

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΗΛΙΔΩΝ»*



ΕΙΡΗΝΗ ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΒΕΝΤΙΚΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- τον κ. Νικόλαο Π. Βεντίκο, επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση και την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για τη συνεργασία του και για το χρόνο που αφιέρωσε για τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.
- τον κ. Βασίλειο Μαμαλούκα, διευθυντή του τμήματος προστασίας θαλασσίου περιβάλλοντος της Τεχνικής Προστασίας Περιβάλλοντος Α.Ε., για τις πληροφορίες που μου προσέφερε σχετικά με το θέμα της εργασίας.
- τον κ. Νικόλαο Π. Κακαλή, διευθυντή έρευνας και καινοτομίας Det Norske Veritas SA Ελλάδος, για τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε και τη συνεργασία του κατά τη συγγραφή του άρθρου: «Η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων».
- τον κ. Χαρίλαο Ψαραύτη, καθηγητή του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και τον κ. Δημήτριο Λυρίδη, επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για το χρόνο που αφιέρωσαν για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.
- τους γονείς μου, την αδερφή μου, τους φίλους και συμφοιτητές μου, για την υποστήριξη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας, η ανάκτηση του πετρελαίου που διέφυγε, είτε από την επιφάνεια της θάλασσας, είτε από τις ακτές, συνήθως προκαλεί την ανάμιξη του πετρελαίου με μεγάλες ποσότητες και άλλων υλικών. Το γεγονός αυτό, προκαλεί μεγάλη αύξηση του όγκου των αποβλήτων που θα πρέπει να υποστούν επεξεργασία (σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί τα απόβλητα που θα παραχθούν μπορεί να είναι ακόμα και 30 φορές μεγαλύτερα σε όγκο σε σχέση με το πετρέλαιο που αρχικά διέφυγε) κάνοντας τη διαδικασία επιλογής της αντιμετώπισης αυτών των αποβλήτων σύνθετη και κρίσιμη.

Η παραγωγή αποβλήτων διαφέρει πολύ από το ένα περιστατικό ρύπανσης στο άλλο και δεν απαραίτητα ανάλογη του μεγέθους της πετρελαιοκηλίδας. Η ποσότητα και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων που συλλέγονται εξαρτώνται από τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν και την οργάνωση της ανάκτησης του πετρελαίου. Κατά συνέπεια, η πρόβλεψη του όγκου των αποβλήτων που προκύπτουν μετά τη διενέργεια των επιχειρήσεων αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας, είναι ένα δύσκολο έργο αφού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους.

Στο πλαίσιο αυτή της εργασίας, το πρώτο βήμα ήταν ο καθορισμός των ειδών αποβλήτων που μπορεί να προκύψουν από τις προαναφερθείσες εργασίες. Επιπλέον, θεωρήθηκε αναγκαία η καταγραφή των διαδικασιών διαχείρισης αυτών των ειδών αποβλήτων και η περιγραφή του νομικού πλαισίου που τις διέπει. Το επόμενο βήμα αποτέλεσε η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή αυτών των αποβλήτων. Προκειμένου να συλλεχθούν αυτές οι πληροφορίες, συγκεντρώθηκαν τριάντα ιστορικά ατυχημάτων πλοίων. Η μελέτη αυτών των ιστορικών ανέδειξε το γεγονός ότι ο όγκος των υγρών αποβλήτων που παράγονται εξαρτάται από: (1) την ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε (tons), (2) το είδος του πετρελαίου που διέφυγε, (3) τις καιρικές συνθήκες, (4) την απόσταση του σημείου εκδήλωσης της πετρελαιοκηλίδας από την ακτή και (5) τη χώρα και τη χρονολογία κατά την οποία εκδηλώθηκε η πετρελαιοκηλίδα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο όγκος των στερεών αποβλήτων που παράγονται εξαρτάται από: (1) την ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons), (2) την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons), (3) το είδος του πετρελαίου που διέφυγε, (4) την απόσταση του σημείου εκδήλωσης της πετρελαιοκηλίδας από την ακτή (km), (5) το μήκος της ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο (km), (6) το είδος της ακτής, (7) τις καιρικές συνθήκες και (8) την ικανότητα αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας με βάση την τοποθεσία και τη χρονολογία κατά την οποία εκδηλώθηκε το ατύχημα.

Στη συνέχεια, οι προαναφερθείσες παράμετροι έγιναν το αντικείμενο της ανάλυσης της παραγωγής αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης της πετρελαιοκηλίδας. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν υπέστησαν επεξεργασία με τις μεθόδους της γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης (απλής και πολλαπλής) και της γραμμικής ασαφούς παλινδρόμησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης που διεξήχθη, η παραγωγή υγρών αποβλήτων εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε στη θάλασσα (τόνοι) και η παραγωγή στερεών αποβλήτων εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα των υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (τόνοι) και το μήκος της ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο (χιλιόμετρα). Επιπλέον, η παρούσα εργασία παρέχει μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες βασίζονται στις μεθόδους της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης και μπορούν να συμβάλουν στην πρόβλεψη της παραγωγής αποβλήτων.

ABSTRACT

In the aftermath of a spill, the recovery of spilled oil either from the sea surface, or from the shoreline usually results in the collected oil becoming mixed with a large quantity of water, debris and beach material. This greatly increases the volume of oily waste for treatment and disposal (in extreme cases the produced waste may be 30 times more than the oil originally spilt) rendering the process of deciding how to deal with the waste oil and contaminated material, critical and complex.

Waste generation varies greatly from one pollution incident to another and is not necessarily directly proportional to the size of the spill. The quantity and the characteristics of collected waste depend on the techniques used and the organization of recovery. Therefore, the prediction of volume of waste that occur after the conduct of oil spill combat operations, is a difficult task since it involves various parameters.

In the context of this project, the first step was to define the types of waste that occur from the afore-mentioned operations. It was also considered appropriate to list the management procedures and the legal framework considering these types of waste. The next step was to collect information considering the parameters that affect waste generation. With a view to collecting this information, the accident histories of thirty ships were collected. The study of these accident histories revealed that the volume of generated liquid waste depends on: (1) the quantity of oil spilled (tons), (2) the type of oil spilled, (3) the weather conditions, (4) the distance of the spot where the oil spill occurred from the shore (km), (5) the chronology and the country where the oil spill occurred. It was also revealed that the volume of generated solid waste depends on: (1) the quantity of oil spilled (tons), (2) the quantity of collected liquid waste, (3) the distance of the spot where the oil spill occurred from the shore (km), (4) the length of the coastline that was affected by the oil spilled (km), (5) the type of shore, (6) the weather conditions, (7) the chronology and the country where the oil spill occurred.

Then, the afore-mentioned parameters became the subject of the analysis of waste generation following the conduct of oil spill combat operations. The collected data were analyzed by means of the methods of linear statistical (simple and multiple) and linear fuzzy regression. According to the results of the analysis, the generation of liquid waste depends mainly on the quantity of oil spilled (tons) and the generation of solid waste depends mainly on the quantity of collected liquid waste (tons) and the length of the affected coastline (km). Furthermore, this project provides relationships that are based on the methods of statistical and fuzzy regression, which can assist to the prediction of waste generation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε διεθνής μεταφορά πετρελαίου από τα σημεία παραγωγής προς την παγκόσμια αγορά, περιλαμβάνει σε κάποιο στάδιο τη μεταφορά δια θαλάσσης, θέτοντας σε κίνδυνο το θαλάσσιο περιβάλλον. Η διαρκής ανάπτυξη των θαλάσσιων μεταφορών κατά τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργήσει σοβαρούς κινδύνους ρύπανσης για το θαλάσσιο περιβάλλον. Η ρύπανση που προκαλείται από τα πλοία (λειτουργική ή από ατυχήματα) είναι δυνατό να προκαλέσει απρόβλεπτες συνέπειες στα θαλάσσια οικοσυστήματα, τη δημόσια υγεία, την καταλληλότητα των υδάτων για τις προβλεπόμενες χρήσεις και την ποιότητα αναψυχής στις παράκτιες περιοχές.

Η ρύπανση της θάλασσας που είναι δυνατόν να προκληθεί από πλοία έχει διάφορες μορφές, η σημαντικότερη από τις οποίες είναι η ρύπανση από πετρελαιοειδή, εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου που μεταφέρονται δια θαλάσσης. Η καταπολέμηση μια μεγάλης ρύπανσης από πετρελαιοειδή απαιτεί κατάλληλη προετοιμασία σε επίπεδο σχεδιασμού και άμεσες ενέργειες για να μην εξελιχθεί σε οικολογική καταστροφή.

Σε μια προσπάθεια διατήρησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τα ζητήματα της πρόληψης και της αντιμετώπισης των πετρελαιοκηλίδων έχουν γίνει αντικείμενο εκτενούς έρευνας κατά τα τελευταία 30 χρόνια. Ως αποτέλεσμα της έρευνας αυτής έχει γίνει γνωστή, σε μεγάλο βαθμό, η συμπεριφορά του πετρελαίου στο νερό, έχουν προσδιοριστεί οι παράγοντες που καθορίζουν τη σοβαρότητα του αντίκτυπου της πετρελαιοκηλίδας στο περιβάλλον και την ταχύτητα ανάκαμψης, ενώ παράλληλα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι και εξοπλισμός για την αντιμετώπιση των πετρελαιοκηλίδων.

Η σημασία της πρόληψης και της αντιμετώπισης των πετρελαιοκηλίδων έγινε από πολύ νωρίς αντιληπτή τόσο από τους αρμόδιους φορείς όσο και από την κοινή γνώμη. Δε συνέβη όμως το ίδιο και με το ζήτημα της διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από τις εργασίες καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων. Η διαχείριση των αποβλήτων συχνά παραγκωνιζόταν με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται δυσμενείς επιπτώσεις για ολόκληρη την επιχείρηση καθαρισμού και αποκατάστασης.

Μετά το πέρας της επιχείρησης αντιμετώπισης μιας πετρελαιοκηλίδας, η επιλογή του τρόπου διαχείρισης του πετρελαίου και των υλικών που έχουν προσβληθεί από αυτό είναι μια κρίσιμη και σύνθετη διαδικασία. Αρχικά, θα πρέπει να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ένα σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν, κατά το δυνατό, οι οικονομικές συνέπειες και η περιβαλλοντική ζημιά στην πληγείσα περιοχή. Το σχέδιο αυτό θα πρέπει να ενταχθεί στο σχέδιο έκτακτης ανάγκης της περιοχής έτσι ώστε να είναι έτοιμο για εφαρμογή σε περίπτωση εκδήλωσης πετρελαιοκηλίδας. Επίσης, η εκπόνηση αυτού του σχεδίου θα πρέπει να συνοδεύεται από έρευνες σχετικά με τις καλύτερες μεθόδους επεξεργασίας και διάθεσης, τον εντοπισμό κατάλληλων χώρων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης και την ανεύρεση εταιρειών, ικανών να αναλάβουν τη μεταφορά και την αποθήκευση των αποβλήτων.

Για την αντιμετώπιση των πετρελαιοκηλίδων έχουν γίνει πολλές αναλύσεις και πολλές εργασίες. Όμως, στο ζήτημα της παραγωγής αποβλήτων από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων δεν έχει δοθεί η αντίστοιχη προσοχή, παρά το γεγονός ότι η διαχείριση τους κοστίζει περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη διεργασία που λαμβάνει χώρα μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας.

Είτε μια πετρελαιοκηλίδα προκύψει κοντά σε ακτές είτε στα ανοιχτά των ωκεανών, η επίδραση των ανέμων, των ρευμάτων και των παλιρροιών μπορεί να οδηγήσει το πετρέλαιο στην ακτή, όπου πιθανότατα θα παραχθεί μεγάλη ποσότητα αποβλήτων μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Προκειμένου να περιοριστεί η παραγωγή αποβλήτων εξαιτίας της προσβολής των ακτών από πετρέλαιο είναι απαραίτητη η διενέργεια επιχειρήσεων αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας στη θάλασσα και η συλλογή της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας αποβλήτων.

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η εκτίμηση της παραγωγής αποβλήτων (υγρών και στερεών) μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας. Όμως, στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επεξηγηθεί ο όρος «παραγωγή αποβλήτων» που χρησιμοποιείται συστηματικά. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, με τον όρο «παραγωγή αποβλήτων» (υγρών ή στερεών) περιγράφεται η ποσότητα αποβλήτων που συλλέγεται μετά από ένα περιστατικό ρύπανσης από πετρέλαιο στη θάλασσα.

Προφανώς, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εκτίμηση της συνολικής ποσότητας αποβλήτων που παράγεται μετά την εκδήλωση ενός περιστατικού ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω εκτιμήσεων και σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία για τη συνολική παραγωγή αποβλήτων μετά την εκδήλωση πετρελαιοκηλίδας. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι είναι πολύ δύσκολη η καταγραφή στοιχείων σχετικά με τη συνολική παραγωγή αποβλήτων.

Στο πλαίσιο του πρώτου κεφαλαίου, αρχικά περιγράφονται τα είδη των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων και τονίζεται ο διαχωρισμός τους σε υγρά και στερεά. Στη συνέχεια, αναδεικνύεται η σημασία της διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων και περιγράφονται οι διαδικασίες από τις οποίες απαρτίζεται. Επιπλέον, κρίθηκε ότι ήταν χρήσιμη και η παρουσίαση του νομοθετικού πλαισίου που διέπει αυτές τις εργασίες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται τριάντα ιστορικά ατυχημάτων, βάσει των οποίων αναδείχθηκαν οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγή αποβλήτων. Επιπλέον, σε αυτά τα ιστορικά, στηρίχθηκε και ο σχηματισμός της βάσης δεδομένων του τέταρτου κεφαλαίου. Τα ιστορικά αυτά ελήφθησαν από τις δικτυακές ιστοσελίδες του Cedre (Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution) και του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), με εξαίρεση πέντε περίπου περιστατικών, τα ιστορικά των οποίων ελήφθησαν από την Τεχνική Προστασίας Περιβάλλοντος Α.Ε.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι μαθηματικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των δεδομένων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Αρχικά περιγράφεται η μέθοδος της στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης και στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος της ασαφούς παλινδρόμησης. Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου αναδεικνύονται και οι διαφορές μεταξύ στατιστικής και ασαφούς παλινδρόμησης και επεξηγούνται οι λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν στη χρήση της ασαφούς παλινδρόμησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγή αποβλήτων (υγρών και στερεών) και καταχωρούνται σε δύο βάσεις δεδομένων. Ήταν αναγκαίος ο σχηματισμός δύο βάσεων δεδομένων, μια για τα υγρά και μια για τα στερεά

απόβλητα, καθώς δεν υπάρχει πλήρης ταύτιση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή υγρών αποβλήτων με αυτές που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων. Επιπλέον, σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η πορεία ανάπτυξης του μοντέλου και η πορεία υπολογισμών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται όλοι οι υπολογισμοί που έλαβαν χώρα για την επεξεργασία των δεδομένων. Αρχικά, έγινε ανάλυση των δεδομένων που περιέχονται στις βάσεις δεδομένων για τα υγρά και για τα στερεά απόβλητα με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης ήταν η ανάδειξη των μεταβλητών που πραγματικά επηρεάζουν την παραγωγή αποβλήτων με κριτήρια την τιμή του «R τετράγωνο» και την τιμή “P” (“P value”). Στη συνέχεια, έγινε χρήση της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την επεξεργασία των «σημαντικών» μεταβλητών έτσι όπως αυτές προέκυψαν από την πολλαπλή παλινδρόμηση. Στο πλαίσιο της ανάλυσης με τη μέθοδο της απλής στατιστικής παλινδρόμησης, απομονώθηκαν και κάποιες ακραίες τιμές (“outliers”) προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου. Όμως, σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο δεν πληρούσε όλες τις προϋποθέσεις εφαρμογής της στατιστικής παλινδρόμησης. Κατά συνέπεια, κρίθηκε αναγκαία η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε η ασαφής γραμμική παλινδρόμηση για τις «σημαντικές» μεταβλητές που προέκυψαν από την πολλαπλή παλινδρόμηση.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης των δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτής της παρουσίασης αναφέρονται τα στοιχεία εκείνα που κρίθηκε ότι θα έδιναν μεγαλύτερη αξιοπιστία στο μοντέλο. Τέλος, περιλαμβάνονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 1: Απόβλητα που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων – Επεξεργασία και νομοθεσία.....	12
1.1.Είδη αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.....	12
1.2.Διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.....	14
1.3.Ανάλυση των διαδικασιών που απαρτίζουν τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων.....	15
1.3.1. Συλλογή.....	15
1.3.2. Προσωρινή αποθήκευση.....	17
1.3.3. Μεταφορά.....	20
1.3.4. Ενδιάμεση και τελική αποθήκευση.....	21
1.3.5. Επεξεργασία αποβλήτων.....	22
1.3.6. Τελική διάθεση αποβλήτων.....	25
1.3.7. Αποκατάσταση των χώρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαχείριση των αποβλήτων.....	28
1.4.Περιγραφή του νομικού και θεσμικού πλαισίου από το οποίο διέπεται η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων.....	29
1.4.1. Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες.....	29
1.4.2. Χαρακτηρισμός των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων.....	31
1.4.3. Συλλογή-Συσκευασία-Σήμανση των Επικίνδυνων Αποβλήτων.....	32
1.4.4. Μεταφορά επικίνδυνων αποβλήτων.....	32
1.4.5. Αποθήκευση Επικίνδυνων Αποβλήτων (προσωρινή και μεγάλης χρονικής διάρκειας).....	34
1.4.6. Επεξεργασία – Αξιοποίηση Ε.Α.....	35
1.5.Συμπεράσματα.....	36
Κεφάλαιο 2: Αποθετήριο περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο σε παγκόσμια κλίμακα.....	38
2.1. Aegean Sea.....	38
2.2. Amazzonne.....	39
2.3. Amoco Cadiz.....	40
2.4. Aragon.....	41
2.5. Athos 1.....	42
2.6. Baltic Carrier.....	42
2.7. Black Sea Storm.....	43

