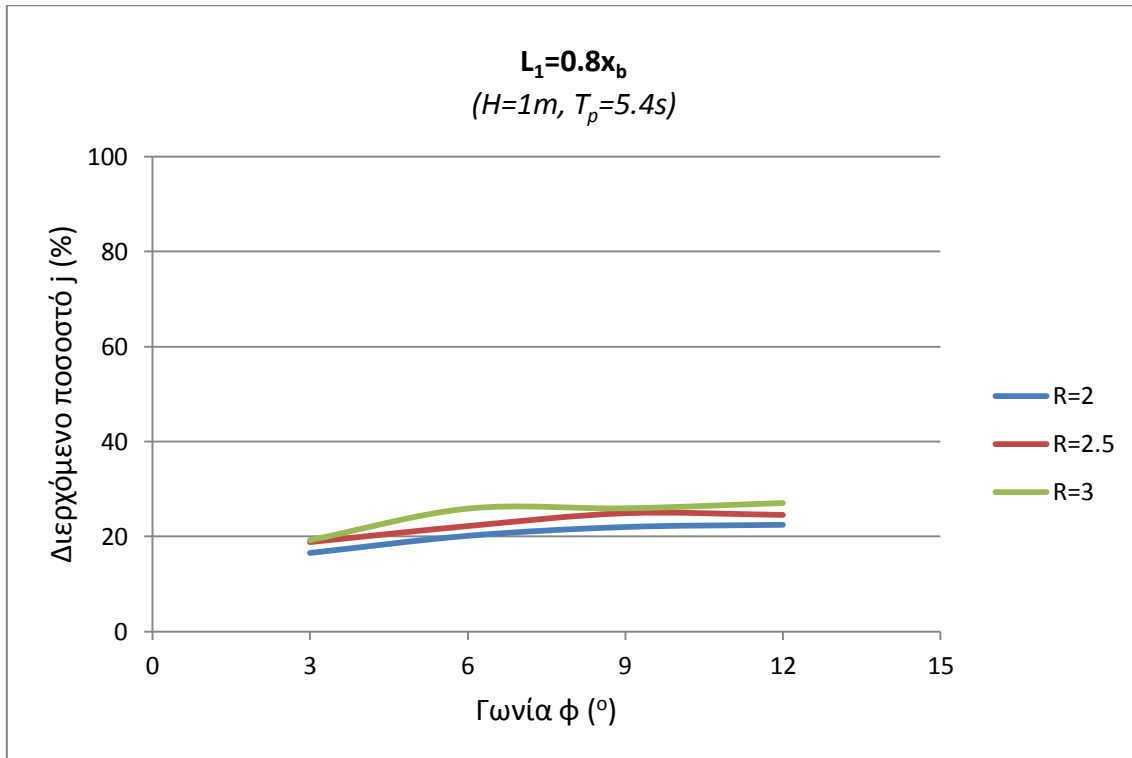
**Σχήμα Α.7:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.15\text{mm}$ /Κυματισμός  $H_{rms}=2.0 \text{ m}$ ,  $T_p=7.2 \text{ s}$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



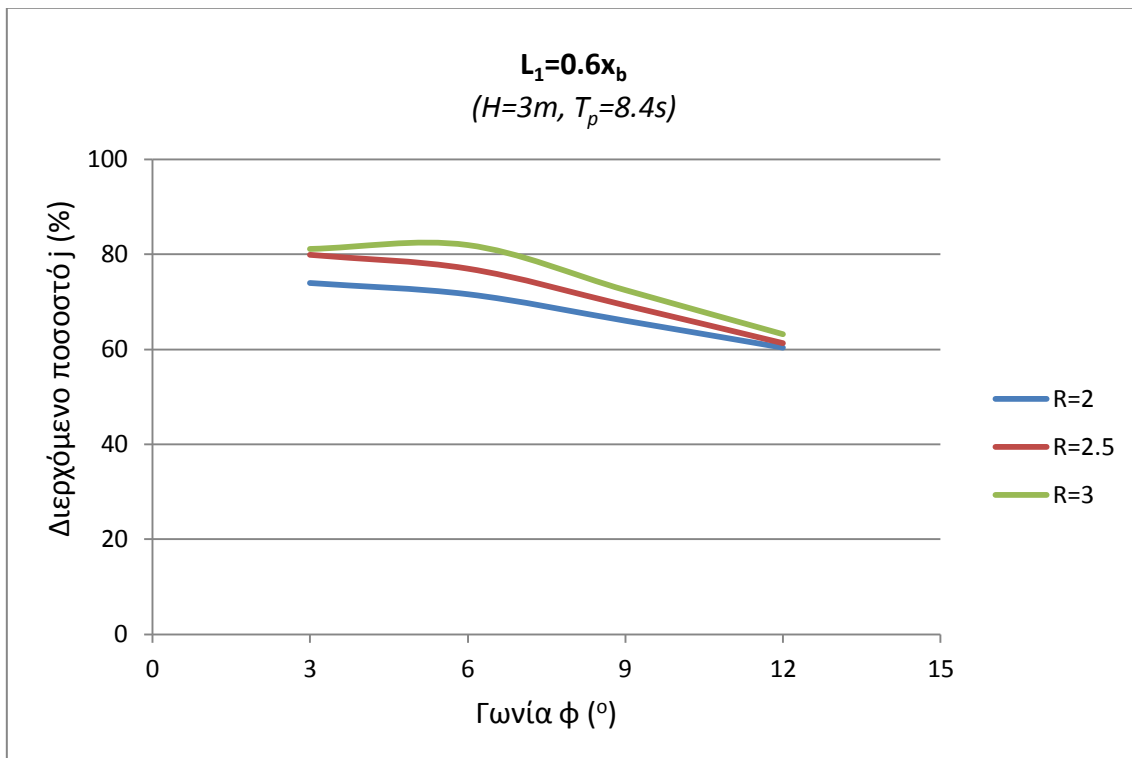
**Σχήμα Α.8:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.15mm$ /Κυματισμός  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



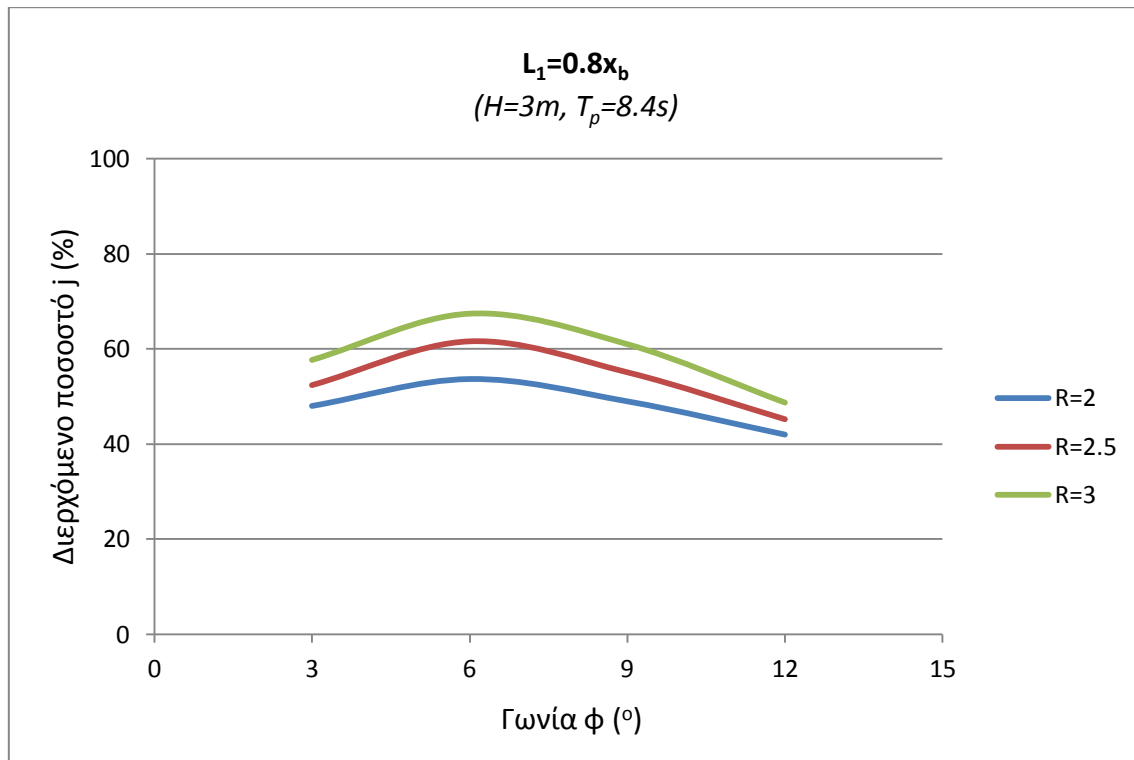
**Σχήμα Α.9:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός  $H_{rms}=1.0\ m$ ,  $T_p=5.4\ s$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



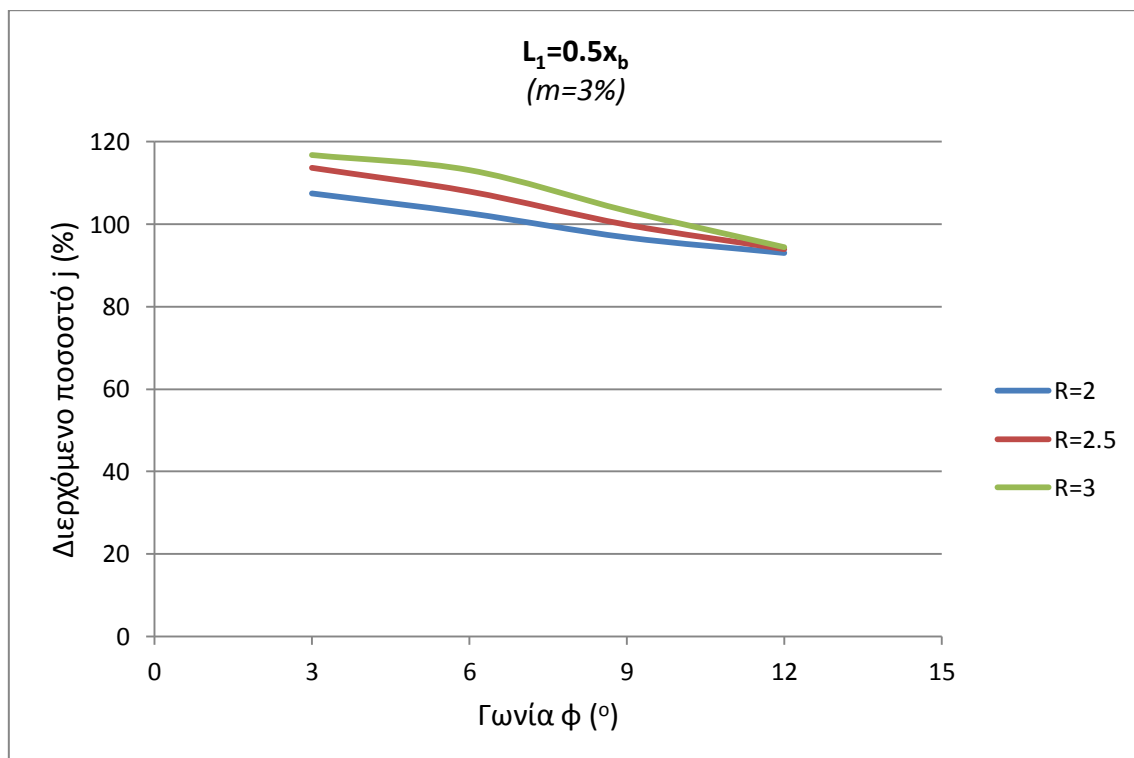
**Σχήμα Α.10:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=1.0 m, T_p=5.4 s \alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.8x_b$ )



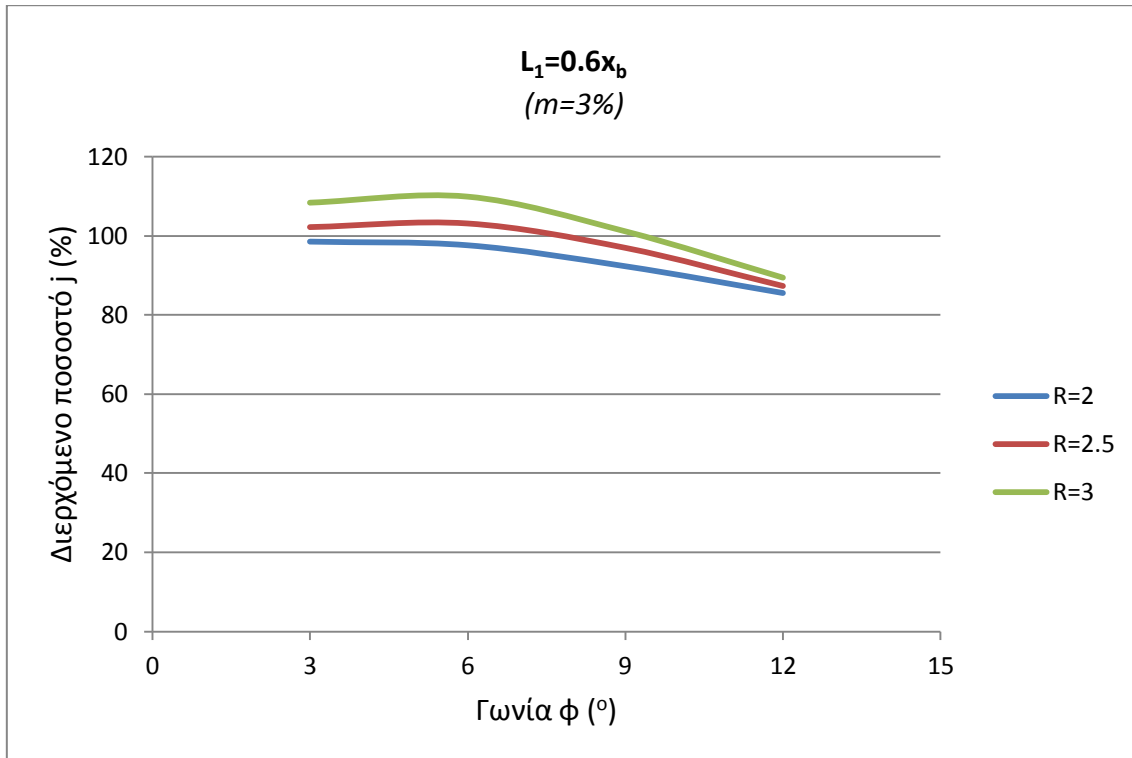
**Σχήμα Α.11:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=3.0 m, T_p=8.4 s \alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