2.8. Boehlen.....	43
2.9. Braer.....	44
2.10. Bright Artemis.....	45
2.11. Christos Bitas.....	45
2.12. Coral Bulker.....	47
2.13. Erika.....	47
2.14. Exxon Valdez.....	49
2.15. Haven.....	49
2.16. Hebei Spirit.....	50
2.17. Interceptor.....	51
2.18. Lebanon Conflict.....	51
2.19. Mara A.....	52
2.20. Prestige.....	52
2.21. Riga Sailor.....	54
2.22. Rose G.....	54
2.23. Sea Diamond.....	54
2.24. Sea Empress.....	55
2.25. Selendang Ayu.....	56
2.26. Tanio.....	56
2.27. Tasman Spirit.....	57
2.28. Θεόφιλος.....	57
2.29. Μυρτιδιώτισσα.....	57
2.30. Παναγιώτης Π.....	58
Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση μαθηματικών μεθόδων.....	59
3.1. Στατιστική γραμμική παλινδρόμηση (απλή και πολλαπλή).....	59
3.1.1. Εισαγωγή στη στατιστική γραμμική παλινδρόμηση.....	59
3.1.2. Εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.....	61
3.1.3. Εκτίμηση του σ^2	63
3.1.4. Ανάλυση της διακύμανσης.....	64
3.1.5. Συντελεστής προσδιορισμού R^2	65
3.1.6. Έλεγχος υπόθεσης για την κλίση και το σημείο τομής.....	66
3.1.7. Έλεγχος της σημασίας της παλινδρόμησης.....	67
3.1.8. Προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου.....	68
3.1.9. Παρατηρήσεις σχετικά με την ανάλυση παλινδρόμησης.....	68
3.2. Ασαφής γραμμική παλινδρόμηση.....	69
3.2.1. Εισαγωγή στην ασαφή γραμμική παλινδρόμηση.....	69
3.2.2. Ασαφής συνάρτηση με ασαφείς παραμέτρους.....	69
3.2.3. Ανάπτυξη του μοντέλου ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.....	71
3.2.4. Μέθοδοι ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.....	75
3.2.4.1. Ασαφής παλινδρόμηση με χρήση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας.....	75
3.2.4.2. Ασαφής παλινδρόμηση με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.....	77
3.2.4.2.1. Ασαφής παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του κριτηρίου μέγιστης συμβατότητας.....	77
3.2.4.2.2. Ασαφής παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας.....	79

3.2.4.3. Ανάλυση διαστημάτων (Interval regression).....	79
Κεφάλαιο 4: Περιγραφή μεθοδολογίας.....	81
4.1. Ανάλυση στόχου της παρούσας εργασίας.....	81
4.2. Πορεία ανάπτυξης του μοντέλου.....	81
4.3. Βάση δεδομένων.....	82
4.3.1. Βάση δεδομένων για υγρά απόβλητα.....	83
4.3.2. Βάση δεδομένων για στερεά απόβλητα.....	86
4.4. Πορεία υπολογισμών.....	92
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα.....	93
5.1. Επεξεργασία των δεδομένων για τα υγρά απόβλητα.....	93
5.1.1. Εφαρμογή της μεθόδου της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης στα δεδομένα για τα υγρά απόβλητα.....	93
5.1.2. Εφαρμογή της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή υγρών αποβλήτων με το πετρέλαιο που διαφεύγει στη θάλασσα.....	94
5.1.3. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή υγρών αποβλήτων με το πετρέλαιο που διαφεύγει στη θάλασσα.....	96
5.1.4. Εφαρμογή της μεθόδου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή υγρών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).....	100
5.1.5. Εφαρμογή της μεθόδου απλής ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης για την παραγωγή υγρών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).....	103
5.2. Επεξεργασία των δεδομένων για τα στερεά απόβλητα.....	105
5.2.1. Εφαρμογή της μεθόδου της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης στα δεδομένα για τα στερεά απόβλητα.....	105
5.2.2. Εφαρμογή της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέγεται με την παραγωγή στερεών αποβλήτων.....	107
5.2.3. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή στερεών αποβλήτων με την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέγεται.....	109
5.2.4. Εφαρμογή της μεθόδου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει της ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).....	112
5.2.5. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή στερεών αποβλήτων με την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέγεται μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.....	116
5.2.6. Εφαρμογή της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο με την παραγωγή στερεών αποβλήτων.....	118

5.2.7. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει το μήκος της ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km) με την ποσότητα στερεών αποβλήτων που παράχθηκε.....	120
5.2.8. Εφαρμογή της μεθόδου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει του μήκους ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km) μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).....	123
5.2.9. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή στερεών αποβλήτων με το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.....	126
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	129
6.1. Συμπεράσματα.....	129
6.2. Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	130
Βιβλιογραφία.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Απόβλητα που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων – Επεξεργασία και νομοθεσία

1.1. Είδη αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Κάθε διεθνής μεταφορά πετρελαίου από τα σημεία παραγωγής προς την παγκόσμια αγορά, περιλαμβάνει σε κάποιο στάδιο τη μεταφορά δια θαλάσσης, θέτοντας σε κίνδυνο το θαλάσσιο περιβάλλον. Είτε μια πετρελαιοκηλίδα προκύψει κοντά σε ακτές είτε στα ανοιχτά των ωκεανών, η επίδραση των ανέμων, των ρευμάτων και των παλιρροιών μπορεί να οδηγήσει το πετρέλαιο στην ακτή, όπου πιθανότατα θα παραχθεί μεγάλη ποσότητα αποβλήτων μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Προκειμένου να περιοριστεί η παραγωγή αποβλήτων εξαιτίας της προσβολής των ακτών από πετρέλαιο είναι απαραίτητη η διενέργεια επιχειρήσεων αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας στη θάλασσα και η συλλογή της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας αποβλήτων.

Οι εργασίες αντιμετώπισης της ρύπανσης στη θάλασσα και οι εργασίες καθαρισμού και αποκατάστασης των ακτογραμμών, οι οποίες ακολουθούν την εκδήλωση ενός περιστατικού ρύπανσης από πετρέλαιο, προκαλούν την παραγωγή διαφόρων ειδών αποβλήτων με συνέπεια να αυξάνεται κατά πολύ η ποσότητα των αποβλήτων που πρέπει να υποστούν επεξεργασία¹ (σε ακραίες περιπτώσεις τα παραγόμενα απόβλητα ενδέχεται να είναι έως και 30 φορές περισσότερα απ' ό,τι το πετρέλαιο που διέφυγε στη θάλασσα).

Τα συνηθέστερα είδη αποβλήτων που δημιουργούνται είναι τα ακόλουθα:

- θαλασσινό νερό αναμεμιγμένο με πετρέλαιο,
- ιζήματα (άμμος, πέτρες που έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο),
- προϊόντα καταπολέμησης της ρύπανσης (π.χ. απορροφητικά, χημικά διασκορπιστικά, κ.ά.), τα οποία έχουν έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο,
- εξοπλισμός (συμπεριλαμβανομένων των μέσων ατομικής προστασίας), ο οποίος έχει έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο,
- σοροί ζώων και πτηνών οι οποίες έχουν έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο.

Τα απόβλητα αυτά διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- τα υγρά απόβλητα, τα οποία παράγονται κατά τις επιχειρήσεις ανάκτησης του πετρελαίου οι οποίες λαμβάνουν χώρα στη θάλασσα, στις παράκτιες περιοχές, στα λιμάνια και σε απαστραγγιστικά χαντάκια που βρίσκονται στην ξηρά,
- τα στερεά απόβλητα τα οποία παράγονται κατά τη διάρκεια των εργασιών καθαρισμού των ακτών.

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν υψηλά επίπεδα γαλακτώματος², τα οποία ποικίλουν ανάλογα με τον βαθμό διαχωρισμού νερού-πετρελαίου και τις τεχνικές τελικής διάθεσης νερού που

1. Από τους 20.000 τόνους πετρελαίου που διέφυγε στη θάλασσα μετά τη βύθιση του “Erika”, υπολογίζεται ότι παράχθηκαν πάνω από 250.000 τόνοι ελαιωδών αποβλήτων.
2. Γαλάκτωμα σχηματίζεται όταν δύο υγρά συνδυάζονται, με το ένα να καταλήγει να διαλύεται μέσα στο άλλο. Με τον όρο γαλακτωματοποίηση αργού πετρελαίου περιγράφεται η διαδικασία κατά την οποία σταγόνες θαλασσινού νερού διαλύονται μέσα στο πετρέλαιο.

χρησιμοποιούνται κατά τις εργασίες ανάκτησης και αποθήκευσης.

Με τον όρο στερεά απόβλητα περιγράφονται τα απόβλητα που περιέχουν υψηλό ποσοστό της ρυπαντικής ουσίας (και έχουν συνήθως τη μορφή πολτού ή λάσπης), ο εξοπλισμός που έχει έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο (μέσα ατομικής προστασίας, απορροφητικά, κ.ά.) καθώς και οι πέτρες, τα φύκια και τα ζώα τα οποία έχουν έρθει σε επαφή με το πετρέλαιο.

Το γαλλικό κέντρο τεκμηρίωσης, έρευνας και πειραματισμού για ρύπανση της θάλασσας από ατυχήματα (Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution – CEDRE), έχει συγκεντρώσει τα είδη των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων σε έναν πίνακα. Ο πίνακας αυτός περιέχει σχόλια σχετικά με την επεξεργασία που πρέπει να υποστεί κάθε είδος αποβλήτων και αποσκοπεί στην ομοιογένεια της ανταπόκρισης των χωρών της Μεσογείου σε ζητήματα διαχείρισης αποβλήτων από πετρελαιοκηλίδες. Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιείται συχνά σαν αναφορά και κατά συνέπεια κρίνεται σκόπιμη η παράθεση του.

Πίνακας 1.1.: Κατηγοριοποίηση αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.

Κατηγορίες	% Πετρέλαιο	% Νερό	Ορυκτή ύλη	Οργανική ύλη	Σχόλια
Υγρά	> 10%	0 - 90%	< 10%	< 10%	Απομάκρυνση όσο περισσότερου νερού γίνεται με καθίζηση
Πολτός & στερεά (άμμος...)	> 10%	10 - 20%	> 10%	< 10%	Καθορισμός επεξεργασίας ανάλογα με το είδος της ρυπαντικής ουσίας
Μολυσμένα βότσαλα & πέτρες	> 10%	1%	> 80%	< 10%	Κριτήριο επιλογής: σε τι βαθμό έχει μολυνθεί η επιφάνεια
Μολυσμένα απορροφητικά υλικά	> 5%	< 10%	< 10%	< 5%	Σφουγγαρίστρες, μαξιλάρια, σεντόνια...
Μολυσμένα φύκια	> 5%	< 20%	< 20%	> 80%	Ουσίες που μπορούν να υποστούν ζύμωση (ενοχλητικές μυρωδιές)
Μολυσμένα στερεά απόβλητα	> 5%	< 10%	< 10%	ποικίλει	Γάντια, μπότες, στολές...
Μολυσμένη πανίδα	> 5%	< 15%	< 10%	> 70%	Πουλιά και θηλαστικά

Η παραγωγή αποβλήτων διαφέρει από ένα περιστατικό ρύπανσης σε άλλο και δεν είναι απαραίτητα ανάλογη με το μέγεθος της κηλίδας. Οι ποσότητες και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων που συλλέγονται ποικίλουν ανάλογα με το είδος του πετρελαίου που προκάλεσε τη ρύπανση, τις καιρικές συνθήκες και την αιγιαλίτιδα ζώνη, ενώ βρίσκονται σε πλήρη εξάρτηση με την οργάνωση της επιχείρησης αποκατάστασης και τις διαθέσιμες τεχνικές διαχείρισης.

1.2. Διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων

Με τον όρο διαχείριση αποβλήτων³ περιγράφονται η συλλογή, η μεταφορά, η αξιοποίηση και η διάθεση των αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της εποπτείας των εργασιών αυτών, της επίβλεψης των χώρων απόρριψης και της αποκατάστασης των χώρων αποθήκευσης και επεξεργασίας. Κατά συνέπεια, η διαχείριση των αποβλήτων είναι συχνά η πιο δαπανηρή και η πιο μεγάλη σε διάρκεια εκ των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από την καταπολέμηση μιας πετρελαιοκηλίδας, αποτελείται από δύο κύριες φάσεις. Η πρώτη φάση θα πρέπει να λαμβάνει χώρα παράλληλα με τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης της ρύπανσης και περιλαμβάνει τα εξής:

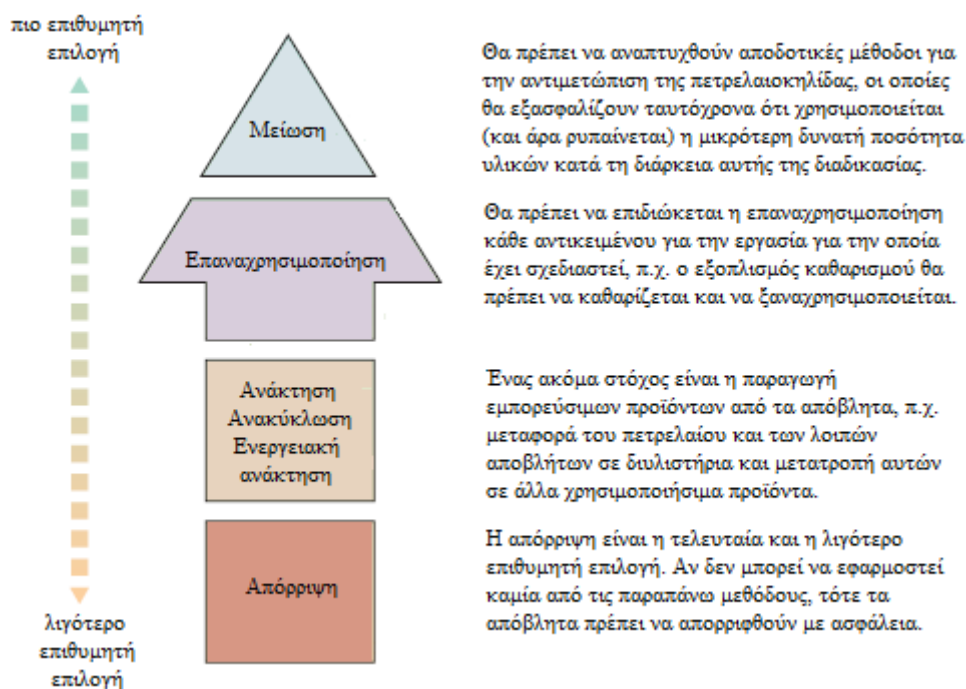
- προσωρινή αποθήκευση των αποβλήτων σε εγκαταστάσεις που γειτνιάζουν με τον χώρο όπου εκτελούνται οι εργασίες καθαρισμού,
- ενδιάμεση αποθήκευση σε εγκαταστάσεις οι οποίες υποβοηθούν τις εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης και εδρεύουν σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων ή ακόμα και μερικών χιλιομέτρων από τους χώρους όπου εκτελούνται οι εργασίες καθαρισμού,
- τελική αποθήκευση κατά την οποία συγκεντρώνονται όλα τα απόβλητα τα οποία έχουν διαχωριστεί,
- μεταφορά μεταξύ των χώρων αποθήκευσης.

Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει:

- μεθόδους επεξεργασίας,
- αναβάθμιση ή διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων,
- αποκατάσταση όλων των χώρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαχείριση των αποβλήτων.

Όλες οι διεργασίες οι οποίες συνιστούν τις δύο φάσεις της διαχείρισης των αποβλήτων θα πρέπει να διεξάγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των συλλεχθέντων αποβλήτων. Άλλωστε, τα ποσοστά επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης είναι αυτά που χαρακτηρίζουν το πόσο επιτυχής είναι μια επιχείρηση διαχείρισης αποβλήτων, τουλάχιστον από τη σκοπιά της ασφάλειας του περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, το μοντέλο της ιεραρχίας των αποβλήτων ('waste hierarchy') μπορεί να αποδειχθεί ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση των αποβλήτων.

3. Οδηγία 2006/12/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 5^{ης} Απριλίου 2006 περί των στερεών αποβλήτων (EE L 114/27.4.2006) – Άρθρο 1.



Σχήμα 1.1.: Ιεραρχία αποβλήτων (waste hierarchy)⁴

Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου θα γίνει ανάλυση των διεργασιών από τις οποίες απαρτίζεται η διαχείριση των αποβλήτων, ενώ παράλληλα θα γίνει και μια προσπάθεια απόδοσης του νομικού και θεσμικού πλαισίου από το οποίο διακρίνονται αυτές τις διεργασίες.

1.3. Ανάλυση των διαδικασιών που απαρτίζουν τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων

1.3.1. Συλλογή

Η διαδικασία της συλλογής των αποβλήτων μετά την εκδήλωση ενός περιστατικού ρύπανσης, αν και ανήκει στην επιχείρηση αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας, είναι καθοριστικής σημασίας για τη διαχείριση των αποβλήτων που θα ακολουθήσει. Προκειμένου η διαδικασία αυτή να είναι αποδοτική θα πρέπει να αποφεύγεται η εξάπλωση και ο ενταφιασμός των αποβλήτων. Επιπλέον, παράλληλα με τη συλλογή θα πρέπει να διεξάγονται οι διεργασίες του διαχωρισμού και της ελαχιστοποίησης των αποβλήτων.

Ο διαχωρισμός των αποβλήτων σε ένα τόσο πρωταρχικό στάδιο, όπως είναι αυτό της συλλογής, διευκολύνει την επεξεργασία και την τελική διάθεση των αποβλήτων, ενώ παράλληλα επιφέρει μείωση του κόστους της επεξεργασίας. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι διαχωρισμού του πετρελαίου από το νερό ή από άλλα υλικά τα οποία έχει προσβάλει. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκείνες που είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν στον χώρο συλλογής των αποβλήτων.

4. Αναφορές IPIECA (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association), τεύχος 12: «Οδηγίες για την ελαχιστοποίηση και τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις πετρελαιοκηλίδες»

Πίνακας 1.2.: Μέθοδοι διαχωρισμού που μπορούν να εφαρμοστούν στους χώρους συλλογής των αποβλήτων.

Είδος υλικού	Μέθοδοι διαχωρισμού
Υγρά απόβλητα	
Μη-γαλακτωματοποιημένο πετρέλαιο	Διαχωρισμός καθαρού νερού με βαρύτητα. Μηχανική απομάκρυνση διαχωρισμένου πετρελαίου.
Γαλακτωματοποιημένο πετρέλαιο	Διάσπαση του γαλακτώματος μέσω: - θερμικής επεξεργασίας - χημικών διασκορπιστικών - ανάμιξης με άμμο Μηχανική απομάκρυνση διαχωρισμένου πετρελαίου.
Στερεά απόβλητα	
Άμμος αναμεμιγμένη με πετρέλαιο	Συλλογή του υγρού πετρελαίου που φιλτράρεται μέσα από την άμμο κατά τη διάρκεια της προσωρινής αποθήκευσης. Εξαγωγή του πετρελαίου από την άμμο μέσω πλυσίματος με νερό ή με διάλυμα. Αφαίρεση του στερεού πετρελαίου με κοσκίνισμα.
Πετρέλαιο αναμεμιγμένο με βότσαλα και χαλίκια	Συλλογή του υγρού πετρελαίου που φιλτράρεται μέσα από τα υλικά της παραλίας κατά τη διάρκεια της προσωρινής αποθήκευσης. Αφαίρεση του πετρελαίου από τα υλικά της παραλίας μέσω πλυσίματος με νερό ή με διάλυμα.
Πετρέλαιο αναμεμιγμένο με ξύλο, πλαστικό, φύκια και απορροφητικά υλικά	Συλλογή του υγρού πετρελαίου που φιλτράρεται μέσα από τα χαλάσματα κατά τη διάρκεια της προσωρινής αποθήκευσης. Ξέπλυμα του πετρελαίου από τα χαλάσματα με νερό. Μηχανική απομάκρυνση του διαχωρισμένου πετρελαίου.

Η διεργασία της ελαχιστοποίησης συνίσταται στη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε τελική διάθεση, περιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες. Για να επιτευχθεί μείωση, θα πρέπει να γίνονται οι ακόλουθες ενέργειες:

- Αναγνώριση των ακτών που ενδέχεται να επηρεαστούν προτού το πετρέλαιο φτάσει σε αυτές. Οι ακτές αυτές θα πρέπει να καθαριστούν από σκουπίδια έτσι ώστε να μειωθεί η τελική ποσότητα των αποβλήτων προς επεξεργασία.
- Διεξαγωγή διαχωρισμού κατά το στάδιο της συλλογής των διάφορων μολυσμένων αποβλήτων.
- Επαναχρησιμοποίηση του εξοπλισμού συλλογής και των μέσων ατομικής προστασίας ύστερα από κατάλληλο καθαρισμό.
- Επί τόπου χειρισμός αποβλήτων (εφόσον είναι εφικτό) προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα που χρειάζεται περαιτέρω μεταφορά και επεξεργασία. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι της καύσης (αν επιτρέπεται), του κοσκίνισματος της άμμου και της βιολογικής επεξεργασίας.
- Συνετή χρήση απορροφητικών ουσιών.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου καθαρισμού του πετρελαίου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς διαφορετικά είδη περιβάλλοντος και διαφορετικές μέθοδοι καθαρισμού προκαλούν τη δημιουργία διαφορετικών ειδών αποβλήτων. Επομένως, για να γίνει σωστή επιλογή πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι:

- το είδος του περιβάλλοντος που έχει πληγεί από πετρέλαιο (π.χ. βραχώδης ακτή, αμμώδης ακτή),
- το είδος του πετρελαίου και ο βαθμός εισχώρησης αυτού στο υπόστρωμα,
- οι καιρικές συνθήκες και η κατάσταση της θάλασσας,
- η προσβασιμότητα των κατάλληλων μηχανημάτων,
- η διαθεσιμότητα σε εξοπλισμό και προσωπικό.

Η εκτίμηση των συνθηκών του περιβάλλοντος για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου καθαρισμού μπορεί να συμβάλει στην αποφυγή κάποιων αποβλήτων. Όμως, κάθε μέθοδος καθαρισμού προκαλεί την παραγωγή κάποιων συγκεκριμένων αποβλήτων ανεξαρτήτως του περιβάλλοντος στο οποίο εφαρμόζεται. Στον Πίνακα της επόμενης σελίδας παρατίθενται τα είδη αποβλήτων που προκαλεί κάθε μέθοδος καθαρισμού.

1.3.2. Προσωρινή αποθήκευση

Στα περισσότερα περιστατικά ρύπανσης, ο ρυθμός ανάκτησης του πετρελαίου (στη θάλασσα και στην ξηρά) είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης των αποβλήτων από τον χώρο συλλογής (ακόμη και στις περιπτώσεις όπου οι μέθοδοι και τα μέσα έχουν μελετηθεί και έχουν περιληφθεί στο Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης). Μια τέτοια κατάσταση απαιτεί πρόνοια χώρου προσωρινής αποθήκευσης ο οποίος θα πρέπει να εδρεύει κοντά στη θέση ανάκτησης του πετρελαίου.






Οι χώροι προσωρινής αποθήκευσης θα πρέπει να εντοπίζονται και να τίθενται σε λειτουργία αμέσως μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας, ενώ θα ήταν ιδανική για την επιχείρηση η ένταξη της ακριβούς τοποθεσίας των χώρων αυτών στα τοπικά σχέδια έκτακτης ανάγκης. Το μέγεθος, ο αριθμός και το είδος των εγκαταστάσεων που θα χρειαστούν για την προσωρινή αποθήκευση εξαρτάται από την ποσότητα και τη φύση των ανακτώμενων υλικών. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να γίνεται ξεχωριστή αποθήκευση των υγρών και των στερεών αποβλήτων εφόσον αυτά έχουν υποστεί διαχωρισμό κατά το στάδιο της συλλογής.

Η επιλογή των χώρων προσωρινής αποθήκευσης και οι λειτουργίες που επιτελούνται στο πλαίσιο αυτών των χώρων θα πρέπει να γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται κατά το δυνατό ο κίνδυνος πρόκλησης περαιτέρω ρύπανσης στο περιβάλλον. Επιπλέον, οι χώροι που θα επιλεγούν θα πρέπει:

- να εδρεύουν μακριά από περιοχές που είναι κατοικημένες, που θεωρούνται ευαίσθητες σε μόλυνση των υδροφόρων στρωμάτων ή που παρουσιάζουν μια γενικότερη περιβαλλοντική ευαισθησία,
- να απέχουν τουλάχιστον δέκα μέτρα από οποιαδήποτε ροή υδάτων,
- να διαθέτουν εξοπλισμό και εγκαταστάσεις που θα παρέχουν τη δυνατότητα χειρισμού βροχοπτώσεων και ενδεχόμενων διαφυγών πετρελαίου.

Παρόλα αυτά υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο να είναι αναπόφευκτη η εγκατάσταση χώρων προσωρινής αποθήκευσης σε μια περιβαλλοντικά ευαίσθητη περιοχή. Σε μια τέτοια περίπτωση θα πρέπει να ληφθούν επιπρόσθετα μέτρα περιορισμού των αποβλήτων.

Πίνακας 1.3.: Απόβλητα που προκαλούνται από την εφαρμογή μεθόδων καθαρισμού.

Μέθοδος καθαρισμού	Επίδραση στην παραγωγή αποβλήτων	Είδη αποβλήτων που δημιουργούνται
 <p>Εφαρμογή χημικών διασκορπιστικών</p>	<p>Τα χημικά διασκορπιστικά χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση της πετρελαιοκηλίδας σε μικρότερα μέρη έτσι ώστε να μειώνονται οι συγκεντρώσεις σε υδρογονάνθρακες χάρη στη διαλυτική δράση του ωκεανού. Η μέθοδος δεν είναι αποδοτική για όλα τα είδη του πετρελαίου και η εφαρμογή της απαγορεύεται σε ορισμένα περιβάλλοντα.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Δεν δημιουργούνται απόβλητα που περιέχουν υδρογονάνθρακες - Μέσα ατομικής προστασίας - Άδειες συσκευασίες διασκορπιστικών
<p>Επιχειρήσεις αποκατάστασης στη θάλασσα</p>  	<p>Το πετρέλαιο ανακτάται από την επιφάνεια της θάλασσας κάνοντας χρήση συσκευών όπως είναι τα πλωτά φράγματα. Μπορεί επίσης να χρειαστούν αποθηκευτικά συστήματα κατάλληλου μεγέθους. Για την περίπτωση παχύρρευτων πετρελαίων τα συστήματα αυτά θα πρέπει να διαθέτουν και θερμαντικά στοιχεία. Κατά τη διάρκεια της επιχείρησης θα πρέπει επίσης να εκτελεστούν διεργασίες στο πλαίσιο των συστημάτων μεταφοράς και στο πλαίσιο των εγκαταστάσεων υποδοχής.</p>	<p>Οι εργασίες ανάκτησης του πετρελαίου θα προκαλέσουν ενδεχομένως την παραγωγή μεγάλης ποσότητας αποβλήτων ελαίων και νερού για επεξεργασία. Ο όγκος των αποθηκευτικών συστημάτων θα πρέπει να είναι ανάλογος με τις δυνατότητες ανάκτησης των συστημάτων περισυλλογής πετρελαιοειδών (skimmers). Το είδος του πετρελαίου επηρεάζει τα απόβλητα που προκύπτουν. Ειδικά το παχύρρευστο πετρέλαιο εισχωρεί σε σκουπίδια και προκαλεί μεγάλες ποσότητες αποβλήτων ενώ μπορεί να παρουσιάσει και μεγάλες δυσκολίες κατά το χειρισμό του.</p>
 <p>Καθαρισμός ακτογραμμών</p>	<p>Το πετρέλαιο ανακτάται από τις ακτές είτε με μηχανικά είτε με χειρονακτικά μέσα. Γενικά, προτιμάται η χειρονακτική ανάκτηση επειδή επιφέρει ελαχιστοποίηση της ποσότητας των αποβλήτων που δημιουργούνται. Μηχανές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά των αποβλήτων από την ακτή προς τους χώρους πρωταρχικής αποθήκευσης. Για τη συγκέντρωση του ανακτώμενου πετρελαίου μπορεί να γίνει χρήση φορητών δεξαμενών ή παρατεταγμένων λάκκων στην ακτή. Το είδος της ακτογραμμής και ο βαθμός πρόσβασης σε αυτή υπαγορεύει το είδος της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί, η οποία με τη σειρά της καθορίζει την ποσότητα των αποβλήτων που θα συλλεχθεί.</p>	<p>Το είδος του πετρελαίου που διαφεύγει στο περιβάλλον επηρεάζει σημαντικά την ποσότητα των ελαιωδών αποβλήτων που προκύπτουν. Οι μέθοδοι του διαχωρισμού και της ελαχιστοποίησης των αποβλήτων είναι καθοριστικές για τη διασφάλιση της αποδοτικότητας της επιχείρησης. Αυτές οι μέθοδοι θα πρέπει να εφαρμόζονται από την ακτή και τη θάλασσα όπου συλλέγονται τα απόβλητα μέχρι τους χώρους τελικής διάθεσης προκειμένου να αποφευχθεί η εκτός ελέγχου αύξηση των αποβλήτων. Τα απόβλητα θα πρέπει να χειρίζονται κατά τρόπο ώστε να αποφεύγεται η δευτερογενής ρύπανση.</p>
 <p>Επί τόπου καύση</p>	<p>Η μέθοδος περιλαμβάνει καύση του πετρελαίου με χρήση φραγμάτων φωτιάς προκειμένου να αυξηθεί το πάχος του στρώματος πετρελαίου και να μπορεί να υποστεί καύση. Η γήρανση και η γαλακτωματοποίηση του πετρελαίου αναστέλλουν τη διαδικασία. Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα είδη πετρελαίου και για κάθε είδος περιβάλλοντος. Η πρόκληση ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η δημιουργία παχύρρευτων υπολειμμάτων περιορίζουν την εφαρμογή.</p>	<p>Η επί τόπου καύση μπορεί να ελαττώσει την ποσότητα του πετρελαίου στο περιβάλλον. Όμως, τα υλικά που θα απομείνουν ενδέχεται να είναι πιο "επίμονα".</p> <ul style="list-style-type: none"> - Καμένα κατάλοιπα πετρελαίου - Κατεστραμμένα φράγματα από το πετρέλαιο ή από τη φωτιά - Μολυσμένα από το πετρέλαιο σκάφη - Μολυσμένα μέσα ατομικής προστασίας από το πετρέλαιο

Ακολουθώς παρατίθενται οι συνηθέστερες μέθοδοι προσωρινής αποθήκευσης:

- Αυτοσχέδιοι λάκκοι. Αν οι τοπικές συνθήκες το επιτρέπουν, ο πιο απλός τρόπος προσωρινής αποθήκευσης των υλικών που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο είναι το άνοιγμα λάκκων στο έδαφος. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου σε περιστατικά ρύπανσης κατά το παρελθόν έχει δείξει ότι οι πιο κατάλληλοι λάκκοι έχουν διαστάσεις μήκους 10m, πλάτους 2-3m και βάθους 1,5-2m. Προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή του πετρελαίου στο έδαφος με αποτέλεσμα τη μόλυνση των υδροφόρων στρωμάτων, οι λάκκοι πρέπει να επενδύονται με μεγάλου πάχους φύλλα πλαστικού (πολυαιθυλένιο, PVC) ή με φύλλα από λάστιχο. Πριν τοποθετηθεί το πλαστικό στον λάκκο, είναι χρήσιμο να καλυφθεί η επιφάνεια του λάκκου με άμμο ή χονδρό ύφασμα προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη καταστροφή των πλαστικών φύλλων από τις πέτρες. Όταν αναμένονται βροχοπτώσεις, οι λάκκοι δεν πρέπει να πληρούνται μέχρι πάνω με υλικά προκειμένου να προληφθεί ενδεχόμενη υπερχειλίση των λάκκων. Εναλλακτικά, είναι δυνατή η κατασκευή τοιχωμάτων (1-1,5m) ώστε να σχηματισθούν πάνω από το έδαφος τετράγωνοι αποθηκευτικοί χώροι οι οποίοι πρέπει να επενδύονται για να αποφευχθεί διαρροή πετρελαίου. Μετά την απομάκρυνση των υλικών, η περιοχή που χρησιμοποιήθηκε για προσωρινή αποθήκευση (είτε πρόκειται για λάκκους είτε πρόκειται για χώρους πάνω από το έδαφος που οριοθετούνται από τοιχώματα) θα πρέπει να αποκαθιστάται.
- Βαρέλια πετρελαίου ανοικτά στο πάνω μέρος. Συνήθως είναι διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέσα προσωρινής αποθήκευσης οποιασδήποτε ποιότητας πετρελαίου που συλλέχθηκε. Επίσης, είναι κατάλληλα για τη μεταφορά πετρελαίου μεγάλου ιξώδους και γαλακτωμάτων. Προκειμένου να αποφευχθεί ρύπανση της χερσαίας ζώνης που χρησιμοποιείται για την απόθεση των γεμάτων βαρελιών, είναι δυνατό να γίνει χρήση φύλλων πλαστικού ή ελαστικού ανθεκτικού στα πετρελαιοειδή.
- Πλαστικοί σάκοι βαριάς χρήσης. Είναι το καταλληλότερο μέσο αποθήκευσης και μεταφοράς υλικών που προσβλήθηκαν με πετρέλαιο και συλλέχθηκαν χειρωνακτικά από τις ακτές. Το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθούν πλαστικοί σάκοι, πριν αυτοί μεταφερθούν για τελική διάθεση, πρέπει να καλυφθεί με πλαστικό ή νάιλον. Όταν γίνεται χρήση τέτοιων σάκων θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες στις οποίες εκτίθενται οι σάκοι, διότι αν εκτεθούν σε δυνατό ηλιακό φως για 1-2 εβδομάδες υπάρχει κίνδυνος να σπάσουν και να ελευθερωθούν οι πετρελαιοειδείς ουσίες που συλλέχθηκαν. Η χρήση αυτών των πλαστικών σάκων δημιουργεί την παραγωγή επιπλέον υλικών για επεξεργασία καθώς τίθεται το πρόβλημα της διάθεσης τους όταν πια αδειάζουν από το περιεχόμενο τους.
- Εύκαμπτες δεξαμενές. Οι εύκαμπτες δεξαμενές ανοιχτής οροφής και οι δεξαμενές τύπου ασκού, με ή χωρίς ενίσχυση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσωρινή αποθήκευση υγρού πετρελαίου, ειδικότερα κατά την έναρξη των επιχειρήσεων απορρύπανσης. Δεν είναι κατάλληλες για την αποθήκευση στερεών υλικών που ρυπάνθηκαν από πετρέλαιο (χαλίκια, απορρίμματα, πέτρες).
- Αποθηκευτική ικανότητα εγκαταστάσεων. Αν υπάρχουν αποθηκευτικοί χώροι σε διυλιστήρια, εγκαταστάσεις διακίνησης πετρελαιοειδών, σταθμούς αφερμάτωσης κλπ.

στην περιοχή όπου εκτελούνται επιχειρήσεις απορρύπανσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση συλλεγόμενων υγρών πετρελαίων. Οι εγκαταστάσεις αυτές θα πρέπει να περιλαμβάνονται στο Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης (δηλαδή να έχει μελετηθεί, κατά το στάδιο του σχεδιασμού, η χωρητικότητα και οι τύποι του πετρελαίου που μπορούν να αποθηκευθούν προσωρινά με αυτόν τον τρόπο) έτσι ώστε να μπορεί να γίνει άμεση χρήση αυτών κατά την εκδήλωση ενός περιστατικού ρύπανσης.

Οι εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης αποτελούν ενδιάμεσους σταθμούς των αποβλήτων μεταξύ του χώρου όπου επιτελείται η επιχείρηση καθαρισμού και των εγκαταστάσεων μακροχρόνιας αποθήκευσης και επεξεργασίας. Η διάρκεια λειτουργίας των εν λόγω εγκαταστάσεων είναι ανάλογη με τη διάρκεια της επιχείρησης καθαρισμού και αποκατάστασης.

Τέλος, κατά το στάδιο της προσωρινής αποθήκευσης είναι πολύ σημαντικό να γίνεται σήμανση των δεξαμενών ή των άλλων συσκευασιών που περιέχουν τα απόβλητα. Πιο συγκριμένα, θα πρέπει να σημειώνονται το είδος, η ποσότητα και η επικινδυνότητα των αποβλήτων που περιέχουν. Η σήμανση των αποβλήτων είναι μια απαραίτητη διαδικασία προκειμένου να διεξαχθεί ασφαλής μεταφορά των αποβλήτων.

1.3.3. Μεταφορά

Κατά την αντιμετώπιση ενός περιστατικού ρύπανσης από πετρέλαιο θα χρειαστεί να γίνει μεταφορά των αποβλήτων τόσο εντός του χώρου όπου επιτελούνται οι εργασίες καθαρισμού όσο και μεταξύ της περιοχής όπου διεξάγεται η επιχείρηση καθαρισμού και των χώρων αποθήκευσης/επεξεργασίας. Επομένως, στα μεταφορικά μέσα περιλαμβάνονται πλοία και οχήματα, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και ελικόπτερα.

Πρωταρχικός στόχος κατά τη μεταφορά των αποβλήτων είναι η αποφυγή της εξάπλωσης της ρύπανσης σε περιοχές που δεν έχουν πληγεί. Κατά συνέπεια, τα μεταφορικά μέσα που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με στεγανές δεξαμενές ή άλλου τύπου στεγανές συσκευασίες οι οποίες δε θα επιτρέπουν τη διαφυγή των συλλεχθέντων υλικών στο περιβάλλον. Επιπλέον, συνιστάται η απολύμανση των τροχοφόρων οχημάτων πριν την απομάκρυνση τους από την πληγείσα περιοχή προς αποφυγή πρόκλησης ρύπανσης σε δρόμους/αυτοκινητόδρομους.

Το πετρέλαιο που συλλέγεται κατά τη διάρκεια καταπολέμησης μιας πετρελαιοκηλίδας, μακριά από τις ακτές, είναι δυνατό να αποθηκευθεί και να μεταφερθεί σε:

- ενσωματωμένες δεξαμενές που βρίσκονται στα σκάφη περισυλλογής,
- ρυμουλκούμενες εύκαμπτες πλωτές δεξαμενές,
- φορηγίδες (αυτοκινούμενες ή ρυμουλκούμενες).

Για τη μεταφορά αποβλήτων εντός της ακτής γίνεται χρήση μικρών οχημάτων όπως είναι τα απορριμματοφόρα και τα ανατρεπόμενα φορηγά.

Η μεταφορά αποβλήτων μεταξύ της περιοχής όπου ανακτάται το πετρέλαιο και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και επεξεργασίας, απαιτεί επίσης χρήση κατάλληλων οχημάτων. Τα υγρά απόβλητα μεταφέρονται με βυτιοφόρα ενώ τα στερεά απόβλητα (σε αυτά περιλαμβάνονται το πετρέλαιο με υψηλό ιξώδες και τα γαλακτώματα καθώς αυτά δεν

μπορούν να αντληθούν σε δεξαμενές) μεταφέρονται συνήθως σε ανοιχτά κιβώτια ή κάδους τα οποία έχουν σφραγιστεί προκειμένου να μην υπάρξει κάποια διαρροή στο περιβάλλον. Όμως, σε περίπτωση ειδικής ανάγκης, μπορεί να είναι αναγκαία η χρήση και οχημάτων που δεν προορίζονται για μεταφορά πετρελαίου υπό κανονικές συνθήκες (π.χ. εκσκαφείς, αγροτικά οχήματα κ.ά.).

Προκειμένου να διεξαχθεί άμεση, ασφαλής και αποδοτική μεταφορά των αποβλήτων μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας, θα πρέπει οι αρμόδιες αρχές να έχουν κάνει συμφωνίες με εταιρείες που παρέχουν μεταφορικές υπηρεσίες κατά το στάδιο του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης. Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνεται καταγραφή των στοιχείων των εταιρειών και του αντίστοιχου εξοπλισμού στο σχέδιο έκτακτης ανάγκης.

Τέλος, όσον αφορά στη μεταφορά των αποβλήτων, είναι πολύ σημαντική η εποπτεία των κινήσεων των οχημάτων που μεταφέρουν τα απόβλητα. Κάθε φορτίο και κάθε όχημα συνοδεύεται από έγγραφο στα οποία δηλώνεται η αφετηρία, ο προορισμός, η φύση και το βάρος των μεταφερόμενων αποβλήτων.

1.3.4. Ενδιάμεση και τελική αποθήκευση

Τα απόβλητα που συλλέγονται μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας θα πρέπει να απομακρύνονται από τους χώρους προσωρινής αποθήκευσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να συνεχίζεται αποτελεσματικά η ανάκτηση του πετρελαίου και η συλλογή των υπόλοιπων υλικών. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή η άμεση επεξεργασία ή η τελική διάθεση αυτών των υλικών είτε επειδή οι ρυθμοί επεξεργασίας/τελικής διάθεσης είναι μικρότεροι από τον ρυθμό ανάκτησης του πετρελαίου και των λοιπών υλικών είτε επειδή απαιτείται κάποιος χρόνος προκειμένου να οργανωθούν οι διαδικασίες αυτές και να εφαρμοστούν αυτά που προβλέπει το σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων. Μια τέτοια κατάσταση απαιτεί πρόνοια χώρων ενδιάμεσης και τελικής αποθήκευσης.

Οι χώροι ενδιάμεσης αποθήκευσης εδρεύουν σε απόσταση μικρότερη των πέντε χιλιομέτρων από την ακτή όπου συλλέγονται τα απόβλητα και προσφέρουν χρόνο στις αρμόδιες αρχές προκειμένου να οργανώσουν τους χώρους τελικής αποθήκευσης ενώ παράλληλα συνεχίζεται η ανάκτηση του πετρελαίου. Στο πλαίσιο των χώρων αυτών επιτελείται περαιτέρω διαχωρισμός και συσκευασία των αποβλήτων (είναι πολύ σημαντικό να διατηρείται ο διαχωρισμός που έχει ήδη γίνει κατά το στάδιο της συλλογής για να μην χάνεται πολύτιμος χρόνος για την επανάληψη της ίδιας διαδικασίας), ενώ αν υπάρχει δυνατότητα γίνεται και προ-επεξεργασία των αποβλήτων με κάποια από τις μεθόδους που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, η ύπαρξη και η λειτουργία των χώρων αυτών συμβάλλει στην αποδοτικότερη μεταφορά των αποβλήτων καθώς γίνονται λιγότερα ταξίδια προς τον τελικό προορισμό και μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου και τα λοιπά κόστη ενώ παράλληλα είναι λιγότερα τα οχήματα που μολύνονται.

Η ανάγκη για δημιουργία χώρων ενδιάμεσης αποθήκευσης γίνεται κατανοητή αν κανείς μελετήσει την περίπτωση του δεξαμενοπλοίου “Erika” το οποίο βυθίστηκε τον Δεκέμβριο του 1999 σε γαλλικά ύδατα. Κατά την επιχείρηση καταπολέμησης της πετρελαιοκηλίδας που προέκυψε, επετεύχθη αρκετά ικανοποιητικός διαχωρισμός του πετρελαίου στο πλαίσιο της προσωρινής αποθήκευσης. Στη συνέχεια, τα απόβλητα οδηγήθηκαν σε αποθηκευτικούς χώρους πριν την τελική διάθεση. Όμως, εξαιτίας του ρυθμού ανάκτησης πετρελαίου, οι αποθηκευτικοί χώροι άρχισαν να δέχονται απόβλητα προτού να είναι σε θέση να

λειτουργήσουν κανονικά και ήταν αδύνατο να διατηρηθεί ο διαχωρισμός που είχε ήδη επιτευχθεί σε πρότερο στάδιο. Κατά συνέπεια, η επαναταξινόμηση των αποβλήτων διήρκεσε έξι μήνες.

Οι χώροι τελικής αποθήκευσης τροφοδοτούν με απόβλητα τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας σύμφωνα με τις ακριβείς δυνατότητες υποδοχής και επεξεργασίας που αυτές διαθέτουν. Επομένως, οι χώροι αυτοί προσφέρουν τον απαραίτητο χρόνο για την εφαρμογή της επεξεργασίας και της τελικής διάθεσης των διαφόρων κατηγοριών αποβλήτων. Στο πλαίσιο των χώρων τελικής αποθήκευσης είναι δυνατή η ολοκλήρωση των διαδικασιών διαχωρισμού και προ-επεξεργασίας, οι οποίες ενδέχεται να έχουν ξεκινήσει σε προηγούμενο στάδιο της διαχείρισης των αποβλήτων. Η επιλογή των τελικών αποθηκευτικών χώρων θα πρέπει να γίνεται κατά το στάδιο του σχεδιασμού και ιδανικά θα πρέπει να απέχουν από 50-100 χιλιόμετρα από την περιοχή συλλογής αποβλήτων ή από τους ενδιάμεσους αποθηκευτικούς χώρους.

Όλοι οι αποθηκευτικοί χώροι (είτε είναι ενδιάμεσης είτε τελικής αποθήκευσης), προκειμένου να λειτουργούν αποδοτικά και με ασφάλεια, θα πρέπει να εδρεύουν σε τοποθεσίες ικανές να υποστηρίξουν ένα χώρο αποθήκευσης τόσο τοπογραφικά όσο και γεωλογικά. Επιπλέον, θα πρέπει να βρίσκονται όσο πιο μακριά είναι δυνατό από περιβαλλοντικά ευαίσθητες ή πυκνοκατοικημένες περιοχές.

1.3.5. Επεξεργασία αποβλήτων

Ο στόχος κάθε επιχείρησης καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδας είναι η επεξεργασία, ανακύκλωση και διάθεση των αποβλήτων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της με αποδοτικό και περιβαλλοντικά αποδεκτό τρόπο. Για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου επεξεργασίας των αποβλήτων, κρίνεται αναγκαία η διενέργεια αποτίμησης όπου θα πρέπει να συνεκτιμηθούν τα ακόλουθα:

- η φύση, τα χαρακτηριστικά και οι ποσότητες των αποβλήτων που έχουν συλλεχθεί,
- τα μέσα και οι εγκαταστάσεις που υπάρχουν στην περιοχή,
- η τοποθεσία των εξειδικευμένων εγκαταστάσεων επεξεργασίας (απόσταση, προσβασιμότητα),
- η ικανότητα υποδοχής αυτών των εγκαταστάσεων και ο ρυθμός επεξεργασίας,
- το κόστος της επεξεργασίας (περιλαμβάνοντας και την τελική διάθεση).

Η επεξεργασία των αποβλήτων είναι απαραίτητη προκειμένου να συγκεντρωθεί όσο δυνατόν περισσότερο πετρέλαιο για επαναχρησιμοποίηση και να ελαττωθεί ο όγκος των υλικών που πρέπει να υποστούν τελική διάθεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να είναι απαραίτητη η προ-επεξεργασία των αποβλήτων πριν την έναρξη της κύριας επεξεργασίας. Ως προ-επεξεργασίες ορίζονται οι επεξεργασίες που πρέπει να συνοδεύονται και από άλλες προκειμένου τα απόβλητα να οδηγηθούν προς τελική διάθεση. Η προ-επεξεργασία των αποβλήτων μπορεί να λαμβάνει χώρα είτε στο πλαίσιο των χώρων αποθήκευσης είτε σε ειδικές εγκαταστάσεις. Ακολούθως παρατίθενται οι συνήεις μέθοδοι προ-επεξεργασίας για απόβλητα που προκύπτουν από επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων:

➤ Διαχωρισμός των φάσεων

- Διαχωρισμός με βαρύτητα/καθίζηση (gravity separation/settling). Τα μίγματα πετρελαίου-νερού είναι δυνατόν να διαχωριστούν λόγω διαφοράς πυκνότητας. Το πετρέλαιο που είναι

πιο ελαφρύ από το νερό ανέρχεται στην επιφάνεια και το νερό κατακάθεται στον πυθμένα της δεξαμενής. Το νερό απομακρύνεται από τον πυθμένα της δεξαμενής και το πετρέλαιο που είναι απαλλαγμένο από νερό, αντλείται (ξαφρίζεται) από το πάνω μέρος. Ο διαχωρισμός με βαρύτητα μπορεί να γίνει σε δεξαμενές που έχουν κατασκευαστεί για τον σκοπό αυτό (διαχωριστήρας API, περιστροφικοί διαυγαστήρες, διαχωριστήρες αυλακωτών δίσκων, κλπ), εύκαμπτες ή κινητές ανοικτής οροφής δεξαμενές, δεξαμενές αποθήκευσης σε πλοία και ακόμη σε βαρέλια πετρελαίου που είναι από πάνω ανοικτά.