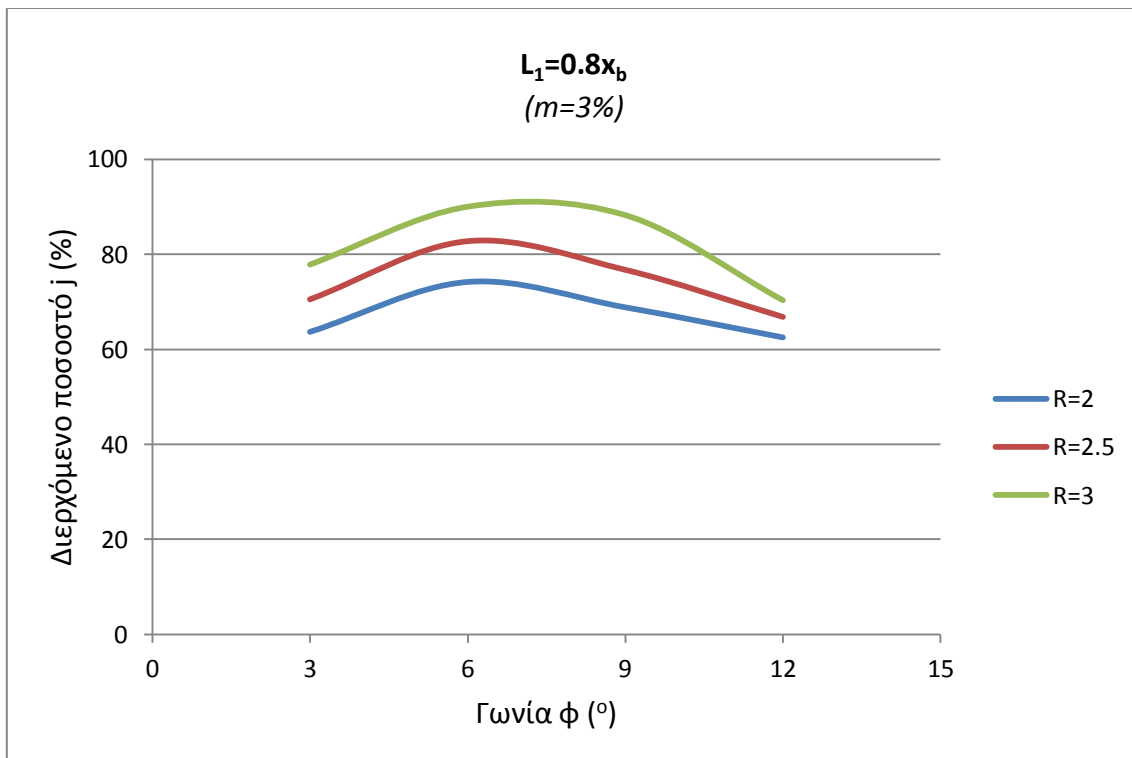
**Σχήμα Α.12:** Ακτή: κλίση  $m=5\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=3.0\ m$ ,  $T_p=8.4\ s$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.8x_b$ )



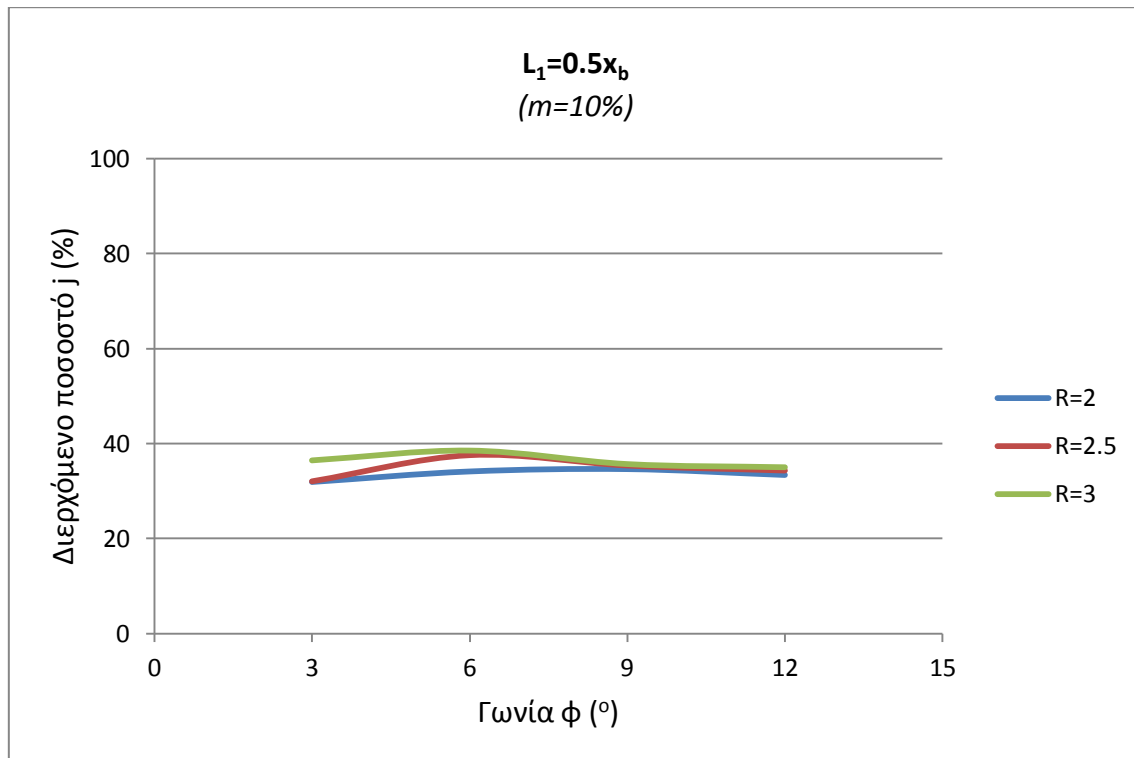
**Σχήμα Α.13:** Ακτή: κλίση  $m=3\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.5x_b$ )



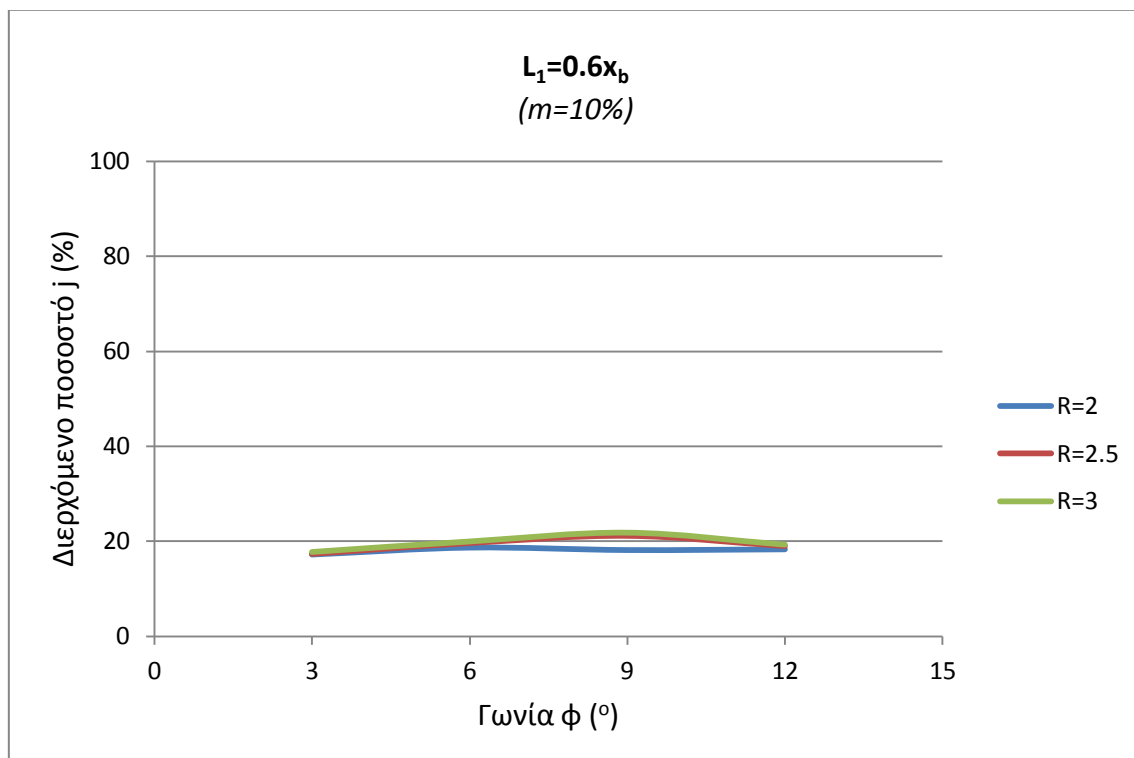
**Σχήμα Α.14:** Ακτή: κλίση  $m=3\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



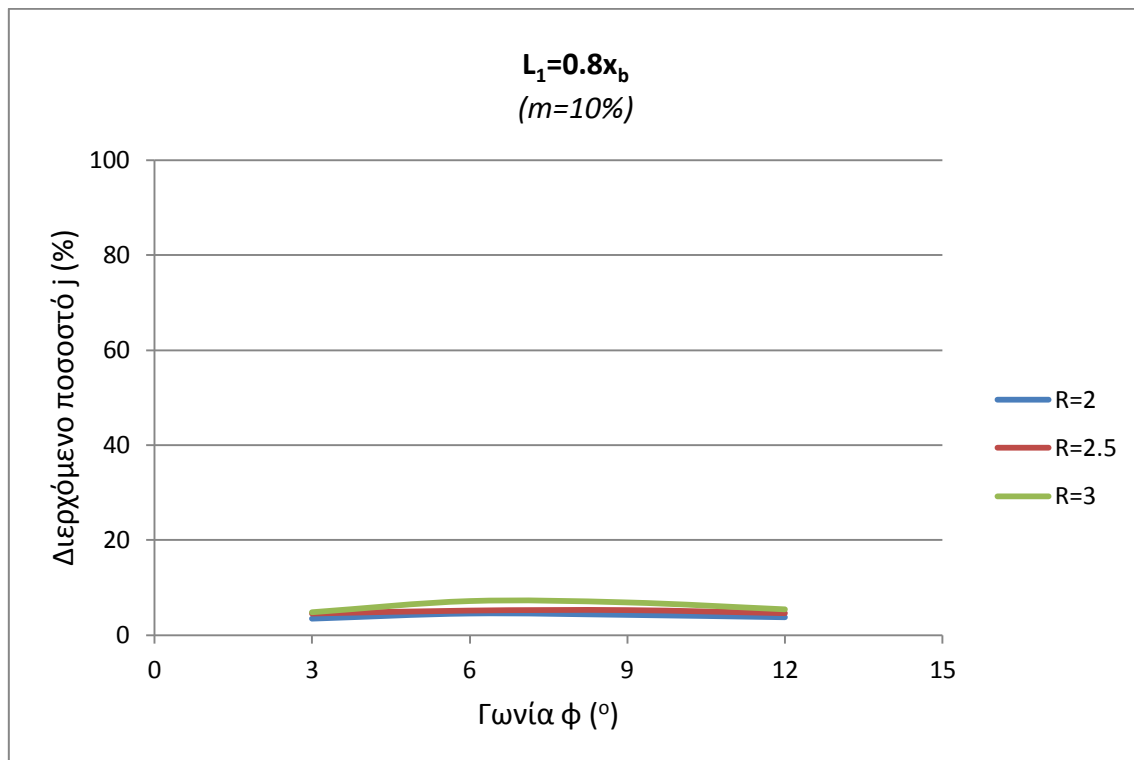
**Σχήμα Α.15:** Ακτή: κλίση  $m=3\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )



**Σχήμα Α.16:** Ακτή: κλίση  $m=10\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.5x_b$ )



**Σχήμα Α.17:** Ακτή: κλίση  $m=10\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.6x_b$ )

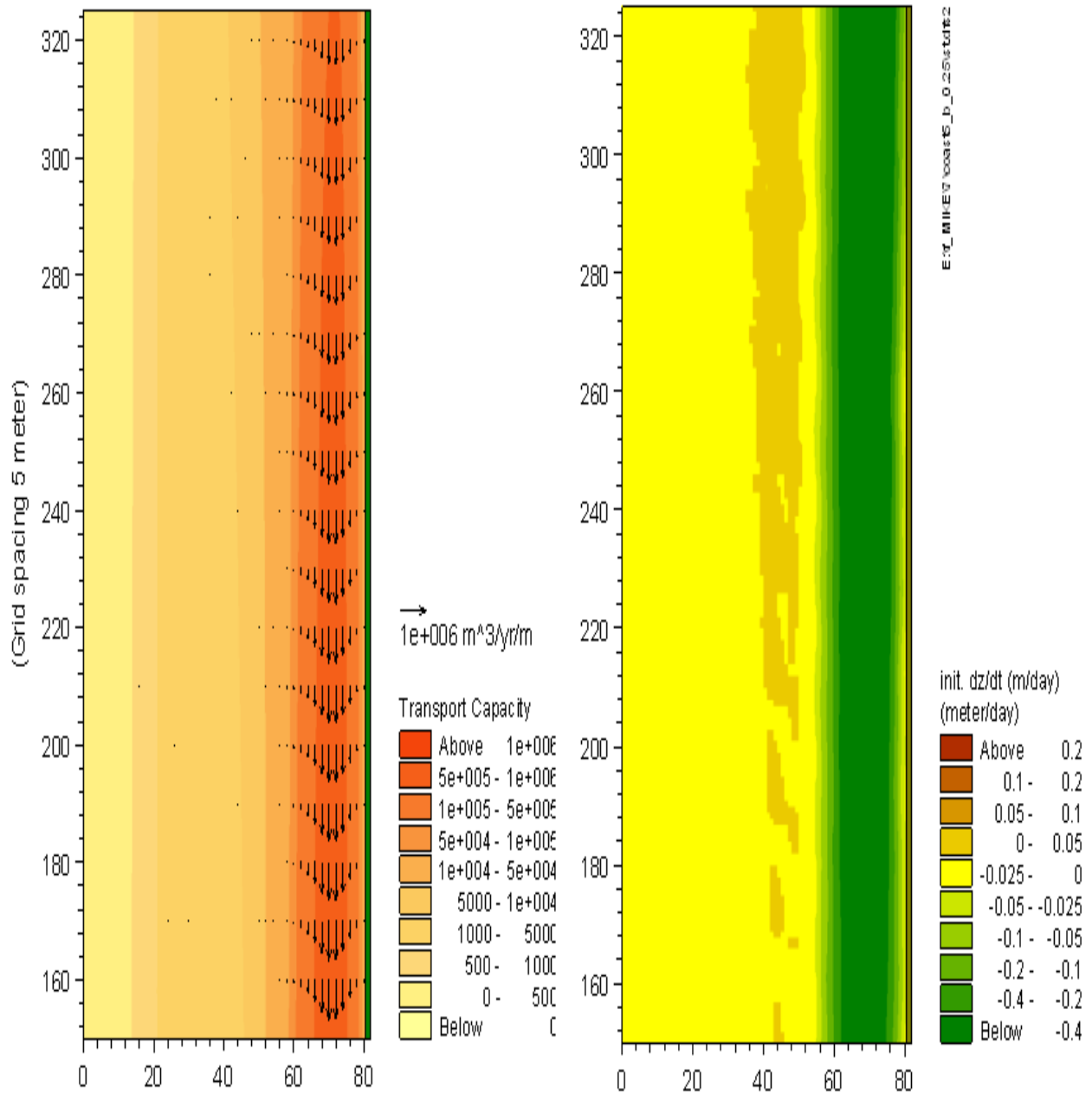


**Σχήμα Α.18:** Ακτή: κλίση  $m=10\%$  - ίζημα  $D_{50}=0.25mm$ /Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$   $\alpha_o=45^\circ$   
(μήκος πρώτου προβόλου:  $L_1=0.8x_b$ )



## Παράρτημα Β. Γραφική Απεικόνιση Αποτελεσμάτων MIKE21

Παρακάτω παρατίθενται γραφικά κάποια από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση με το μοντέλο στερεομεταφοράς MIKE21 ST.



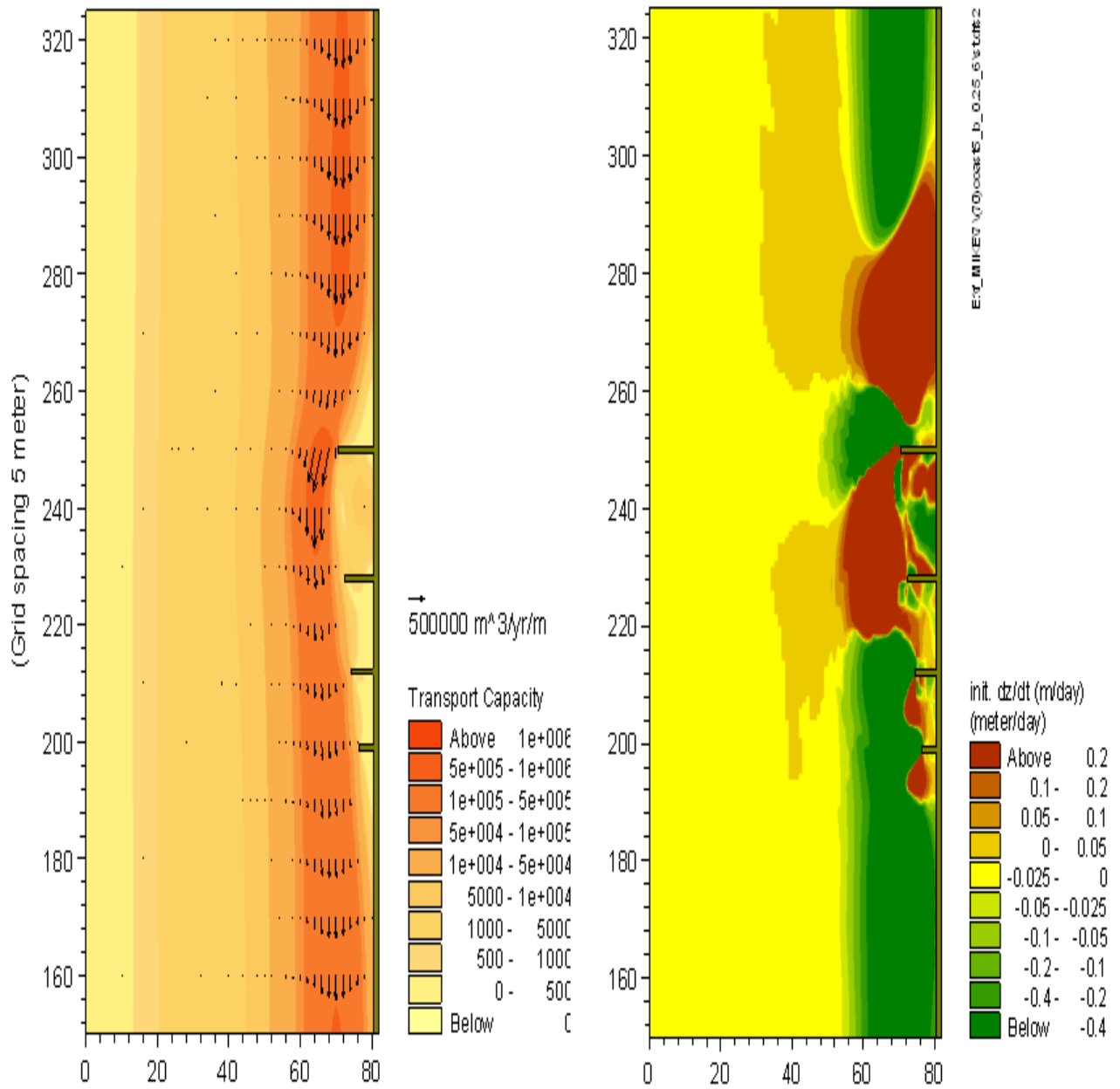
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.1:** Ακτή χωρίς προβόλους

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0 m$ ,  $T_p=7.2 s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25 mm$



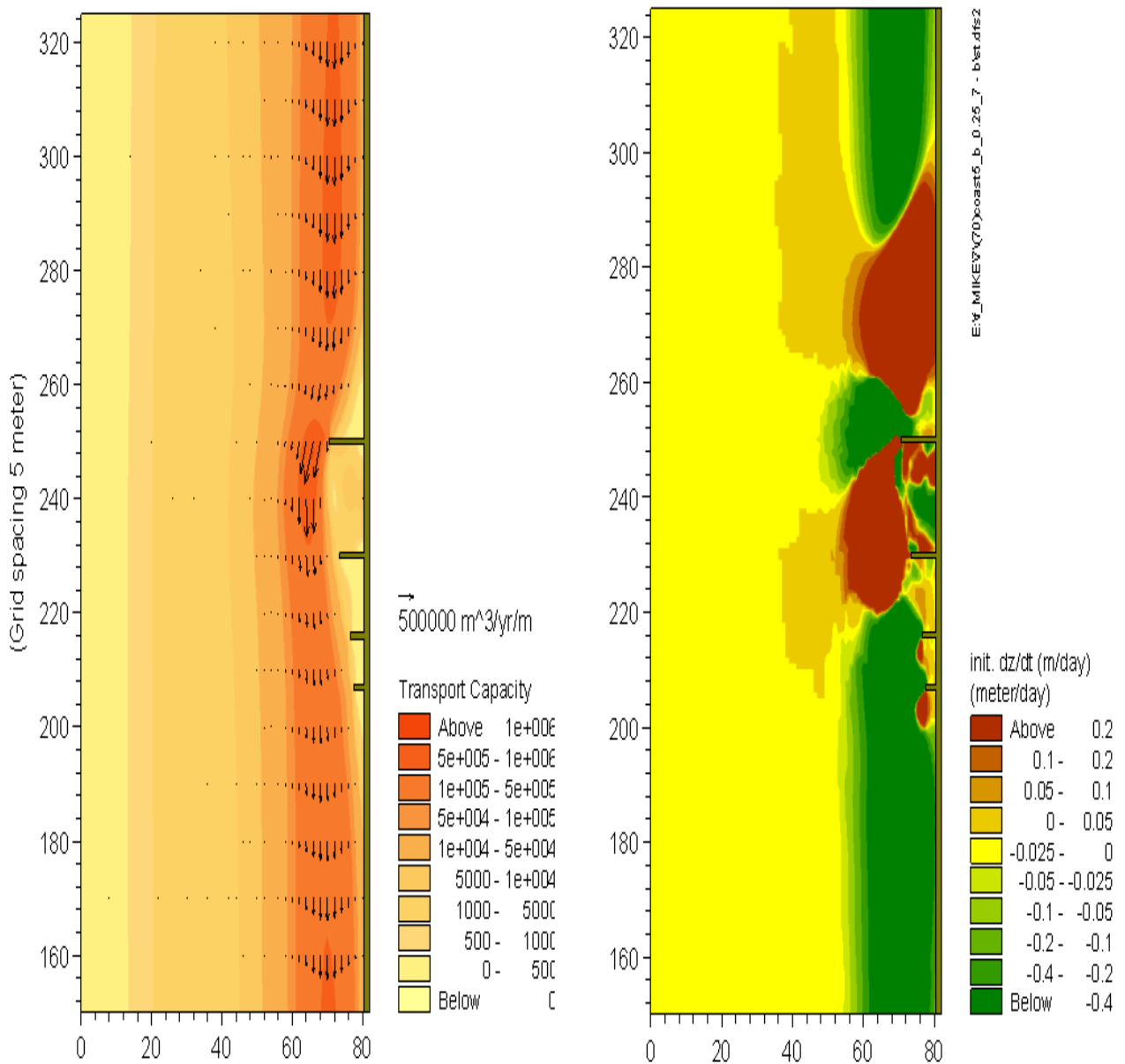
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m)

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα (m/day)

**Σχήμα Β.2:** Σύστημα προβόλων:  $L_l=0.6x_b$ ,  $\phi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{ms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm



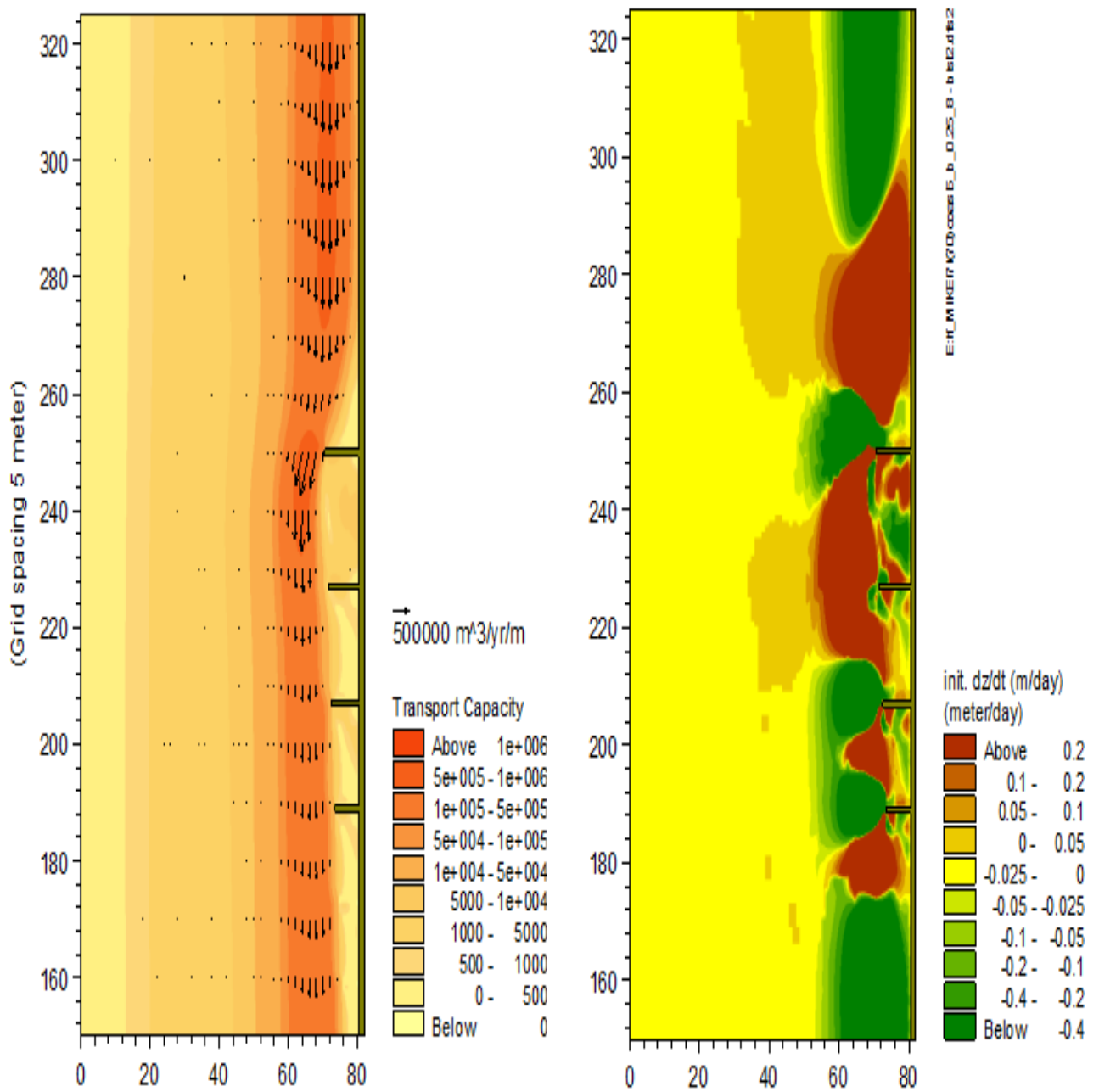
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m)

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα (m/day)

**Σχήμα Β.3:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.6x_b$ ,  $\phi=9^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{ms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm



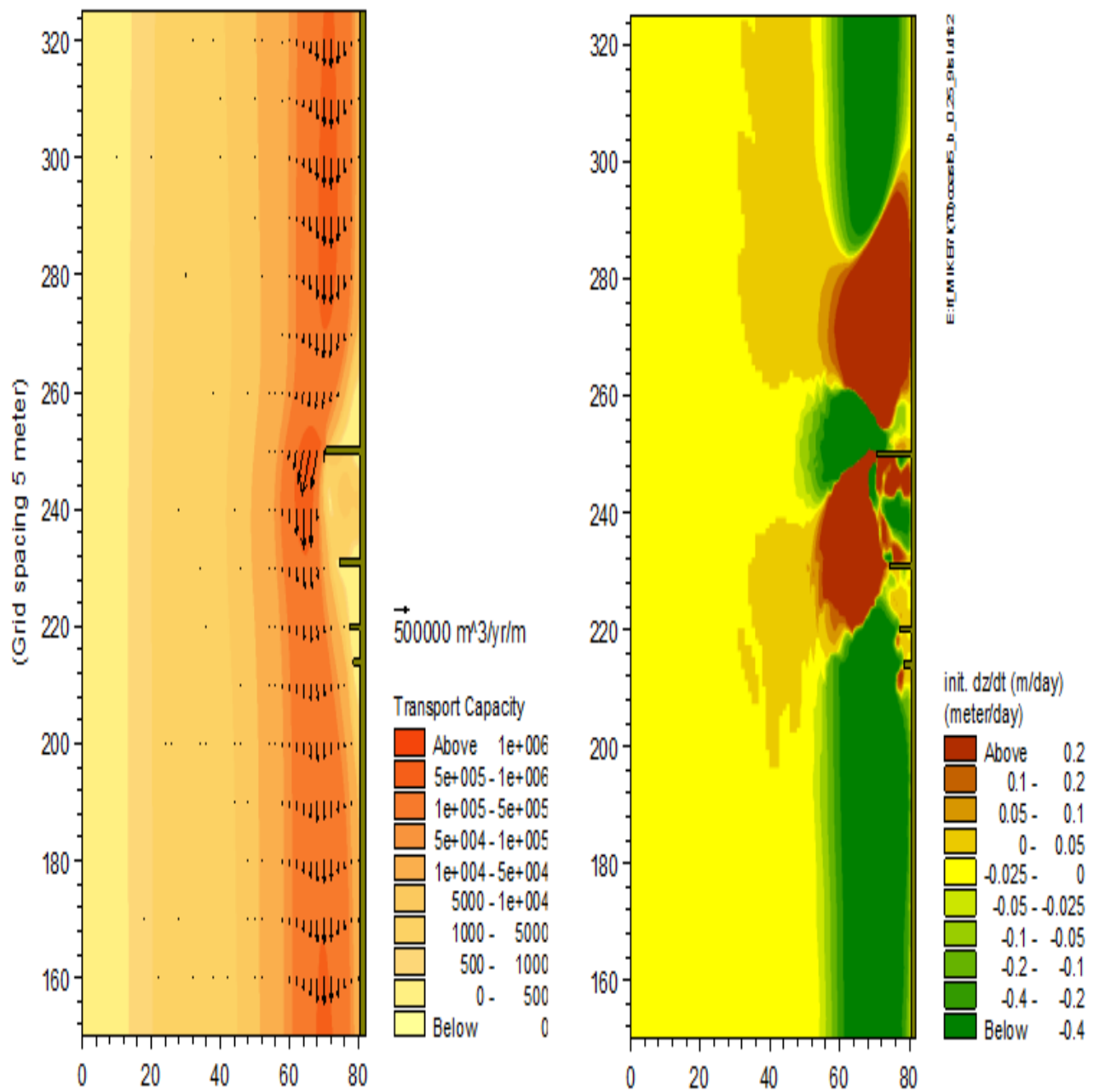
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m)

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα (m/day)

**Σχήμα Β.4:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.6x_b$ ,  $\phi=3^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{ms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm



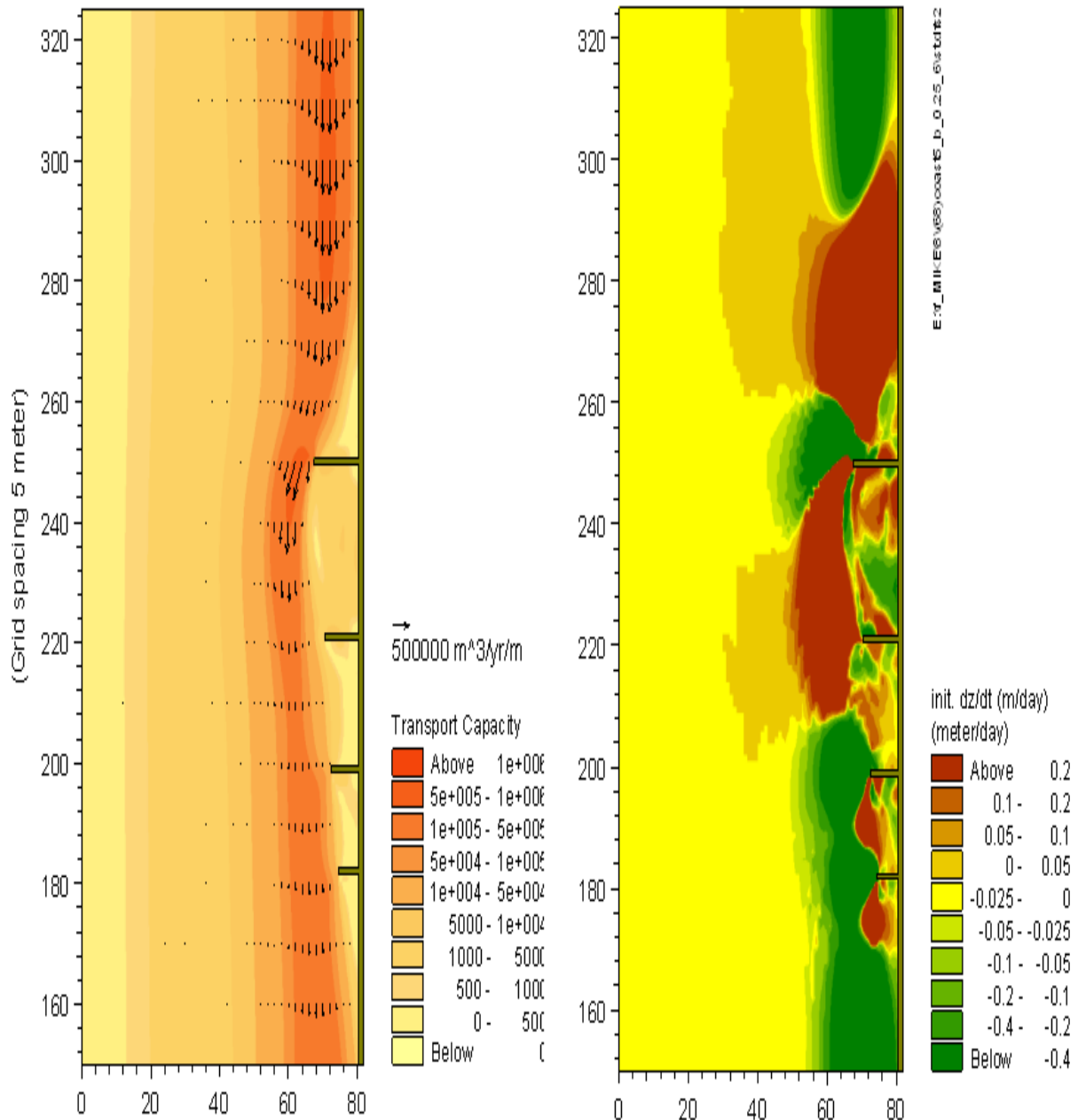
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.5:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.6x_b$ ,  $\varphi=12^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$



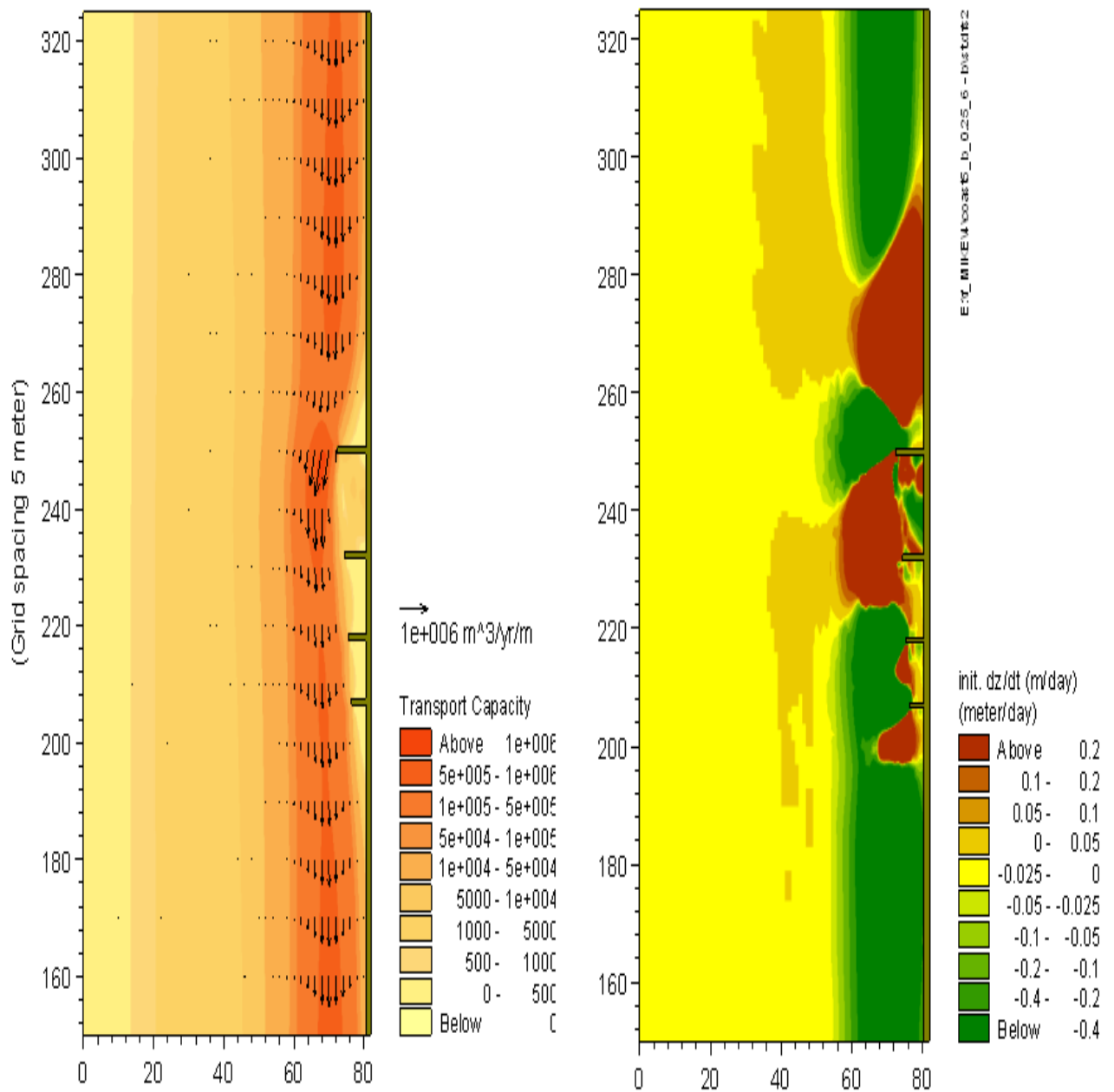
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.6:** Σύστημα προβόλων:  $L_l=0.8x_b$ ,  $\phi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$