Με τη χρήση της μεθόδου αυτής είναι εφικτός και ο διαχωρισμός των σταθερών γαλακτωμάτων πετρελαίου υπό την προϋπόθεση ότι έχει προηγηθεί καλή ανάμιξη με τα χημικά πρόσθετα (επιβραδυντές γαλακτοποίησης ή απογαλακτοποιητές) που έχουν προστεθεί σε αυτά. Ο διαχωρισμός είναι αποδοτικότερος όταν οι απογαλακτοποιητές εισέρχονται στο μέρος της αναρρόφησης της αντλίας μεταφοράς, η οποία βοηθά στην καλή μίξη χημικού και γαλακτώματος. Επιπλέον, καλά αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν γίνεται χρήση δεξαμενών κατακάθισης με θέρμανση καθώς τα γαλακτώματα μπορούν να διαλυθούν με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο διαχωρισμός με βαρύτητα μπορεί να γίνει τόσο στο πλαίσιο των χώρων αποθήκευσης (προσωρινής ή όχι) όσο και στο πλαίσιο ειδικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Επίσης, μπορεί να αποτελεί κύρια επεξεργασία (δηλαδή να μην ακολουθείται από άλλη επεξεργασία) αλλά συνήθως αποτελεί προ-επεξεργασία.

- Διύλιση (filtration). Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής έχει ως στόχο την αποτροπή πρόκλησης ρύπανσης στις παροχές νερού που καταλήγουν σε ιχθυοκαλλιέργειες και εκτροφεία οστρακοειδών. Μέσω της διύλισης επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των υγρών από τα στερεά απόβλητα με χρήση κόσκινου (μεταλλικού ή πλαστικού) ή άλλου πορώδους υλικού. Η διύλιση είναι αποτελεσματική για παχύρρευστες ρυπαντικές ουσίες όπως είναι το βαρύ πετρέλαιο (μαζούτ), είναι λιγότερο αποτελεσματική για ελαφρύ πετρέλαιο ενώ είναι εντελώς ακατάλληλη για κλάσματα πετρελαίου που έχουν υποστεί διάλυση. Επίσης, η εφαρμογή της διύλισης επιφέρει την παραγωγή αποβλήτων όπως είναι τα διαφόρων ειδών φίλτρα που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο.
- Ανάκτηση του πετρελαίου που καλύπτει υλικά της ακτής και εξοπλισμό (fluidification of oil coating some debris). Αν τα υλικά της ακτής και ο εξοπλισμός της ακτής που θα συλλεχθούν περιέχουν περισσότερο από 20% πετρέλαιο, τότε μπορεί να είναι εφικτή η ανάκτηση του πετρελαίου που τα καλύπτει μέσω πλύσης με νερό ή σε συνδυασμό με κατάλληλη διαλυτική ουσία όπως είναι το φυσικό αέριο. Τα υλικά που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο και βρίσκονται σε λάκκους μπορούν να υποστούν πλύση με νερό χαμηλής πίεσης προκειμένου να αποκολληθεί το πετρέλαιο και να επιπλεύσει στο λάκκο. Στη συνέχεια, το μίγμα πετρελαίου-νερού που θα προκύψει μπορεί να αντληθεί και να υποστεί διαχωρισμό με βαρύτητα. Διαχωρισμός μπορεί να επιτευχθεί και σε κλειστό σύστημα με χρήση ζεστού νερού.
- Φυγοκέντριση (centrifugation). Με τη μέθοδο της φυγοκέντρισης μπορεί να επιτευχθεί διαχωρισμός του πετρελαίου από το νερό λόγω της διαφορετικής τους πυκνότητας ή στερεών από το πετρέλαιο. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής γίνεται εκμετάλλευση της φυγόκεντρης δύναμης που αναπτύσσεται λόγω της ταχύτητας περιστροφικής κίνησης κατάλληλων μηχανικών συστημάτων. Η φυγοκέντριση μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο πλαίσιο των εργασιών καθαρισμού κάνοντας χρήση πετρελαιοσυλλεκτών δίνης (φυγοκεντρικοί), είτε στο πλαίσιο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας οι οποίες διαθέτουν μεγαλύτερης κλίμακας συστήματα φυγοκέντρισης.

➤ Ταξινόμηση – επιλογή

- Κοσκίνισμα (screening). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής κοσκινίζεται το επιφανειακό στρώμα της παραλίας (εφόσον είναι αμμώδης) προκειμένου να απομακρυνθούν από αυτή στερεά υλικά που έχουν προσβληθεί από το πετρέλαιο και τυχόν στερεά υπολείμματα της ρυπαντικής ουσίας (π.χ. πίσσα). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται κυρίως στη χρήση μηχανημάτων που κοσκινίζουν την άμμο (sand screeners), αλλά μπορεί να διεκπεραιωθεί και χειρωνακτικά.
- Πλύση χαμηλής πίεσης (low pressure washing). Ένας τρόπος απομάκρυνσης του πετρελαίου από την ακτή είναι η πλύση με θαλασσινό νερό. Όμως, όταν εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή θα πρέπει να τοποθετούνται φράγματα γύρω από την ακτή για να συγκρατήσουν το πετρέλαιο που θα εκτοπιστεί. Η πλύση χαμηλής πίεσης μπορεί να γίνει σε λάκκους που χρησιμοποιούνται για προσωρινή αποθήκευση οι οποίοι για το σκοπό αυτό θα πρέπει να είναι μάλλον ρηχί και με μεγάλη επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή έχει λιγότερες πιθανότητες από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο να προσβάλει τη χλωρίδα και την πανίδα, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και σε ευαίσθητες περιοχές αφού δεν επηρεάζει σημαντικά το υπόστρωμα.

➤ Φυσικο-χημική δράση

Διάσπαση γαλακτώματος (emulsion breaking). Κάποια γαλακτώματα μπορούν να διαχωριστούν σε πετρέλαιο και νερό μέσω διαχωρισμού με βαρύτητα (καθίζηση) ή μέσω θερμικής επεξεργασίας ακολουθούμενη από διαχωρισμό με βαρύτητα. Η θέρμανση του γαλακτώματος επιφέρει μείωση της πυκνότητας του πετρελαίου και προάγει έναν πιο γρήγορο και αποδοτικό διαχωρισμό. Τα γαλακτώματα θα πρέπει να θερμαίνονται με χρήση εναλλάκτη θερμότητας σε θερμοκρασίες μεταξύ 60-66 °C.

Τα σταθερά γαλακτώματα μπορούν να διασπαστούν με χρήση κατάλληλων χημικών (διασπάστες γαλακτωμάτων/απογαλακτοποιητές). Αυτά προστίθενται σε μικρές συγκεντρώσεις (0,1%-0,5% του συνολικού όγκου προς επεξεργασία) και μειώνουν τη σταθερότητα του γαλακτώματος, γεγονός που οδηγεί στον διαχωρισμό πετρελαίου-νερού. Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η διενέργεια δοκιμών για τον καθορισμό του πιο αποτελεσματικού χημικού και της κατάλληλης δόσης καθώς δεν υπάρχει χημικό το οποίο να είναι κατάλληλο για τη διάσπαση όλων των ειδών γαλακτώματος. Οι διασπάστες γαλακτωμάτων/απογαλακτοποιητές θα πρέπει να προστίθενται κατά τη μεταφορά του γαλακτώματος από τη συσκευή συλλογής προς τη δεξαμενή προκειμένου να επιτευχθεί καλή ανάμιξη και κατά συνέπεια η ελάχιστη δυνατή δόση. Μετά τον διαχωρισμό, η φάση του νερού θα περιέχει το περισσότερο από το χημικό που χρησιμοποιήθηκε και μια μικρή ποσότητα πετρελαίου (μέχρι 0,15%). Οπότε, το νερό αυτό θα πρέπει να διατίθεται με προσοχή.

Κάποια γαλακτώματα μπορούν να διασπαστούν μερικώς αν αναμιχθούν πλήρως με άμμο. Ένα γαλάκτωμα το οποίο περιέχει 70% νερό, αν αναμιχθεί με περίπου 50% όγκο άμμου μπορεί να υποστεί έως και 50% μείωση στην περιεκτικότητα του σε νερό. Το διαχωρισμένο νερό επιστρέφεται συνήθως στην ακτή μετά από κάποια επιπλέον επεξεργασία, ενώ η άμμος που χρησιμοποιήθηκε θα πρέπει να διατεθεί κατάλληλα.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι συνήθεις μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων:

➤ Μηχανική επεξεργασία

- Πλύση υψηλής πίεσης. Το πετρέλαιο που έχει προσκολληθεί σε ανώμαλες και σκληρές επιφάνειες μπορεί να απομακρυνθεί κατά τρόπο αποτελεσματικό με την εκτόξευση σε αυτές ψυχρού ή ζεστού νερού υπό πίεση. Κατά συνέπεια, η πλύση υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται σε βραχώδεις ακτές. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτούνται μονάδες υψηλής πίεσης χάρη στις οποίες επιτυγχάνονται πιέσεις από 80 μέχρι 140 bar και θερμοκρασία από 60 μέχρι 80°C (εφόσον χρειάζεται ζεστό νερό). Η πλύση με νερό υψηλής πίεσης πρέπει να αρχίσει από την κορυφή της επιφάνειας που πρέπει να καθαριστεί και να συνεχιστεί προς τα κάτω. Το πετρέλαιο που αφαιρείται ενδέχεται να καταλήξει στη θάλασσα ή να προσβάλει κάποιο άλλο τμήμα της ακτής. Για το λόγο αυτό, οι γειτονικές επιφάνειες θα πρέπει να προστατεύονται με πλαστικά φύλλα τα οποία θα οδηγούν το πετρέλαιο και το μίγμα αυτού με νερό στο σημείο περισυλλογής.

- Επεξεργασία με άσβεστο (treatment with lime). Ο όρος καυστική άσβεστος περιγράφει ένα πλήθος μαλακών και σκληρών ανθρακικών ασβεστίων, τα οποία όντας αφυδατωμένα από την καύση της ασβέστου, προκαλούν εξώθερμη αντίδραση όταν έρθουν σε επαφή με το νερό. Η μέθοδος επεξεργασίας με άσβεστο μπορεί να γίνει είτε με χρήση σκόνης καυστικής ασβέστου ή σβόλων καυστικής ασβέστου.

Η φυσικο-χημική επίδραση της καυστικής ασβέστου προκαλεί ξήρανση των υλικών στα οποία εφαρμόζεται και σταδιακή διάσπαση αυτών. Η σκόνη καυστικής ασβέστου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μολυσμένα υλικά που έχουν τη μορφή λάσπης ή πολτού. Η επί-τόπου εφαρμογή αυτής της μεθόδου προκαλεί τη δημιουργία σκόνης και οργανικών ενώσεων, οπότε είναι απαραίτητη η λήψη προληπτικών μέτρων. Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής της μεθόδου λαμβάνονται (μετά από ωρίμανση για μερικές ημέρες) υδρόφοβες και αμμώδεις ουσίες.

Η χρήση σβόλων καυστικής ασβέστου βασίζεται στην εξώθερμη αντίδραση της καυστικής ασβέστου σε κλειστό περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από θερμοκρασίες άνω των 500°C. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε στερεά όσο και σε υγρά υλικά.

Η επεξεργασία με άσβεστο δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη εξαιτίας της έλλειψης κανονισμών σχετικά με την τελική διάθεση της άσβέστου.

Με τη χρήση ασβέστου επεξεργάστηκε ένα μέρος των αποβλήτων που δημιουργήθηκαν κατά την επιχείρηση καταπολέμησης της πετρελαιοκηλίδας που προκλήθηκε από τη βύθιση του δεξαμενοπλοίου “Amoco Cadiz”. Από τα απόβλητα που συλλέχθηκαν, 10.000 m³ πολτού επεξεργάστηκαν με υδρόφοβη άσβεστο, 35.000 m³ «στεγνών» αποβλήτων επεξεργάστηκαν με καυστική άσβεστο και 20.000 m³ «στεγνών» αποβλήτων επεξεργάστηκαν με καυστική άσβεστο σε ειδικές εγκαταστάσεις.

Η θερμική και η βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων αποτελούν ταυτόχρονα και μεθόδους τελικής διάθεσης και κατά συνέπεια συμπεριλαμβάνονται στην επόμενη παράγραφο.

1.3.6. Τελική διάθεση αποβλήτων

Η πιο ιδανική εξέλιξη μετά το πέρας μιας επιχείρησης ρύπανσης από πετρελαιοκηλίδα είναι η επαναχρησιμοποίηση του πετρελαίου που συλλέχθηκε. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, εξετάζεται το ενδεχόμενο στερεοποίησης των υλικών που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο ή η καταστροφή τους.

Οι κύριες μέθοδοι για την τελική διάθεση του πετρελαίου και των υλικών που προσβλήθηκαν από αυτό, είναι οι ακόλουθες:

- Ανάκτηση του πετρελαίου, όπου το πετρέλαιο ανακτάται για περαιτέρω χρήση ως καύσιμο σε κάποιο διυλιστήριο ή σε άλλες εφαρμογές της βαριάς βιομηχανίας όπως είναι η τσιμεντοβιομηχανία.

Όταν γίνεται σχεδιασμός σχετικά με την τελική διάθεση του ανακτημένου πετρελαίου θα πρέπει να διεξάγεται έρευνα για διυλιστήρια και βιομηχανίες οι οποίες χρησιμοποιούν βαρύ πετρέλαιο και οι οποίες θα μπορούσαν να υποδεχτούν και να επεξεργαστούν το ανακτημένο πετρέλαιο. Τα διυλιστήρια μπορεί να είναι σε θέση να υποδεχτούν το πετρέλαιο αυτό ακόμα κι αν είναι αναμεμιγμένο με νερό και άμμο, αλλά η παρουσία αλατιού μπορεί να επιφέρει δυσκολίες.

- Σταθεροποίηση, όπου τα ελαιώδη απόβλητα υποβάλλονται σε επεξεργασία έτσι ώστε να μην αποτελούν απειλή για το περιβάλλον.

Μια χρήσιμη μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί σε περιστατικά κατά το παρελθόν είναι η διάθεση της άμμου που έχει προσβληθεί από πετρέλαιο μέσω της δέσμευσης της από ανόργανες ουσίες, όπως είναι η καυστική άσβεστος και το τσιμέντο. Κατά αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα αδρανές προϊόν το οποίο δεν επιτρέπει τη διαφυγή του πετρελαίου. Στη συνέχεια, ανάλογα με την ισχύουσα νομοθεσία, τα σταθεροποιημένα υλικά μπορούν να διατεθούν υπό λιγότερο αυστηρούς περιορισμούς σε σχέση με την άμμο που έχει προσβληθεί από πετρέλαιο. Τα σταθεροποιημένα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναμόρφωση του εδάφους και για την κατασκευή δρόμων. Η περιοχή όπου επιτελείται η διαδικασία της σταθεροποίησης υπόκειται στους ίδιους περιβαλλοντικούς ελέγχους στους οποίους υπόκεινται και οι χώροι προσωρινής αποθήκευσης και θα πρέπει να έχουν συμπεριληφθεί στο σχέδιο έκτακτης ανάγκης.

- Άμεση διάθεση, όπου το πετρέλαιο διατίθεται σε κάποιον προκαθορισμένο χώρο ο οποίος λειτουργεί σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία.