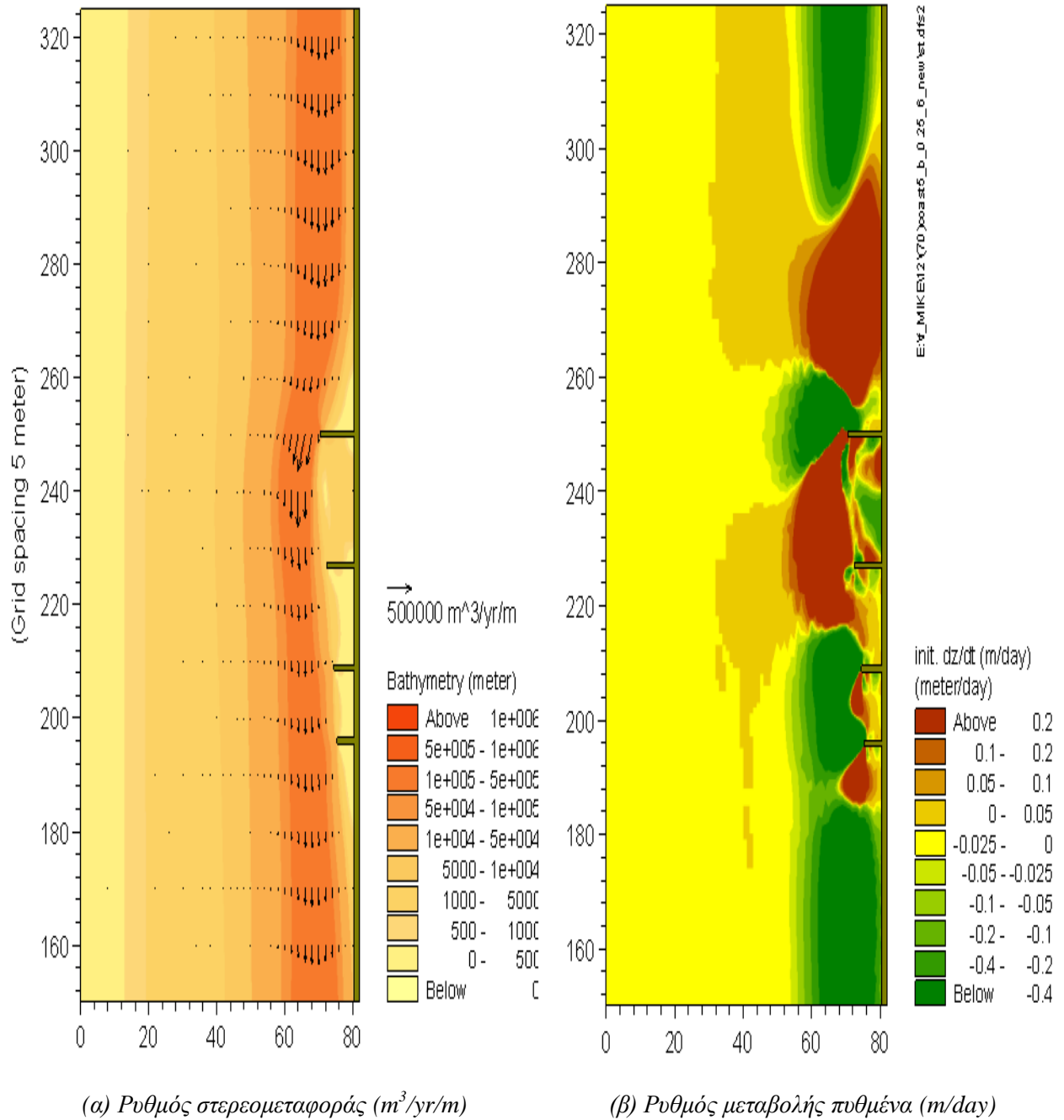
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $\text{m}/\text{day}$ )

**Σχήμα Β.7:** Σύστημα προβόλων:  $L_l=0.5x_b$ ,  $\phi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0 \text{ m}$ ,  $T_p=7.2 \text{ s}$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25 \text{ mm}$

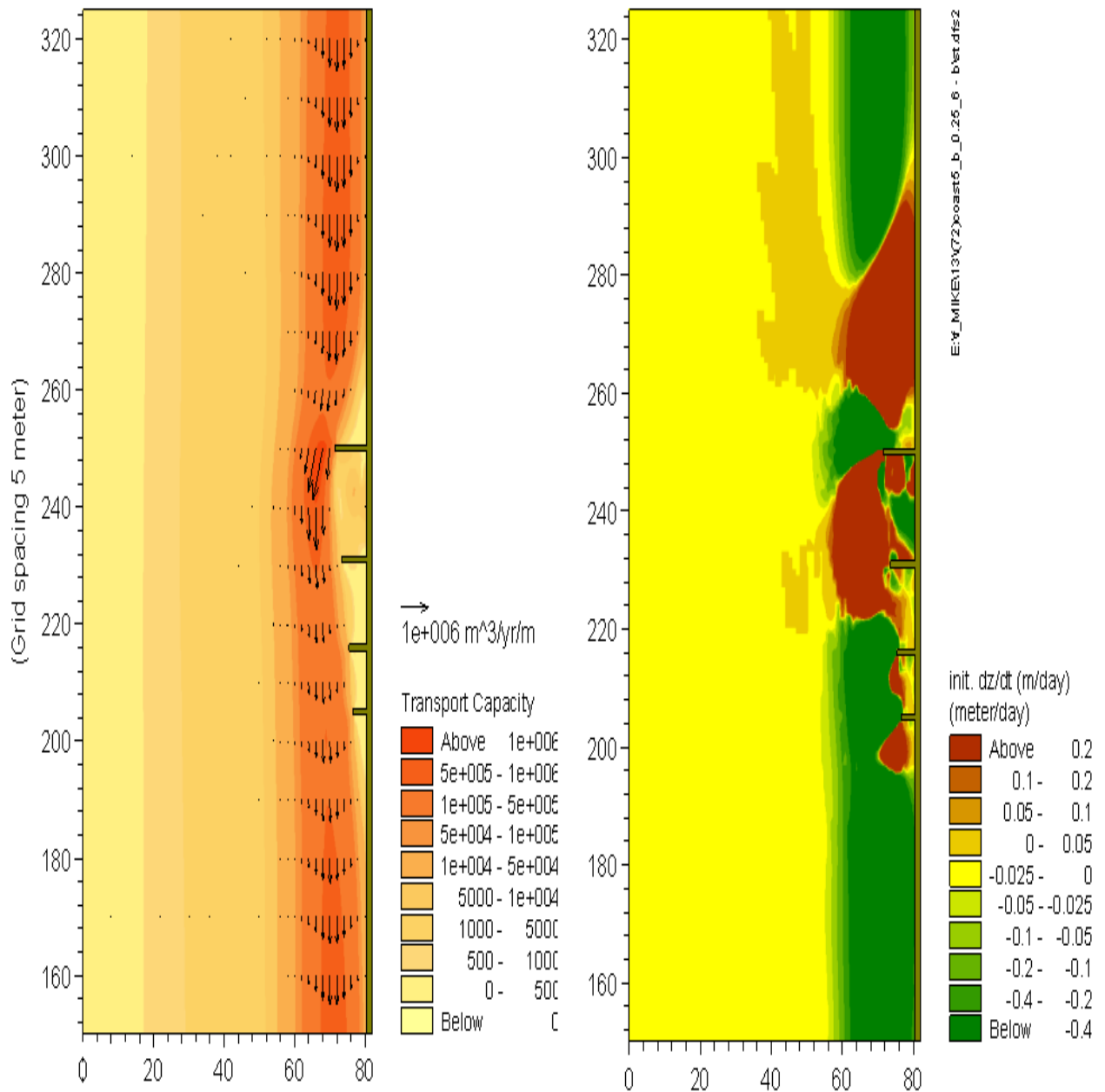


**Σχήμα Β.8:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.6x_b$ ,  $\phi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{ms}=2.0\text{ m}$ ,  $T_p=7.2\text{ s}$ ,  $\alpha_o=30^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25\text{ mm}$





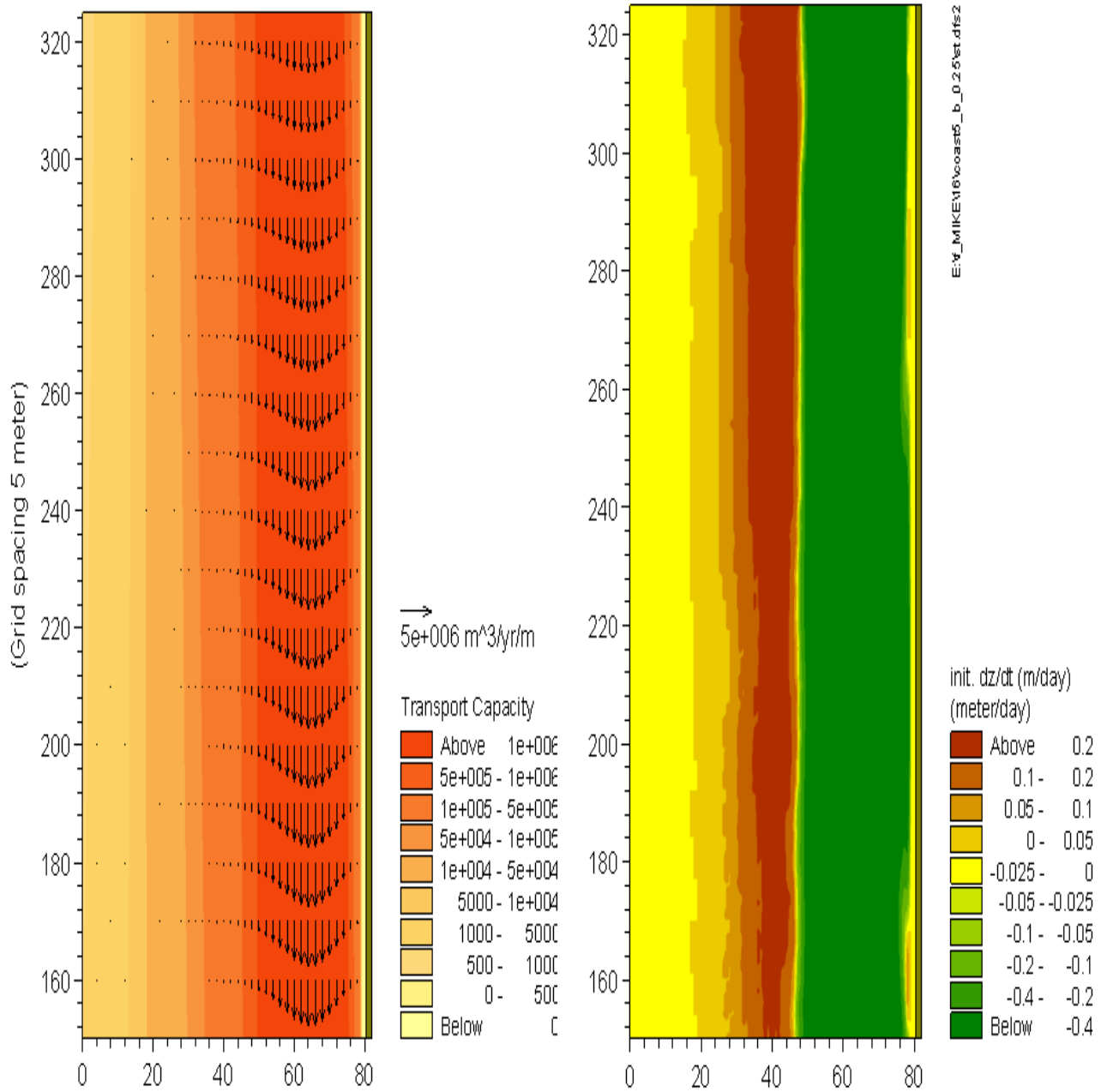
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.9:** Σύστημα προβόλων:  $L_l=0.6x_b$ ,  $\varphi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0 m$ ,  $T_p=7.2 s$ ,  $\alpha_o=60^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25 mm$



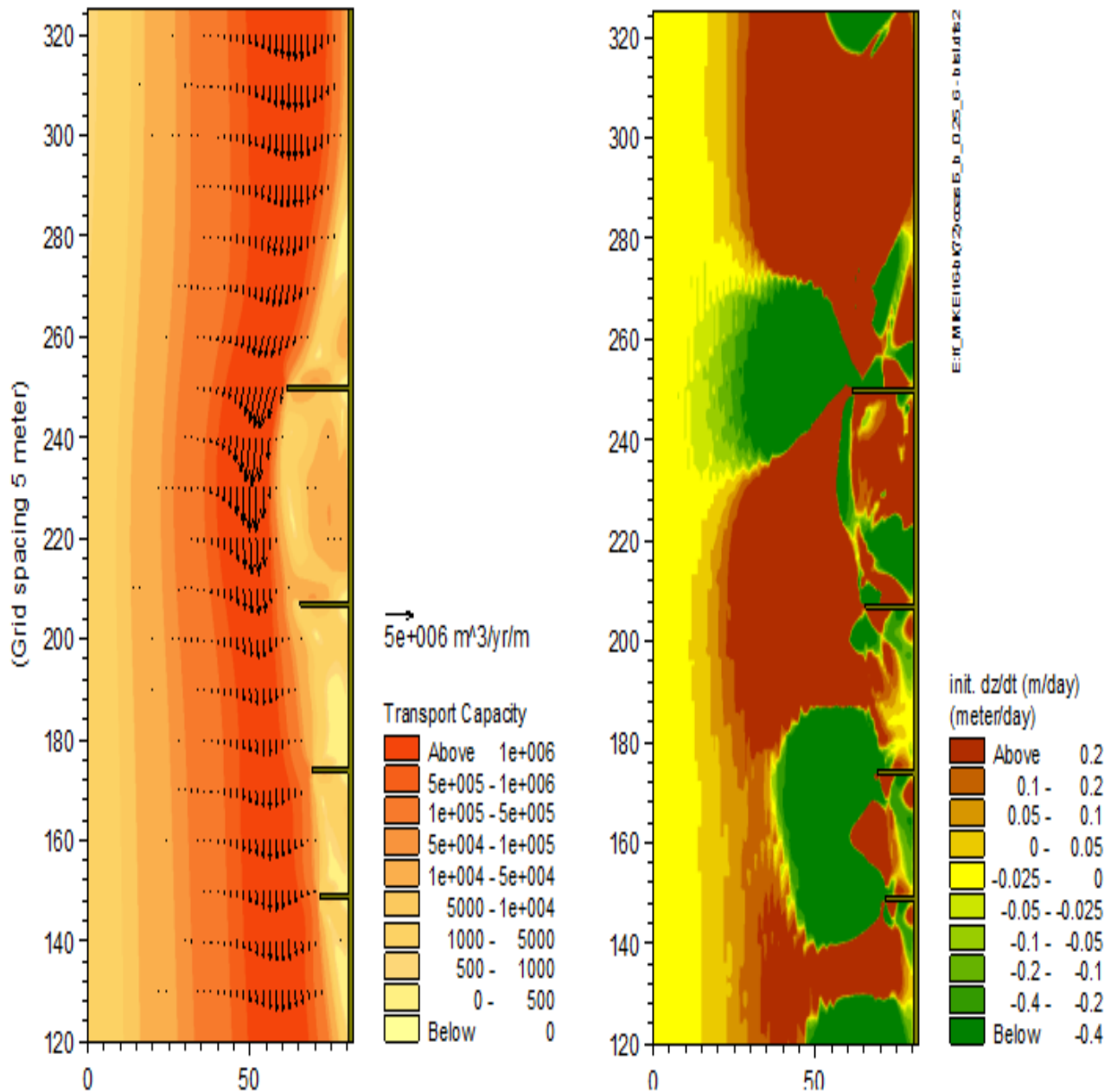
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m)