Η μέθοδος της άμεσης διάθεσης συνίσταται στη διάθεση των αποβλήτων σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής για βιομηχανικά απόβλητα ή για συνδιάθεση με οικιακά απόβλητα. Η άμεση διάθεση είναι κατάλληλη μόνο όταν στα απόβλητα περιέχεται λιγότερο από 20% πετρέλαιο. Όταν το πετρέλαιο και τα λοιπά υλικά που έχουν προσβληθεί από αυτό ενταφιάζονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ώστε να μην διαφύγει στον υδροφόρο ορίζοντα ή σε επιφανειακά ύδατα. Ο χώρος υγειονομικής ταφής θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλη επένδυση ώστε να αποτρέπει τυχόν διαρροές. Επίσης, στο πλαίσιο του χώρου αυτού θα πρέπει να διενεργείται έλεγχος της ποιότητας των υπογείων υδάτων έτσι ώστε να αποδεικνύεται ότι δεν υπάρχουν διαρροές. Η επιλογή των χώρων άμεσης διάθεσης γίνεται πάντα σε συνεννόηση με τις αρμόδιες αρχές. Σε πολλές χώρες, η μέθοδος αυτή είναι απαγορευμένη ενώ σε πολλές άλλες η εφαρμογή της είναι αυστηρώς περιορισμένη.

- Καύση, επί τόπου ή κοντά στην πληγείσα περιοχή ή σε βιομηχανικό κλίβανο αποτέφρωσης. Η επί τόπου καύση υλικών που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο δε συνιστάται (παρά μόνο σε απομακρυσμένες περιοχές και υπό ειδικές συνθήκες), καθώς προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Το πετρέλαιο, όταν υφίσταται καύση σε ανοιχτούς χώρους, έχει την τάση να εξαπλώνεται και μπορεί να αποπλυθεί στο έδαφος. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις παραμένει ένα πηχό κλάσμα καθώς η επίτευξη πλήρους καύσης είναι πολύ σπάνια.

Παρόλα αυτά, τα προβλήματα αυτά μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση κατάλληλου κλιβάνου. Υπάρχουν κινητοί κλιβανοί στους οποίους εισέρχονται τα ελαιώδη απόβλητα και μετά την επιβολή της απαραίτητης θερμοκρασίας επέρχεται η ολική καύση αυτών. Για πετρέλαια τα οποία περιέχουν υψηλό ποσοστό στερεών ουσιών, είναι πιο κατάλληλη η χρήση περιστρεφόμενων κλιβάνων. Γενικά, οι κλιβανοί που χρησιμοποιούνται για την καύση οικιακών αποβλήτων δεν είναι κατάλληλοι για αυτήν τη χρήση καθώς η ύπαρξη χλωριούχων ουσιών στο θαλασσίνο νερό μπορεί να επιφέρει διάβρωση. Αντίθετα, οι βιομηχανικοί κλιβανοί υψηλών θερμοκρασιών είναι ανθεκτικοί στο θαλασσίνο νερό αλλά δεν έχουν την ικανότητα να αντιμετωπίσουν το επιπλέον φορτίο που δημιουργείται από μεγάλες ποσότητες ελαιωδών αποβλήτων. Όμως, η χρήση βιομηχανικών κλιβάνων μπορεί να είναι αποτελεσματική αν υπάρχει η δυνατότητα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης των αποβλήτων.

Η κύρια μέθοδος τελικής διάθεσης που χρησιμοποιήθηκε για τα απόβλητα που χαρακτηρίστηκαν ως «στερεά» κατά την αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκλήθηκε από τη βύθιση του “Prestige” (19 Νοεμβρίου 2002) ήταν η καύση. Μέχρι τον Ιούνιο του 2003, 8.000 τόνοι αποβλήτων είχαν υποστεί καύση σε κάποια εγκατάσταση, ειδική για την καύση βιομηχανικών αποβλήτων.

- Βιολογική επεξεργασία. Η αγροκαλλιέργεια (landfarming) και η διασπορά στο έδαφος πετρελαίου και υλικών που προσβλήθηκαν από πετρέλαιο είναι δύο μέθοδοι που εκμεταλλεύονται την βιοαποικοδόμηση.

- Αγροκαλλιέργεια (landfarming)

Η αγροκαλλιέργεια συνίσταται στη διασπορά του πετρελαίου και των υλικών που προσβλήθηκαν από αυτό στο έδαφος και έχει ως αποτέλεσμα την βιοαποικοδόμηση του πετρελαίου. Βασίζεται στην οξείδωση των υδρογονανθράκων από ορισμένους μικροοργανισμούς, οι οποίοι αναπτύσσονται γρήγορα γύρω από το πετρέλαιο (τόσο στη θάλασσα όσο και στο έδαφος). Η εφαρμογή της αγροκαλλιέργειας απαιτεί μεγάλη επιφάνεια γης σε μια λογική απόσταση από την πληγείσα περιοχή και χρήση του συνηθισμένου αγροτικού εξοπλισμού. Η έκταση που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλή διαπερατότητα του υπεδάφους προκειμένου να προληφθεί το ενδεχόμενο προσβολής των υδάτινων πόρων.

Η περιοχή που θα επιλεγεί για την εφαρμογή της αγροκαλλιέργειας, θα πρέπει αρχικά να γίνει επίπεδη και στη συνέχεια θα πρέπει να σχηματιστούν αυλάκια πάνω σε αυτή προκειμένου το νερό της βροχής να οδηγείται σε λάκκους συγκέντρωσης. Ακολούθως, απλώνεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια ένα στρώμα πετρελαίου ή και υλικού που προσβλήθηκε από πετρέλαιο πάχους 0,02 μέχρι 0,2m και παραμένει στη θέση αυτή για να υποστεί την επίδραση των καιρικών συνθηκών. Κατά τη διάρκεια των πρώτων έξι μηνών το υπέδαφος πρέπει να αναμιγνύεται μια φορά το μήνα προκειμένου να αυξάνεται ο αερισμός του και αργότερα η ανάμιξη γίνεται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Η μέθοδος αυτή είναι πιο αποτελεσματική σε θερμά κλίματα (μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποδοτική στην περιοχή της Μεσογείου) όπου η αποικοδόμηση των υδρογονανθράκων είναι πιο γρήγορη αλλά παρόλα αυτά έχει εφαρμοστεί επιτυχώς και σε ψυχρότερα κλίματα. Τέλεια αποικοδόμηση του πετρελαίου το οποίο υπέστη την κατεργασία αυτή θα πρέπει να αναμένεται σε διάστημα 1-3 ετών. Ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας λιπάσματα π.χ. ουρία και φωσφορική αμμωνία. Ύστερα από την αποικοδόμηση του πετρελαίου η περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καλλιέργεια οποιουδήποτε είδους φυτού όπως χλόη, διακοσμητικά φυτά και δέντρα. Αν η περιοχή

πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργειες, αυτές πρέπει να ελέγχονται γιατί μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα.

Η αγροκαλλιέργεια επιλέχθηκε ως μέθοδος τελικής διάθεσης για 7.800 τόνους εκ των 12.600 τόνων στερεών αποβλήτων που προέκυψαν μετά το ατύχημα του “Sea Empress” (15 Φεβρουαρίου 1996).

Επίσης, με την ίδια μέθοδο διατέθηκαν οι 3.000 τόνοι μολυσμένου χώματος που δημιουργήθηκαν μετά τη σύγκρουση των “Heinrich Heine” και “Mataram” (2 Απριλίου 1988). Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακά αφού η συγκέντρωση του εδάφους σε υδρογονάνθρακες μειώθηκε από 5.400mg υδρογονανθράκων ανά κιλό σε 500mg υδρογονανθράκων ανά κιλό μετά από 15 εβδομάδες επεξεργασίας του εδάφους όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος.

- Λιπασματοποίηση

Ένας άλλος τρόπος επίτευξης βιολογικής αποικοδόμησης είναι η εφαρμογή τεχνικών λιπασματοποίησης, ειδικά για υλικά που μπορούν να υποστούν βιοαποικοδόμηση όπως είναι τα φύκια που έχουν προσβληθεί από πετρέλαιο ή για φυσικά απορροφητικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην επιχείρηση καθαρισμού, όπως είναι το άχυρο, τα πριονίδια και ο φυτάνθρακας. Δεδομένου ότι τα μίγματα προς επεξεργασία χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλά επίπεδα πετρελαίου, μπορούν να σχηματισθούν σωροί από αυτά προκειμένου να διευκολυνθεί η λιπασματοποίηση. Επειδή μέσα στους σωρούς εγκλωβίζεται θερμότητα (η βακτηριολογική αποσύνθεση του πετρελαίου είναι εξώθερμη διαδικασία), η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για ψυχρότερα κλίματα όπου η αγροκαλλιέργεια είναι σχετικά αργή μέθοδος. Η μέθοδος αυτή είναι αποδοτική για τα περισσότερα είδη πετρελαίου αλλά εφαρμόζεται μόνο σε επιχειρήσεις μικρής κλίμακας. Το τελικό προϊόν είναι ξηρό κατάλοιπο που μοιάζει με λίπασμα.

1.3.7. Αποκατάσταση των χώρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαχείριση των αποβλήτων

Μια επιχείρηση διαχείρισης αποβλήτων φτάνει στο τέλος της όταν παύσει η ισχύς του σχεδίου έκτακτης ανάγκης. Η τελευταία πράξη που πρέπει να λάβει χώρα πριν συμβεί αυτό είναι η αποκατάσταση όλων των χώρων που χρησιμοποιήθηκαν για την αποθήκευση, τη μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική διάθεση των αποβλήτων. Με τον όρο αποκατάσταση περιγράφεται η επαναφορά του χώρου στην αρχική του κατάσταση.

Από τη στιγμή κατά την οποία τίθεται σε λειτουργία ένας χώρος αποθήκευσης ή τελικής διάθεσης αποβλήτων, θα πρέπει να σχεδιάζεται η αποκατάσταση του χώρου αυτού. Σε πολλές περιπτώσεις, το σχέδιο αποκατάστασης συνιστά απαραίτητη προϋπόθεση για την έκδοση άδειας λειτουργίας αυτών των χώρων.

Μόλις κριθεί ότι μια εγκατάσταση δεν είναι πλέον απαραίτητη και προκειμένου να αποφευχθεί η μετατροπή αυτής σε παράνομη χωματερή, θα πρέπει να ξεκινήσουν οι εργασίες αποκατάστασης. Η αποκατάσταση περιλαμβάνει την αναμόρφωση αρκετών στοιχείων, όπως:

- το ανώτερο στρώμα του εδάφους (και σε ορισμένες περιπτώσεις το υπόστρωμα αυτού),
- οι δρόμοι που οδηγούν στην εγκατάσταση,
- η περιβάλλουσα βλάστηση, η οποία έχει επηρεαστεί,
- δομές που υπήρχαν πριν την έναρξη των επιχειρήσεων καταπολέμησης της ρύπανσης.

Το ζήτημα της αποκατάστασης των χώρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις εργασίες διαχείρισης των αποβλήτων δεν αντιμετωπίζεται με τη μεθοδικότητα και τη συστηματοποίηση που απαιτείται, αν και είναι ιδιαίτερα κρίσιμο. Προκειμένου, να δοθεί η αρμόζουσα προσοχή στο ζήτημα αυτό είναι άμεσα αναγκαία η ένταξη του στα σχέδια έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, θα πρέπει να αναπτυχθούν μέθοδοι οι οποίες θα υποδεικνύουν επακριβώς τις ενέργειες που μπορούν να γίνουν έτσι ώστε να επιτευχθεί η αποκατάσταση.

1.4. Περιγραφή του νομικού και θεσμικού πλαισίου από το οποίο διέπεται η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων

1.4.1. Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες

Το έκτο άρθρο της Διεθνούς Σύμβασης «για την ετοιμότητα, συνεργασία και αντιμετώπιση της ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο, 1990»⁵, προβλέπει ότι κάθε συμβαλλόμενο μέρος αυτής υποχρεούται να καθιερώσει ένα εθνικό σύστημα για την άμεση και αποτελεσματική αντιμετώπιση των περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο. Το εθνικό σύστημα κάθε μέρους της Σύμβασης θα πρέπει να απεικονίζεται στο εθνικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες.

Σύμφωνα με την παραπάνω απαίτηση, συντάχθηκε το ελληνικό Εθνικό Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης για την αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες⁶. Αρμόδιος φορέας για την κατάρτιση και την παρακολούθηση της εφαρμογής του εθνικού σχεδιασμού είναι το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας, Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής (ΥΕΝΑΝΠ). Ο σχεδιασμός υλοποιείται μέσω της κεντρικής υπηρεσίας και των λιμενικών αρχών.

Το Εθνικό Σχέδιο συνίσταται στη συγκέντρωση των απαραίτητων πληροφοριών, οι οποίες επιτρέπουν στους υπεύθυνους του Κράτους να προβλέψουν ή να καταπολεμήσουν μια σημαντική ατυχηματική ρύπανση, που απειλεί τον εθνικό θαλάσσιο χώρο και τις παρακείμενες ακτές, ελαχιστοποιώντας κατά το δυνατόν τις δυσμενείς επιπτώσεις. Επιπλέον, στο πλαίσιο του εθνικού σχεδιασμού είναι απαραίτητη η οριοθέτηση των λειτουργικών αρμοδιοτήτων των συνεργαζόμενων φορέων του δημοσίου και ιδιωτικού τομέα και των Ενόπλων Δυνάμεων και η ανάπτυξη οργανωτικής και επικοινωνιακής δομής για τη συνεργασία των φορέων αυτών.

Όπως προβλέπεται στο τρίτο κεφάλαιο του εγχειριδίου του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (ΙΜΟ) για τον σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης⁷, το εθνικό σχέδιο θα πρέπει να περιλαμβάνει και πληροφορίες για τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν μετά την καταπολέμηση μιας ρύπανσης που προκλήθηκε από ατύχημα. Πιο συγκεκριμένα, στο σχέδιο

5. International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990, OPRC 1990, υπογράφηκε στο Λονδίνο στις 30 Νοεμβρίου 1990.

6. Προεδρικό διάταγμα 11/2001 (ΦΕΚ Α 6 21.1.2002).

7. Manual on oil pollution, Section II - "Contingency Planning", 1995 edition, International Maritime Organization (IMO).

θα πρέπει να καταγράφονται τα διαθέσιμα μέσα για την προσωρινή αποθήκευση, τη μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική διάθεση του πετρελαίου και των υλικών που έχουν προσβληθεί από αυτό. Επιπλέον, στο πλαίσιο του εθνικού σχεδιασμού θα πρέπει να αναγνωρίζονται οι φορείς (δημόσιοι και ιδιωτικοί) που είναι σε θέση να φέρουν εις πέρας τις παραπάνω διαδικασίες. Όμως οι αρμόδιοι φορείς και ο διαθέσιμος εξοπλισμός διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή όπου μπορεί ενδεχομένως να εκδηλωθεί κάποιο περιστατικό ρύπανσης από πετρέλαιο. Κατά συνέπεια θα πρέπει να γίνεται ξεχωριστή καταγραφή για κάθε περιοχή.

Η ξεχωριστή καταγραφή για κάθε περιοχή γίνεται στα Τοπικά Σχέδια τα οποία πρέπει να διαθέτουν οι Λιμενικές Αρχές σύμφωνα με το άρθρο 5 του νόμου 2252/94⁸. Τα Τοπικά Σχέδια βρίσκονται σε δομική αντιστοιχία με το Εθνικό Σχέδιο. Ο ρόλος των Τοπικών Σχεδίων και των παραρτημάτων που αυτά περιέχουν είναι καθοριστικός κατά την πρώτη φάση της διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πληροφορίες που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων και οι οποίες περιέχονται σε κάποια από τα παραρτήματα των Τοπικών Σχεδίων:

- Τα διατιθέμενα μέσα προσωρινής αποθήκευσης πετρελαίου στη θάλασσα και την ξηρά περιέχονται σε πίνακες των παραρτημάτων 13 και 14 των Τοπικών Σχεδίων.
- Τα μέσα μεταφοράς των περισυλλεγομένων πετρελαιοειδών μιγμάτων που μπορούν να διατεθούν από τους φορείς που μετέχουν στο σχέδιο, περιλαμβάνονται στο παράρτημα 14 των Τοπικών Σχεδίων.
- Οι χώροι τελικής νόμιμης διάθεσης των πετρελαιοειδών καταλοίπων περιέχονται στο Παράρτημα 18 των Τοπικών Σχεδίων.

Σε αρκετά σημεία του εθνικού σχεδίου γίνεται αναφορά στο Εγχειρίδιο Καταπολέμησης Ρύπανσης (ΕΚΡ). Το εγχειρίδιο αυτό περιλαμβάνεται στο παράρτημα 17 κάθε Τοπικού Σχεδίου και αποτελεί μερική μετάφραση αντίστοιχου εγχειριδίου του REMPEC⁹. Μέσω του εγχειριδίου αυτού παρέχεται μια γενική θεώρηση των πρακτικών μεθόδων και των μέσων καταπολέμησης περιστατικών ρύπανσης της θάλασσας από πετρελαιοειδή, για την υποβοήθηση του προσωπικού που έχει την ευθύνη επέμβασης σε τέτοια περιστατικά.

Όσον αφορά στο θέμα της διαχείρισης των αποβλήτων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Κεφάλαιο ΙΙΙ-6 «Αποθήκευση και επεξεργασία συλλεχθέντων υλικών που προσβλήθηκαν από πετρέλαιο» του ΕΚΡ. Σε αυτό το κεφάλαιο αναδεικνύεται η σημασία της προσωρινής αποθήκευσης και της τελικής διάθεσης του πετρελαίου και των υλικών που προσβλήθηκαν

8. Νόμος υπ' αριθμό 2252 Κύρωση Διεθνούς Σύμβασης «για την ετοιμότητα, συνεργασία και αντιμετώπιση της ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο, 1990» και άλλες διατάξεις (ΦΕΚ Α 192 18.11.1994).

9. Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea (REMPEC) –

Περιφερειακό Κέντρο για την καταπολέμηση της θαλάσσιας ρύπανσης στη Μεσόγειο.

Το κέντρο ιδρύθηκε με την απόφαση υπ' αριθμό 7 της Διεθνούς Διάσκεψης των Μεσογειακών χωρών για την προστασία της Μεσογείου θάλασσας (Βαρκελώνη 1976) με βασικό στόχο τη διευκόλυνση της συνεργασίας των Μεσογειακών χωρών σε περιπτώσεις σοβαρών περιστατικών ρύπανσης της θάλασσας από πετρελαιοειδή και την παροχή βοήθειας στις χώρες αυτές για την ανάπτυξη των εθνικών δυνατοτήτων στον τομέα πρόληψης και καταστολής της ρύπανσης από πετρελαιοειδή.

από αυτό και επιπλέον, περιλαμβάνονται μέθοδοι και πρακτικές για:

- την προσωρινή αποθήκευση του πετρελαίου,
- τη μεταφορά του πετρελαίου και των υλικών που προσβλήθηκαν από πετρέλαιο,
- τον διαχωρισμό του πετρελαίου,
- την τελική διάθεση του πετρελαίου και των υλικών που προσβλήθηκαν από αυτό.

Από τις παραπάνω περιγραφές γίνεται φανερό ότι τα σχέδια έκτακτης ανάγκης (εθνικό και τοπικά), παρουσιάζουν σοβαρές ελλείψεις σε ό,τι αφορά το ζήτημα της διαχείρισης των αποβλήτων. Μια από τις σημαντικότερες ελλείψεις είναι η απουσία οποιασδήποτε αναφοράς για πρόνοια χώρων ενδιάμεσης και τελικής αποθήκευσης, η σημασία των οποίων αποδόθηκε στην αντίστοιχη παράγραφο.

1.4.2. Χαρακτηρισμός των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων

Σύμφωνα με την οδηγία 2006/12/EK, «ύλες που έχουν κατά τύχη εκχυθεί, απολεσθεί ή για τις οποίες έχει σημειωθεί κάποιο περιστατικό, συμπεριλαμβανομένου κάθε είδους υλικού εξοπλισμού κ.λπ., ο οποίος έχει μολυνθεί εξ' αιτίας αυτού του περιστατικού, θεωρείται ότι αποτελούν απόβλητα και θα πρέπει να διαχειρίζονται κατά τρόπο ώστε να μην τίθεται σε κίνδυνο η ανθρώπινη υγεία και να περιορίζεται η εμφάνιση πρόσθετης ρύπανσης».

Οι κατηγορίες αποβλήτων, όπως ορίζονται στο Παράρτημα I της οδηγίας 2006/12/EK, περιλαμβάνονται και στο Παράρτημα IA της ΚΥΑ 50910/2727¹⁰.

Τα απόβλητα ελαίων και υγρών καυσίμων αποτελούν το 13^ο κεφάλαιο του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων (ΕΚΑ)¹¹. Ο Ευρωπαϊκός Κατάλογος αποβλήτων αποτελεί το Παράρτημα IB της ΚΥΑ 50910/2727 και το Παράρτημα I της ΚΥΑ 13588/725¹².

Επιπλέον, η οδηγία 91/689/ΕΟΚ¹³ ορίζει στο παράρτημα IA ότι τα μείγματα ελαίου/νερού ή υδρογονάνθρακα/νερού και τα γαλακτώματα συνιστούν επικίνδυνα απόβλητα ενώ παράλληλα ορίζει ότι κάποια απόβλητα θεωρούνται επικίνδυνα εάν παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. αν είναι τοξικά, επιβλαβή, εύφλεκτα, κ.ά.).

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι τα ελαιώδη απόβλητα που προκύπτουν μετά από ατυχήματα στη θάλασσα ή από άλλες πηγές, αποτελούν επικίνδυνα απόβλητα (Ε.Α.) και απαιτούν προσεκτική και υπεύθυνη διαχείριση. Εφόσον τα απόβλητα αυτά δεν εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής κάποιας πιο ειδικής νομοθεσίας, η διαχείριση τους γίνεται με βάση την ισχύουσα Ευρωπαϊκή και Εθνική νομοθεσία για τα επικίνδυνα απόβλητα.

-
10. Κοινή Υπουργική Απόφαση 50910/2727 «Μέτρα και όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης» (ΦΕΚ Β 1909 22.12.2003).
 11. Κατάλογος αποβλήτων σύμφωνα με το Παράρτημα της απόφασης 2000/532/EK, όπως έχει τροποποιηθεί με τις Αποφάσεις 2001/118/EK, 2001/119/EK και 2001/573/EK της Επιτροπής ΕΚ.
 12. Κοινή Υπουργική Απόφαση 13588/725 «Μέτρα όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ για τα επικίνδυνα απόβλητα του Συμβουλίου της 12^{ης} Δεκεμβρίου 1991 (ΦΕΚ Β 383 28.3.2006).
 13. Οδηγία 91/689/EK του Συμβουλίου της 12^{ης} Δεκεμβρίου για τα επικίνδυνα απόβλητα (ΕΕ L377 31.12.1991).

1.4.3. Συλλογή-Συσκευασία-Σήμανση των Επικίνδυνων Αποβλήτων

Οι απαιτήσεις για τη συλλογή, τη συσκευασία και τη σήμανση των επικίνδυνων αποβλήτων περιλαμβάνονται στο πρώτο κεφάλαιο (παρ. 1) των γενικών τεχνικών προδιαγραφών του παραρτήματος του άρθρου 4 της ΚΥΑ 24944/1159¹⁴. Στο πλαίσιο αυτής της παραγράφου αποδίδονται αρκετά καλά οι διεργασίες της συσκευασίας και της σήμανσης. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο και με τη διεργασία της συλλογής.

Για τη συσκευασία των Ε.Α. εφαρμόζονται οι ρυθμίσεις του εθνικού και κοινοτικού δικαίου που ισχύουν για τα επικίνδυνα εμπορεύματα και οι οποίες βασίζονται στις απαιτήσεις των ADR¹⁵, IMDG¹⁶, RID¹⁷ και ICAO¹⁸. Προϋπόθεση της ασφαλούς συσκευασίας αποτελεί η ταξινόμηση των αποβλήτων, ως προς την επικινδυνότητά τους, σε κλάση και αριθμό UN¹⁹.

Μετά τη διενέργεια αυτής της ταξινόμησης, επιλέγεται ο τύπος της συσκευασίας που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καθώς επίσης και οι ειδικές οδηγίες σήμανσης και επισήμανσης των διαφόρων συσκευασιών. Τόσο η συσκευασία όσο και η σήμανση αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή διαχείριση των αποβλήτων εφόσον παρεμποδίζουν τη διαφυγή τους στο περιβάλλον και διευκολύνουν την εύκολη αναγνώριση του είδους και της επικινδυνότητας αυτών.

Το υλικό του μέσου συσκευασίας θα πρέπει να παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- αντοχή σε διάβρωση,
- αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις,
- να μην παρουσιάζει οποιοδήποτε χαρακτηριστικό, εξαιτίας του οποίου μπορεί να προκληθεί κίνδυνος για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον,
- να είναι συμβατό με τα Ε.Α. τα οποία θα συσκευαστούν σε αυτό.

1.4.4. Μεταφορά επικίνδυνων αποβλήτων

Οι απαιτήσεις για τη μεταφορά των επικίνδυνων αποβλήτων, ορίζονται στο Κεφάλαιο 1 (παρ. 2) του Παραρτήματος του άρθρου 4 της ΚΥΑ 24944/1159. Για τη μεταφορά των Ε.Α. (όπως και για τη συσκευασία), εφαρμόζονται οι ρυθμίσεις του εθνικού και κοινοτικού δικαίου που ισχύουν για τα επικίνδυνα εμπορεύματα και οι οποίες βασίζονται στις απαιτήσεις των ADR, IMDG, RID και ICAO. Ειδικότερα αν η μεταφορά των Ε.Α. γίνεται

-
14. Κοινή Υπουργική Απόφαση 24944/1159 «Έγκριση Γενικών Τεχνικών Προδιαγραφών για την διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σύμφωνα με το άρθρο 5 της υπ' αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση και σε συμμόρφωση με τις διατάξεις του άρθρου 7 της οδηγίας 91/156/ΕΚ του Συμβουλίου της 18^{ης} Μαρτίου 1991» (ΦΕΚ Β 791 30.6.2006).
 15. Ευρωπαϊκή συμφωνία σχετικά με την οδική διεθνή μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων, υπογράφηκε στη Γενεύη στις 30 Σεπτεμβρίου 1957.
 16. International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG), υιοθετήθηκε από τη διάσκεψη του 1960 για την ασφάλεια της ζωής στη θάλασσα. Ο κώδικας αυτός είναι υποχρεωτικός από την 1^η Ιανουαρίου 2004.
 17. International Carriage of Dangerous Goods by Rail.
 18. International Civil Aviation Organization (ICAO).
 19. Οι αριθμοί UN είναι τετραψήφιοι αριθμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση επικίνδυνων ουσιών στο πλαίσιο της διασυνοριακής μεταφοράς αυτών των ουσιών.

οδικώς, εφαρμόζεται η ADR και ο υπόχρεος φορέας συλλογής και μεταφοράς των Ε.Α., θα πρέπει:

- να διαθέτει σύμβουλο ασφάλειας, όπως προβλέπεται στο τμήμα 1.8.3 της ADR, να εξασφαλίζει ότι ο οδηγός που εκτελεί τη μεταφορά είναι κάτοχος ισχύοντος πιστοποιητικού επαγγελματικής κατάρτισης ADR, αντίστοιχο των μεταφερόμενων υλών,
- να εξασφαλίζει ότι το όχημα που εκτελεί τη μεταφορά είναι κατάλληλο και εφοδιασμένο με πιστοποιητικό έγκρισης ADR, όπου απαιτείται,
- να εξασφαλίζει ότι το όχημα φέρει κατάλληλη σήμανση και εξοπλισμό,
- να εφοδιάζει τη μεταφορική μονάδα με τα παραστατικά έγγραφα που απαιτεί η ADR.

Σε περίπτωση συνδυασμένης μεταφοράς (π.χ. όταν μέρος της μεταφοράς εκτελείται δια θαλάσσης και μέρος αυτής οδικώς), τα απόβλητα θα πρέπει να μεταφέρονται κατά τρόπο ώστε να ακολουθείται το σύνολο των απαιτήσεων που αφορούν τα επιμέρους τμήματα της μεταφοράς.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μεταφορά των αποβλήτων ανατίθεται σε ιδιωτικούς φορείς, οι οποίοι θα πρέπει να διαθέτουν άδεια προκειμένου να επιτελέσουν τέτοιες εργασίες. Η άδεια για τη συλλογή και τη μεταφορά επικινδύνων αποβλήτων σε πλείονες της μίας Περιφέρειες ή εφ' όσον αυτά προέρχονται από περισσότερες της μίας Περιφέρειες, χορηγείται με απόφαση του Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., μετά από εισήγηση της αρμόδιας υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (η άδεια για τη συλλογή και τη μεταφορά εντός μίας Περιφέρειας χορηγείται με απόφαση του Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας, μετά από εισήγηση των αρμοδίων υπηρεσιών αυτής).

Σύμφωνα με την παράγραφο Α.2.2 του άρθρου 7 της ΚΥΑ 13588/725, για τη χορήγηση της άδειας συλλογής και μεταφοράς επικινδύνων αποβλήτων απαιτείται υποβολή αίτησης από τον ενδιαφερόμενο, η οποία θα πρέπει να συνοδεύεται από μελέτη της οργάνωσης του δικτύου συλλογής και μεταφοράς καθώς και από στοιχεία και πληροφορίες που προβλέπονται στις Γενικές Τεχνικές Προδιαγραφές, οι οποίες εκπονούνται από την αρμόδια υπηρεσία Περιβάλλοντος του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, σύμφωνα με το άρθρο 5 της ΚΥΑ 13588/725. Το περιεχόμενο της άδειας περιγράφεται στην παράγραφο Β3 του άρθρου 7 της ΚΥΑ 13588/725.

Για την εισαγωγή και την εξαγωγή επικινδύνων αποβλήτων από τη χώρα, απαιτείται άδεια διασυνοριακής μεταφοράς η οποία χορηγείται με απόφαση του Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. Η διασυνοριακή μεταφορά των επικινδύνων αποβλήτων πραγματοποιείται σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του Κανονισμού 259/1993²⁰ της ΕΕ καθώς και του νόμου 2203/1994²¹.

Επιπλέον, όπως ορίζεται στην παράγραφο Γ3 του άρθρου 7 της ΚΥΑ 13588/725 (η οποία τροποποιήθηκε από την παράγραφο στ του άρθρου 3 της ΚΥΑ 8668/2007²²), η αρμόδια

20. Κανονισμός 259/1993 του Συμβουλίου της 1.2.1993 (ΕΕ L30/1/6.2.1993) για την επίβλεψη και τον έλεγχο της διασυνοριακής μεταφοράς φορτίων αποβλήτων.

21. Νόμος 2203/1994 «Κύρωση της Σύμβασης της Βασιλείας σχετικά με τον έλεγχο της διασυνοριακής κίνησης των επικινδύνων αποβλήτων» (ΦΕΚ Α 58 15.4.1994).

22. Κοινή Υπουργική Απόφαση 8668/2007 «Έγκριση Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Επικινδύνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ)» (ΦΕΚ Β 287 2.3.2007).

Υπηρεσία Περιβάλλοντος του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε τηρεί μητρώο φορέων διαχείρισης αποβλήτων (όπου υπάρχει κατάλογος των αδειοδοτημένων εταιρειών στη συλλογή και μεταφορά επικινδύνων αποβλήτων), το οποίο κοινοποιείται στη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας του Υπουργείου Εσωτερικών Δημόσιας Διοίκησης και Αποκέντρωσης (ΥΠ.ΕΣ.Δ.Δ.Α.).

1.4.5. Αποθήκευση Επικίνδυνων Αποβλήτων (προσωρινή και μεγάλης χρονικής διάρκειας)

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2 του άρθρου 4 της ΚΥΑ 24944/1159, διακρίνονται δύο περιπτώσεις αποθήκευσης επικινδύνων αποβλήτων:

- α) όταν τα Ε.Α. αποθηκεύονται στο χώρο παραγωγής τους, οπότε εκτελείται «προσωρινή αποθήκευση» (προ της συλλογής των αποβλήτων),
- β) όταν τα Ε.Α. αποθηκεύονται εκτός του χώρου παραγωγής τους, οπότε εκτελείται «αποθήκευση εν αναμονή περαιτέρω εργασιών διαχείρισης των αποβλήτων» (μετά τη συλλογή τους), η οποία σύμφωνα με τον ορισμό της παραγράφου 12 του άρθρου 2 της ΚΥΑ 13588/725 καλείται «αποθήκευση».

Δε γίνεται διαχωρισμός μεταξύ ενδιάμεσης αποθήκευσης και αποθήκευσης μεγάλης χρονικής διάρκειας όπως συνηθίζεται σε κάποιες διεθνείς πρακτικές, αλλά με τον τρόπο που ορίζεται η έννοια της «αποθήκευσης» παραπάνω, μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει τόσο την έννοια της ενδιάμεσης αποθήκευσης όσο και την έννοια της αποθήκευσης μεγάλης χρονικής διάρκειας.