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα (m/day)

**Σχήμα Β.10:** Ακτή χωρίς προβόλους

Κυματισμός:  $H_{rms}=3.0$  m,  $T_p=8.4$  s,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm



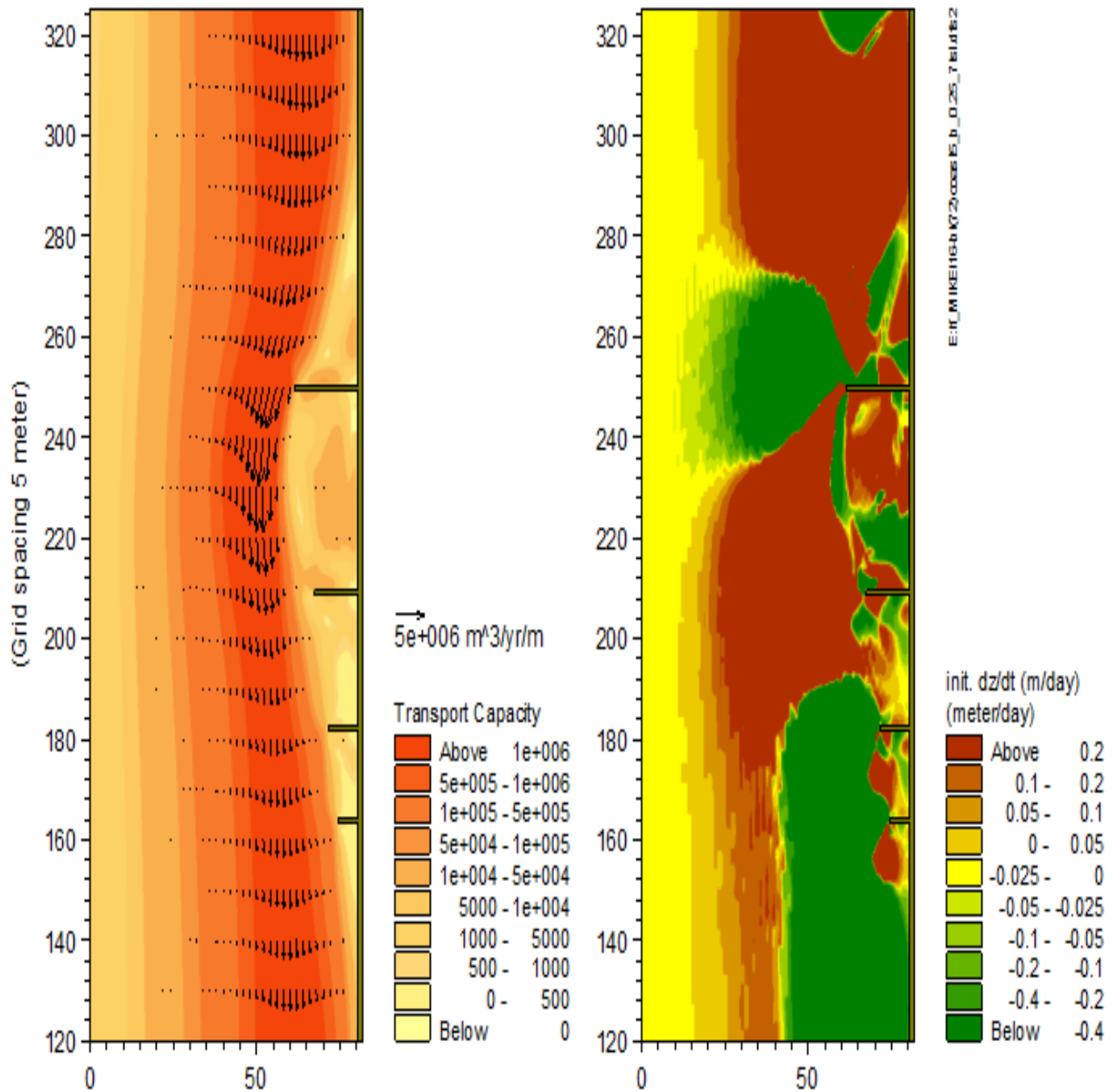
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.11:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.8x_b$ ,  $\phi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=3.0 m$ ,  $T_p=8.4 s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25 mm$



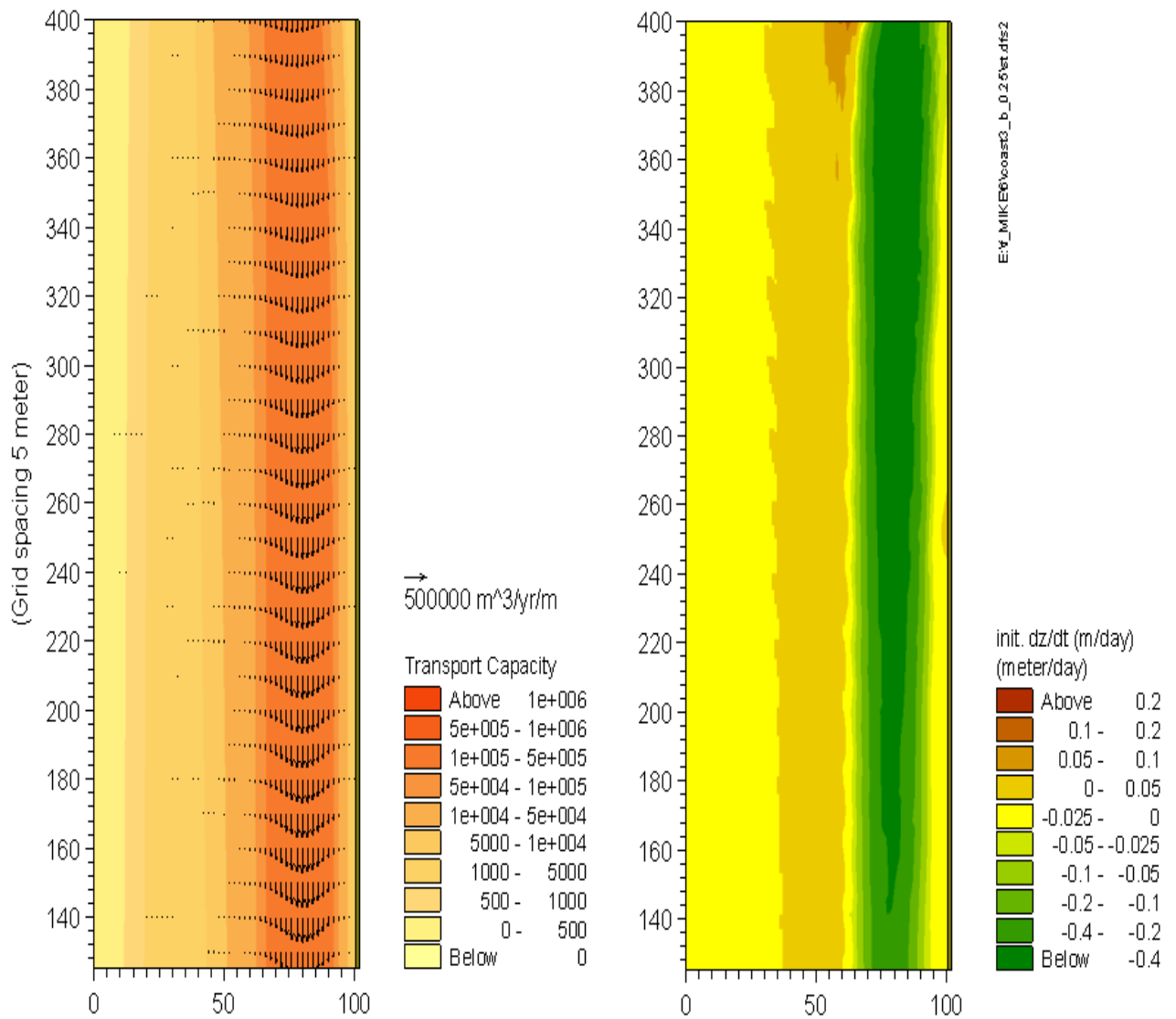
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m)

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα (m/day)

**Σχήμα Β.12:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.8x_b$ ,  $\varphi=9^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=3.0$  m,  $T_p=8.4$  s,  $\alpha_o=45^\circ$

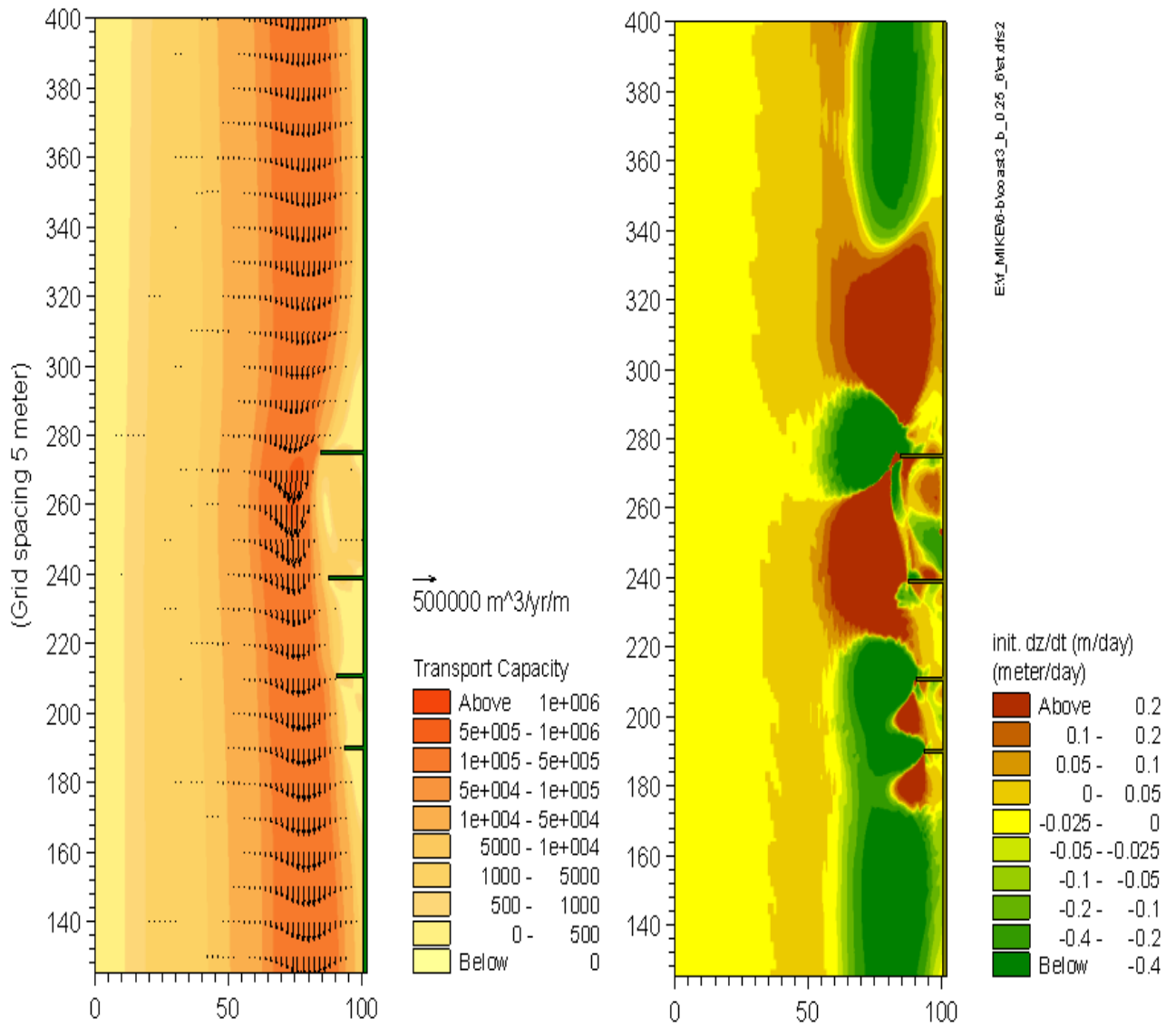
Ακτή:  $m=5\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm



**Σχήμα Β.13:** Ακτή χωρίς προβόλους

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=3\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$



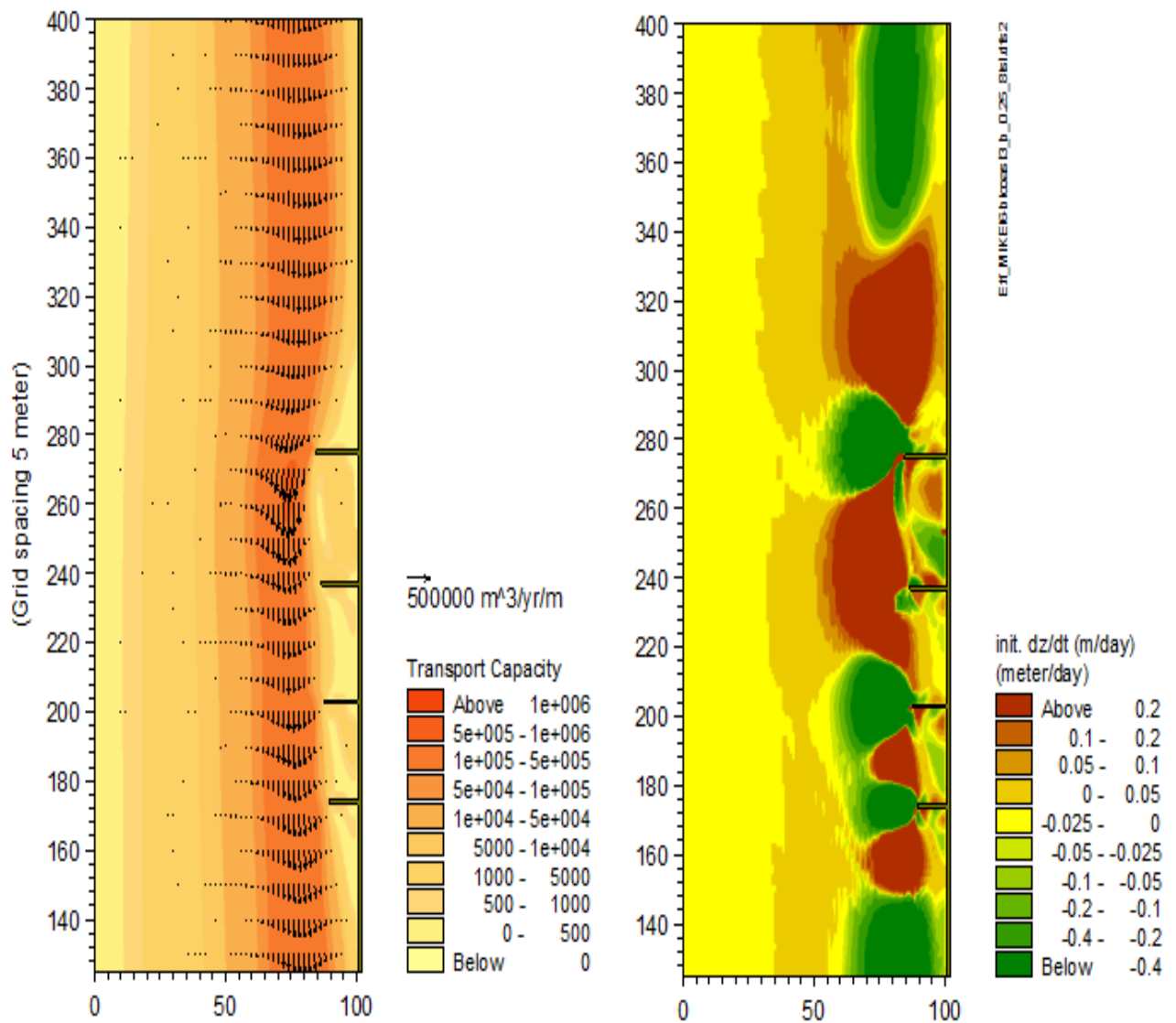
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m)

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα (m/day)

**Σχήμα Β.14:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.6x_b$ ,  $\varphi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0$  m,  $T_p=7.2$  s,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=3\%$ ,  $D_{50}=0.25$  mm



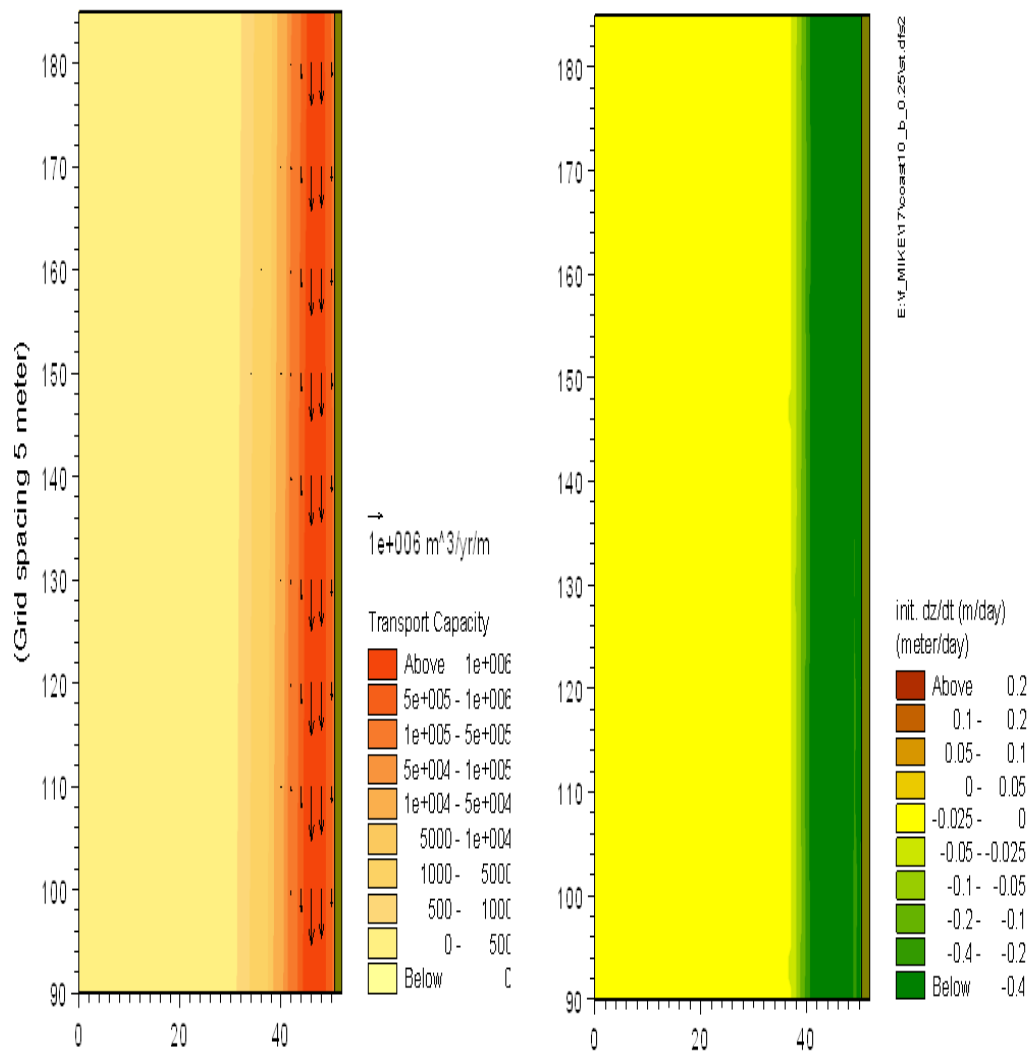
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.15:** Σύστημα προβόλων:  $L_l=0.6x_b$ ,  $\varphi=3^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0 m$ ,  $T_p=7.2 s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=3\%$ ,  $D_{50}=0.25 mm$



(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

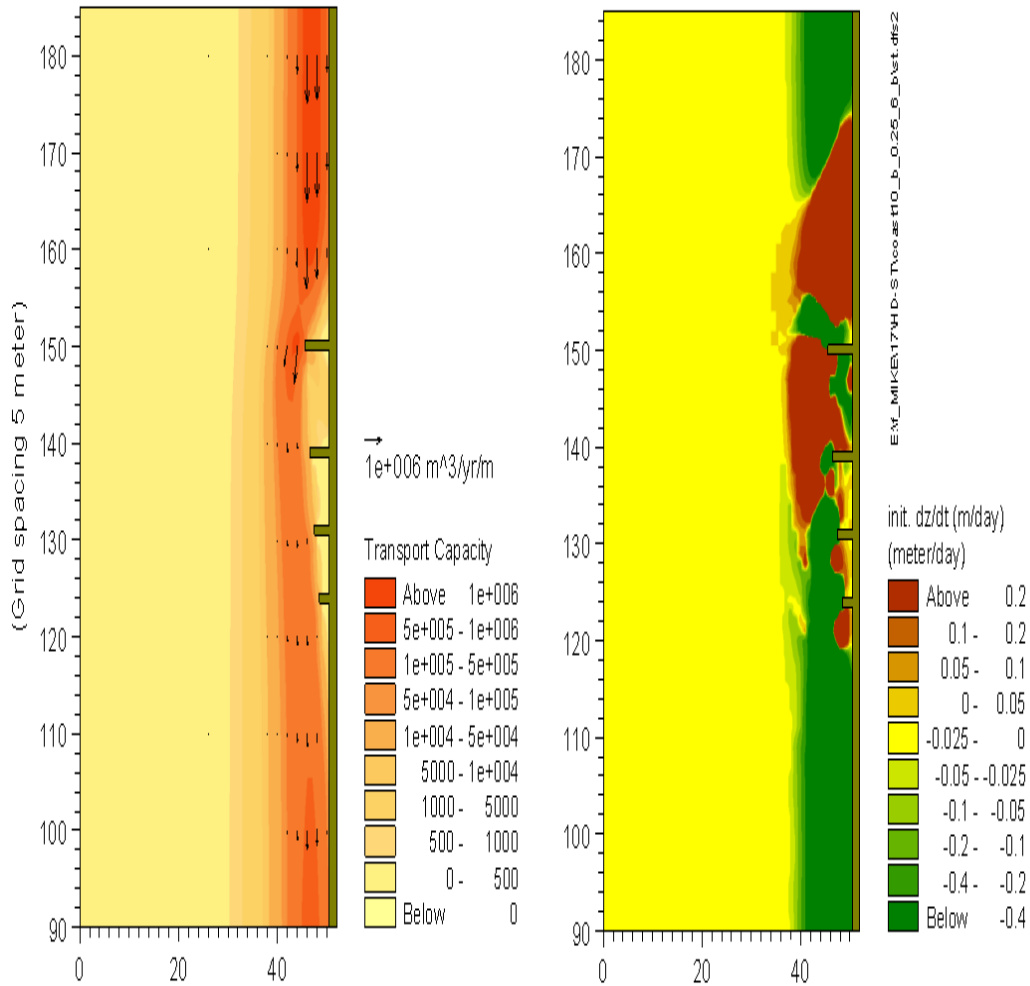
(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.16:** Ακτή χωρίς προβόλους

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=10\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$





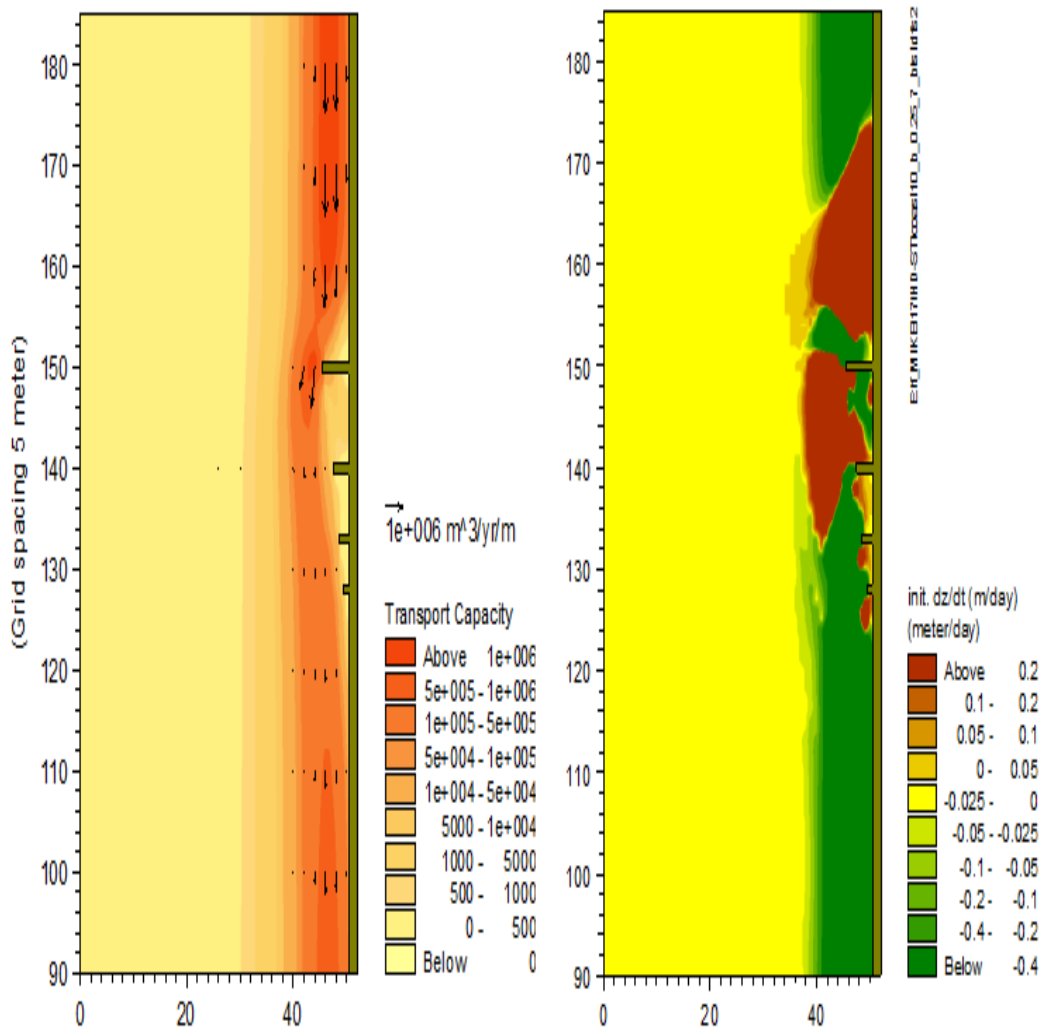
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.17:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.6x_b$ ,  $\varphi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=10\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$



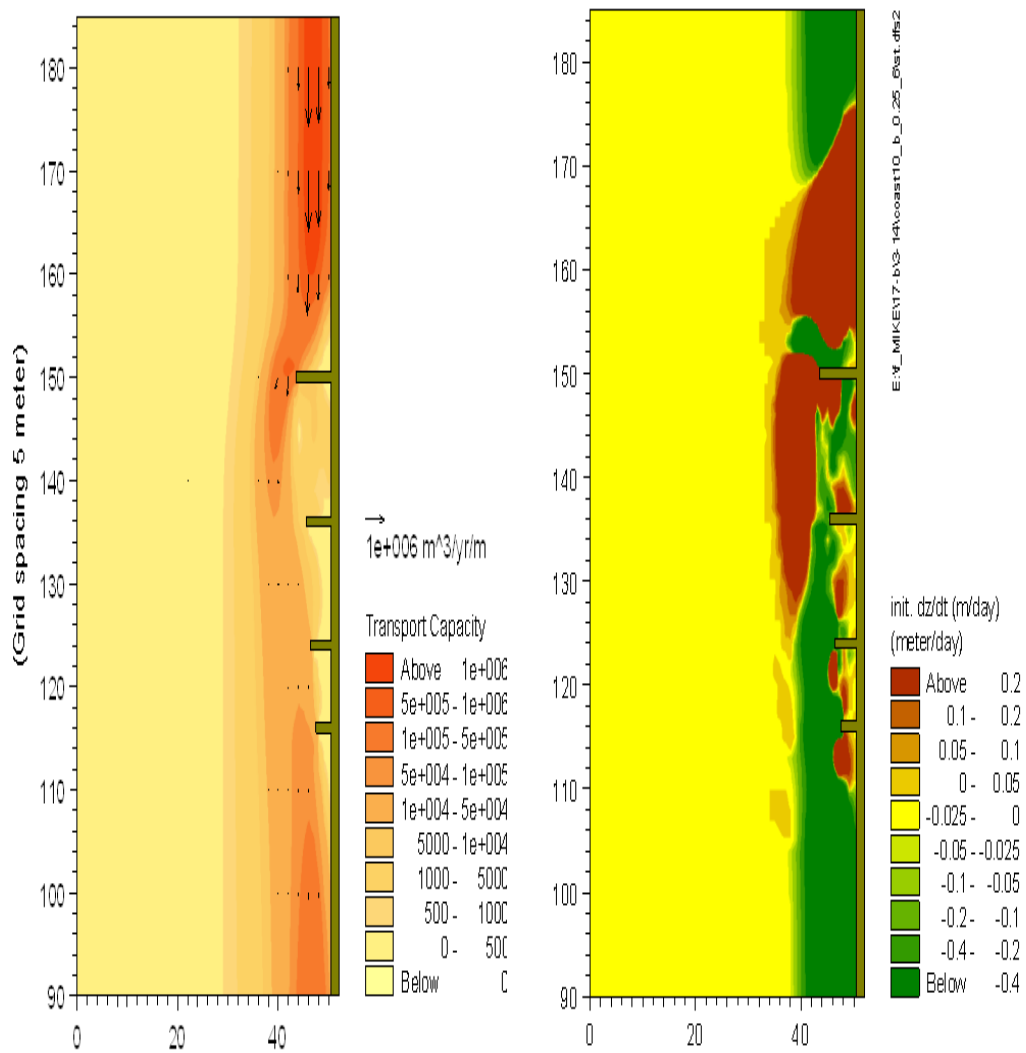
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.18:** Σύστημα προβόλων:  $L_l=0.6x_b$ ,  $\varphi=9^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0 m$ ,  $T_p=7.2 s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=10\%$ ,  $D_{50}=0.25 mm$



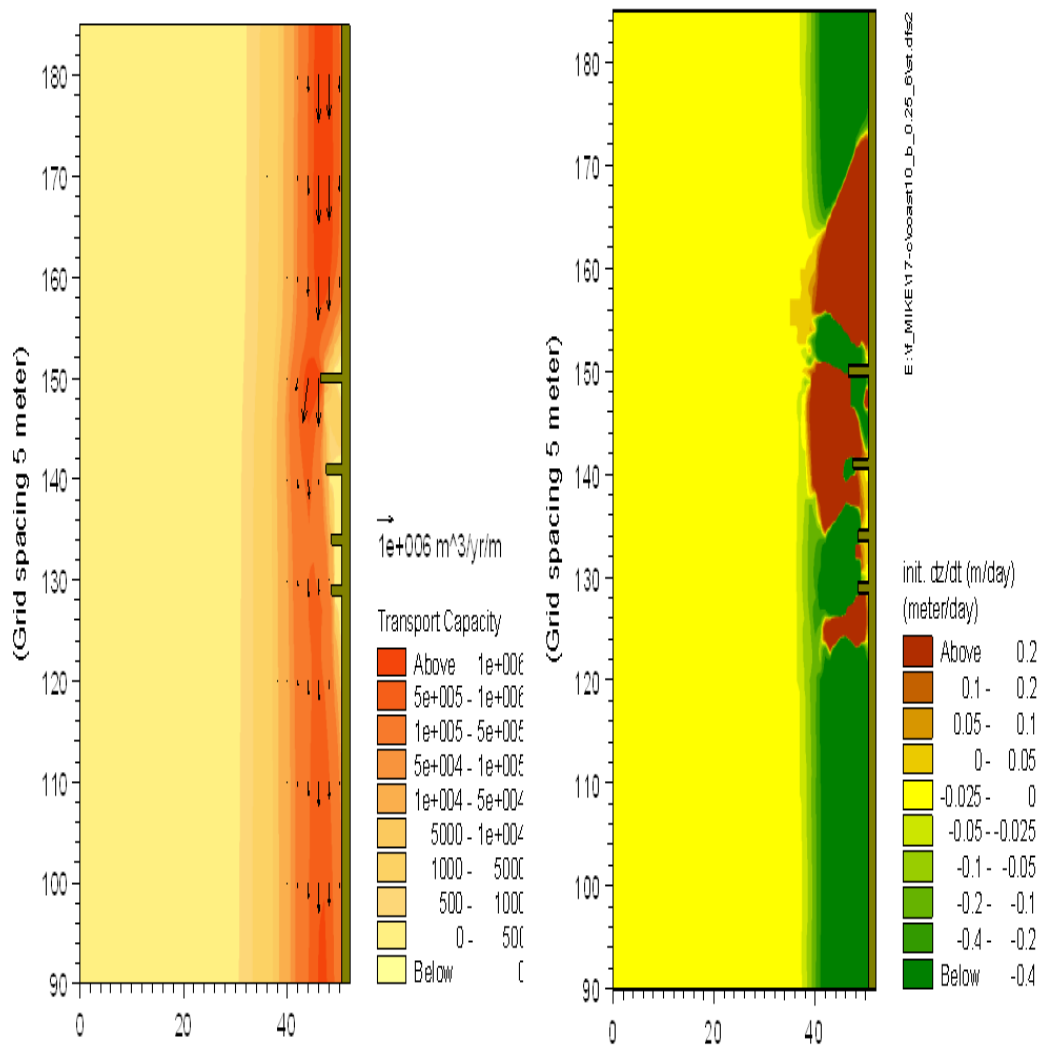
(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.19:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.8x_b$ ,  $\varphi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=10\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$



(α) Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ )

(β) Ρυθμός μεταβολής πυθμένα ( $m/day$ )

**Σχήμα Β.20:** Σύστημα προβόλων:  $L_1=0.5x_b$ ,  $\varphi=6^\circ$ ,  $R=2.5$

Κυματισμός:  $H_{rms}=2.0\ m$ ,  $T_p=7.2\ s$ ,  $\alpha_o=45^\circ$

Ακτή:  $m=10\%$ ,  $D_{50}=0.25\ mm$

## Παράρτημα Γ. Υπολογισμός Εγκάρσιας Στερεομεταφοράς

**Πίνακας Γ.1: Ρυθμός εγκάρσιας στερεομεταφοράς στο βάθος θραύσης ( $d_b$ )  
(ακτή κλίσης  $m=5\%$ )**

$\alpha/\alpha$	$H_o$ (m)	$T_p$ (s)	$\alpha_o$ ( $^\circ$ )	$H_b$ (m)	$d_b$ (m)	$u_{br}$ (m/s)	$a_{rms}$ (m)	$g'$ (m/s <sup>2</sup> )	$D_{50}$ (m)	$f_w$
1	2.00	7.2	45	0.87	2.06	0.062	0.676	16.187	0.00025	0.00897
2	2.00	7.2	30	1.83	4.36	0.090	1.312	16.187	0.00025	0.00764
3	2.00	7.2	60	1.72	4.09	0.087	1.270	16.187	0.00025	0.00770
4	1.00	5.4	45	1.50	3.60	0.081	1.192	16.187	0.00025	0.00781
5	3.00	8.4	45	2.56	2.56	0.164	1.172	16.187	0.00025	0.00784

$\alpha/\alpha$	$u_{rms}$ (m/s)	$\Theta$	$C_o$	$\psi$	$\xi$ (m)	$\delta$ (m)	$w$ (m/s)	$\varepsilon$ (m <sup>2</sup> /s)	$l_1$ (m)	$s$ (m)
1	0.944	1.975	0.048	220.2	0.00066	0.008	0.032	0.0006	0.019	0.001
2	1.373	3.563	0.091	466.1	0.00032	0.014	0.032	0.0016	0.049	0.004
3	1.330	3.367	0.086	437.3	0.00035	0.014	0.032	0.0015	0.047	0.004
4	1.248	3.007	0.076	384.9	0.00041	0.013	0.032	0.0014	0.043	0.003
5	1.052	2.146	0.053	273.7	0.00076	0.013	0.032	0.0015	0.047	0.003

$\alpha/\alpha$	$q=u_{br} \cdot s$ (m <sup>3</sup> /m/s)	$q$ (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /m/έτος)
1	$5.85 \cdot 10^{-5}$	0.002
2	$3.98 \cdot 10^{-4}$	0.013
3	$3.50 \cdot 10^{-4}$	0.011
4	$2.67 \cdot 10^{-4}$	0.008
5	$4.12 \cdot 10^{-4}$	0.013



## Παράρτημα Δ. Ταξινόμηση Ιζημάτων

Πίνακας Δ.1: Ταξινόμηση ιζημάτων (USACE, 2006)

ASTM (Unified) Classification <sup>1</sup>	U.S. Std. Sieve <sup>2</sup>	Size in mm	Phi Size	Wentworth Classification <sup>3</sup>
Boulder	12 in. (300 mm)	4096.	-12.0	Boulder
		1024.	-10.0	
Cobble	3 in. (75 mm)	256.	-8.0	Large Cobble
		128.	-7.0	Small Cobble
		107.64	-6.75	
		90.51	-6.5	
		76.11	-6.25	Very Large Pebble
		64.00	-6.0	
53.82	-5.75			
Coarse Gravel	3/4 in. (19 mm)	45.26	-5.5	Large Pebble
		38.05	-5.25	
		32.00	-5.0	
		26.91	-4.75	Medium Pebble
		22.63	-4.5	
		19.03	-4.25	
Fine Gravel	4 (4.75 mm)	16.00	-4.0	Small Pebble
		13.45	-3.75	
		11.31	-3.5	
		9.51	-3.25	Granule
		8.00	-3.0	
		6.73	-2.75	
Coarse Sand	10 (2.0 mm)	5.66	-2.5	Very Coarse Sand
		4.75	-2.25	
		4.00	-2.0	
		3.36	-1.75	Coarse Sand
		2.83	-1.5	
		2.38	-1.25	
Medium Sand	40 (0.425 mm)	2.00	-1.0	Medium Sand
		1.68	-0.75	
		1.41	-0.5	
		1.19	-0.25	Coarse Sand
		1.00	0.0	
		0.84	0.25	
Fine Sand	200 (0.075 mm)	0.71	0.5	Fine Sand
		0.59	0.75	
		0.50	1.0	
		0.420	1.25	Very Fine Sand
		0.354	1.5	
		0.297	1.75	
Fine-grained Silt:	230	0.250	2.0	Coarse Silt
		0.210	2.25	
		0.177	2.5	
		0.149	2.75	Medium Silt
		0.125	3.0	
		0.105	3.25	
Silt if $PI < 4$ and plot of $PI$ vs. $LL$ is below "A" line and the presence of organic matter does not influence $LL$ .	325	0.088	3.5	Fine Silt
		0.074	3.75	
		0.0625	4.0	
		0.0312	5.0	Very Fine Silt
		0.0156	6.0	
		0.0078	7.0	
Clay if $PI > 4$ and plot of $PI$ vs. $LL$ is on or above "A" line and the presence of organic matter does not influence $LL$ .	400	0.0039	8.0	Coarse Clay
		0.00195	9.0	
		0.00098	10.0	
		0.00049	11.0	Medium Clay
		0.00024	12.0	
		0.00012	13.0	
(PI = plasticity limit; LL = liquid limit)		0.000061	14.0	Colloids

<sup>1</sup> ASTM Standard D 2487-92. This is the ASTM version of the Unified Soil Classification System. Both systems are similar (from ASTM (1994)).

<sup>2</sup> Note that British Standard, French, and German DIN mesh sizes and classifications are different.

<sup>3</sup> Wentworth sizes (in mm) cited in Krumbeln and Sloss (1963).