Όπως ορίζεται στο Κεφάλαιο 2 του άρθρου 4 της ΚΥΑ 24944/1159, στην περίπτωση της προσωρινής αποθήκευσης Ε.Α., οι χρησιμοποιούμενοι χώροι διαμορφώνονται ειδικά για τον σκοπό αυτό και πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση ασφαλείας από τους χώρους αποθήκευσης πρώτων και βοηθητικών υλών, τους χώρους παραγωγικών διαδικασιών και τους χώρους αποθήκευσης ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων. Σύμφωνα με την παράγραφο Ββ2 του άρθρου 7 της ΚΥΑ 13588/725, δεν απαιτείται χορήγηση άδειας για τις εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης, αλλά οι όροι για την πραγματοποίηση αυτών των εργασιών περιλαμβάνονται στην απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων που χορηγείται για τη λειτουργία των εν λόγω εγκαταστάσεων ή δραστηριοτήτων.

Όμως, για την αποθήκευση των Ε.Α. (όπως αυτή ορίζεται παραπάνω), απαιτείται η χορήγηση σχετικής άδειας όπως αυτή προδιαγράφεται στο άρθρο 7 της ΚΥΑ 13588/725.

Οι απαιτήσεις για τις κτιριακές εγκαταστάσεις και τις δεξαμενές όπου αποθηκεύονται Ε.Α. καθώς και για τα μέσα αποθήκευσης, περιλαμβάνονται στο άρθρο 4 της ΚΥΑ 24944/1159 (παράγραφοι 2.2, 2.3 και 2.4 του Κεφαλαίου 2). Επιπλέον, στο ίδιο Κεφάλαιο περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις για τη λειτουργία αυτών των εγκαταστάσεων και περιγράφονται οι υποχρεώσεις των υπευθύνων αυτών των εγκαταστάσεων.

Γενικά, οι αποθηκευτικοί χώροι πρέπει να φέρουν σήμανση, ανάλογα με το είδος των αποθηκευμένων αποβλήτων, η οποία θα πρέπει να αντιστοιχεί και στη σήμανση των εμπορευματοκιβωτίων που μεταφέρουν Ε.Α. Οι χώροι αποθήκευσης μπορεί να είναι κατάλληλες κτιριακές εγκαταστάσεις ή δεξαμενές σταθερής κατασκευής ή άλλου τύπου εγκαταστάσεις.

Τα απόβλητα θα πρέπει να αποθηκεύονται σε κτιριακές εγκαταστάσεις τέτοιας κατασκευής, ώστε να προφυλάσσονται από βροχές, πλημμύρες, φωτιά κ.λπ.. Η βάση του κτιρίου θα πρέπει να είναι κεκλιμένη και να φέρει αγωγούς απορροής οι οποίοι καταλήγουν σε φρεάτιο συλλογής επαρκούς χωρητικότητας και κατάλληλης στεγανοποίησης. Επίσης, το δάπεδο των χώρων αποθήκευσης θα πρέπει να είναι βιομηχανικού τύπου, κατάλληλης στιλπνότητας και επαρκούς αντιδιαβρωτικής προστασίας.

Κατά την κατασκευή και τη λειτουργία των κτιριακών εγκαταστάσεων αποθήκευσης Ε.Α., θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι:

- συμβατότητα των αποθηκευμένων Ε.Α. ανάλογα με την κλάση και τη συσκευασία τους,
- επαρκής αερισμός και φωτισμός του χώρου,
- αποφυγή της γειννίασης των αποθηκευμένων Ε.Α. με δίκτυα υποδομών που ενδέχεται να επηρεαστούν.

Αν τα επικίνδυνα απόβλητα αποθηκεύονται σε δεξαμενές, τότε αυτές θα πρέπει να φέρουν τα ακόλουθα μέσα ασφαλείας και έλεγχο:

- δείκτης στάθμης/οπτικός έλεγχος,
- συστήματα εξαερισμού,
- αυτόματο σύστημα ασφαλείας έναντι υπερχειλίσης και υπερπίεσης,
- αντικεραυνική προστασία, εφόσον δεν εξασφαλίζεται από παρακείμενα κτίρια,
- δείκτης πίεσης.

1.4.6. Επεξεργασία –Αξιοποίηση Ε.Α.

Οι βασικές αρχές και οι στόχοι σχετικά με την επεξεργασία και την αξιοποίηση των επικίνδυνων αποβλήτων περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 4 του παραρτήματος του τέταρτου άρθρου της ΚΥΑ 24944/1159. Επίσης, στο ίδιο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μεθόδων επεξεργασίας Ε.Α. ενώ ταυτόχρονα ορίζονται τα στοιχεία που θα πρέπει να διαθέτουν οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας Ε.Α. προκειμένου να λειτουργούν.

Για τις εργασίες αξιοποίησης και διάθεσης επικινδύνων αποβλήτων, απαιτείται έγκριση περιβαλλοντικών όρων, σύμφωνα με τα άρθρα 3, 4 και 5 του νόμου 1650/1986²³, όπως αντικαταστάθηκαν από τα άρθρα 1, 2 και 3 του νόμου 3010/2002²⁴, καθώς και με τις κατ' εξουσιοδότηση των άρθρων αυτών εκδοθείσες κανονιστικές διατάξεις όπως εκάστοτε ισχύουν.

Η έγκριση περιβαλλοντικών όρων αποτελεί προϋπόθεση για τη χορήγηση άδειας για εργασίες αξιοποίησης και επεξεργασίας. Η άδεια αυτή χορηγείται με απόφαση του Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., μετά από εισήγηση της αρμόδιας υπηρεσίας Περιβάλλοντος του Υπουργείου ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, σε εγκαταστάσεις οι οποίες εκτελούν τις ως άνω εργασίες.

23. Νόμος 1650/1986 «Για την προστασία του περιβάλλοντος» (ΦΕΚ Α 160 16.10.86).

24. Νόμος 3010/2002 «Εναρμόνιση του Ν. 1650/1986 με τις οδηγίες 97/11/Ε.Ε. και 96/61/Ε.Ε., διαδικασία οριοθέτησης και ρυθμίσεις θεμάτων για τα υδατορέματα και άλλες διατάξεις, (ΦΕΚ Α 91 25.04.2002).

Επίσης, για τη χορήγηση της άδειας επεξεργασίας, αξιοποίησης ή/και διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων απαιτείται μελέτη της οργάνωσης της εγκατάστασης, που να είναι σύμφωνη με τις Γενικές Τεχνικές Προδιαγραφές του άρθρου 5 της ΚΥΑ 13588/725, καθώς και με την απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων. Αν η εγκατάσταση υπάγεται στο πεδίο εφαρμογής της ΚΥΑ 5697/590/2000²⁵, απαιτείται βεβαίωση από την αρμόδια Υπηρεσία ότι ο φορέας διαχείρισης έχει τηρήσει τις υποχρεώσεις του, που απορρέουν από τις διατάξεις της ως άνω κοινής υπουργικής απόφασης.

1.5. Συμπεράσματα

Η υπαγωγή των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων στη νομοθεσία περί επικίνδυνων αποβλήτων, μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα καθώς εγείρει ερωτήματα σε σχέση με το ποιος είναι ο αρμόδιος κρατικός φορέας για τη διαχείριση τους. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, από τις διατάξεις του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), προβλέπεται ότι το Εθνικό Σχέδιο έκτακτης ανάγκης, για τη σύνταξη του οποίου είναι υπεύθυνο το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας, Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής (ΥΕΝΑΝΠ), θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για τη διαχείριση των εν λόγω αποβλήτων. Όμως, σύμφωνα με τη νομοθεσία περί επικίνδυνων αποβλήτων, ο αρμόδιος κρατικός φορέας για τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων είναι το Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ). Κατά συνέπεια, γίνεται αντιληπτό ότι κατά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας ενδέχεται να χαθεί πολύτιμος χρόνος ή ακόμα και να γίνουν λανθασμένες ενέργειες εξαιτίας ελλιπούς νομοθεσίας.

Ένα ακόμα κρίσιμο ζήτημα το οποίο δεν περιλαμβάνεται στη νομοθεσία περί επικίνδυνων αποβλήτων είναι η πρόνοια χώρων ενδιάμεσης αποθήκευσης. Όπως αναλύθηκε και στην αντίστοιχη παράγραφο, το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο και η παραγκώνιση του μπορεί να επιφέρει σημαντικές καθυστερήσεις και μεγάλη αύξηση του κόστους της διαχείρισης των αποβλήτων.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι υπάρχουν σημαντικές ελλείψεις τόσο στην Ελληνική όσο και στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία. Η φύση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων και το είδος της διαχείρισης που αυτά πρέπει να υποστούν επιβάλουν την ανάπτυξη ξεχωριστού νομοθετικού πλαισίου.

Η αποτελεσματικότητα στη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από πετρελαιοκηλίδες θα αυξανόταν θεαματικά αν ο αρμόδιος φορέας της Ελλάδας υιοθετούσε έναν οδηγό για την διαχείριση αυτών των αποβλήτων αντίστοιχο με αυτόν της Γαλλίας²⁶. Το αντίστοιχο Εγχειρίδιο Καταπολέμησης Ρύπανσης το οποίο διαθέτουν οι Λιμενικές Αρχές της Ελλάδας, αν και περιέχει στοιχεία για την διαχείριση των αποβλήτων, είναι αρκετά μεγάλης παλαιότητας και η εφαρμογή του δεν μπορεί να εξασφαλίσει την αποδοτικότητα και την ασφάλεια των επιχειρήσεων. Τέλος, στο πλαίσιο ενός τέτοιου οδηγού θα πρέπει να γίνεται η

25. ΚΥΑ 5697/590/2000 «περί καθορισμού μέτρων και όρων για την αντιμετώπιση κινδύνων από ατυχήματα μεγάλης έκτασης σε εγκαταστάσεις ή μονάδες λόγω της ύπαρξης επικίνδυνων ουσιών» (ΦΕΚ Β 405/2000).

26. Υπεύθυνος οργανισμός για τη σύνταξη αυτού του οδηγού είναι το Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution (Cedre).

καταγραφή των ενεργειών, καθώς και των αποτελεσμάτων αυτών, που έγιναν σε περιστατικά ρύπανσης του παρελθόντος. Μια τέτοια καταγραφή θα αποτρέψει την επανάληψη λανθασμένων ενεργειών και θα εξασφαλίσει καλύτερα ποσοστά επιτυχίας σε μια μελλοντική επιχείρηση αντιμετώπισης αποβλήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αποθετήριο περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο σε παγκόσμια κλίμακα

Προκειμένου να γίνει μια ανάλυση της σχέσης που διέπει την παραγωγή αποβλήτων (υγρών ή στερεών) και άλλους παράγοντες όπως είναι π.χ. η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε σε ένα περιστατικό ρύπανσης, συλλέχθηκαν τριάντα ιστορικά ατυχημάτων. Τα ιστορικά αυτά ελήφθησαν από τις δικτυακές ιστοσελίδες του Cedre (Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution) και του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), με εξαίρεση πέντε περίπου περιστατικών, τα ιστορικά των οποίων ελήφθησαν από την Τεχνική Προστασίας Περιβάλλοντος Α.Ε. Ακολούθως, γίνεται παράθεση των ιστορικών που συλλέχθηκαν:

2.1. Aegean Sea

Στις 3 Δεκεμβρίου 1992, το φορτηγό πλοίο μεταφοράς μεταλλευμάτων και πετρελαίου “Aegean Sea”, το οποίο έφερε ελληνική σημαία, εισερχόταν στο λιμάνι της “La Coruna” στις 5 πμ. όταν εν μέσω ισχυρής καταιγίδας βγήκε από την πορεία του και προσάραξε. Στη συνέχεια, το πλοίο έσπασε σε δύο μέρη και τυλίχθηκε στις φλόγες. Η πλώρη βυθίστηκε σε βάθος 50 μέτρων, ενώ η πρύμνη παρέμεινε ορατή.

Εκτός από μερικές εκατοντάδες κυβικών μέτρων πετρελαίου τα οποία αντλήθηκαν επιτυχώς από την πρύμνη, σχεδόν όλο το φορτίο διέφυγε στο περιβάλλον. Για την ακρίβεια, το πλοίο μετέφερε 79.000 τόνους “light crude oil” και υπολογίζεται ότι στη θάλασσα διέφυγαν 67.000 τόνοι. Παρόλα αυτά ένα μεγάλο μέρος του φορτίου κάηκε στη φωτιά που ξέσπασε ή διασκορπίστηκε στη θάλασσα.

Προκειμένου να καταπολεμηθεί η ρύπανση, οργανώθηκε μεγάλη επιχείρηση καθαρισμού τόσο στη θάλασσα όσο και στην ακτή. Στη θάλασσα, αναπτύχθηκαν πλωτά φράγματα, τα οποία επέτρεψαν τη συλλογή 3000 τόνων υγρών αποβλήτων (μίγμα νερού/πετρελαίου). Όσον αφορά στην ακτή, έγινε χειρωνακτικός καθαρισμός κατά τον οποίο συλλέχθηκαν 1200 τόνοι άμμου και μολυσμένου εξοπλισμού, τα οποία στη συνέχεια υπέστησαν καύση.

Περισσότερα από 300 km ακτογραμμής προσβλήθηκαν, ενώ η περιοχή είχε πληγεί ξανά 10 χρόνια νωρίτερα από την πετρελαιοκηλίδα του “Urquiola”. Αυτή η ζώνη που επλήγη είναι πολύ σημαντική για τη βιομηχανία της αλιείας. Σε μία προσπάθεια να αποτραπεί η κατανάλωση προϊόντων που θα προέρχονταν από την εν λόγω περιοχή, οι τοπικές αρχές διέταξαν την απαγόρευση της αλιείας και της πώλησης όλων των αλιευμάτων που προέρχονταν από εκεί.

Καθώς η κατάσταση εξομαλύνονταν, οι διάφορες απαγορεύσεις που αφορούσαν στην πληγείσα περιοχή άρχισαν να ερώνται προοδευτικά μεταξύ του Ιανουαρίου και του Σεπτεμβρίου 1993 και παρά την επιφυλακτικότητα των καταναλωτών, η βιομηχανία επέστρεψε σταδιακά σε κανονική λειτουργία. Παρόλα αυτά, η κηλίδα επηρέασε 4000 ψαράδες, καλλιεργητές οστρακοειδών και ιχθυοκαλλιεργητές. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν αρνητικές επιπτώσεις στον τουρισμό.

Σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά το ατύχημα, η ισπανική κυβέρνηση σε συνδυασμό με το διεθνές κεφάλαιο για τις αποζημιώσεις από ρύπανση πετρελαίου (IOPC fund), εγκατέστησαν ένα γραφείο αξιώσεων (claims office) στη “La Coruna”. Το γραφείο αυτό

έλαβε περισσότερες από 900 αξιώσεις αποζημιώσεων από ιδιώτες, επιχειρήσεις και συνεταιρισμούς οι οποίες συνολικά ανέρχονταν στα 300 εκατομμύρια ευρώ.

Υπεύθυνοι για το ατύχημα θεωρήθηκαν από κοινού, ο καπετάνιος του πλοίου και ο λιμενάρχης. Κατά συνέπεια, ο ιδιοκτήτης του πλοίου (μαζί με το IOPC fund) και η ισπανική κυβέρνηση (ο εργοδότης του λιμενάρχη) βρέθηκαν να είναι εξίσου υπεύθυνοι για το ατύχημα.



Εικόνα 2.1.:Επιχείρηση καθαρισμού μετά το ατύχημα του “Aegean Sea”

Εικόνα 2.2.: Πετρέλαιο από το “Aegean Sea” που ξεβρόστηκε σε παραλία

2.2. Amazonne

Το βράδυ της 30^{ης} Ιανουαρίου 1988, το ιταλικό δεξαμενόπλοιο “Amazonne” βρέθηκε εν μέσω άσχημων καιρικών συνθηκών σε απόσταση 60 ναυτικών μιλίων (ήτοι 110 km) από την δυτική ακτή της “Brittany” (Γαλλία). Το “Amazonne” ταξίδευε από την Λιβύη προς το Βέλγιο μεταφέροντας 32.000 τόνους αργού παραφινέλαιου.

Η καταπόνηση του πλοίου από τα κύματα προκάλεσε την αποκόλληση χαλύβδινων συρμάτων. Η μετακίνηση των συρμάτων προκάλεσε την απομάκρυνση των καλυμμάτων 14 ανοιγμάτων που χρησιμοποιούνται για το καθαρίσμα των δεξαμενών. Κατά συνέπεια, το πετρέλαιο άρχισε να διαφεύγει από τις δεξαμενές. Το πλήρωμα αντιλήφθηκε τη ζημιά το επόμενο πρωί.

Παρόλα αυτά, ο πλοίαρχος συνέχισε το ταξίδι του χωρίς να ενημερώσει τις αρχές για τη διαρροή πετρελαίου. Οι αρχές ενημερώθηκαν τελικά από τις ασφαλιστικές εταιρείες περίπου 12 ώρες μετά τον εντοπισμό της ζημιάς και κατά συνέπεια διέφυγαν 2.100 τόνοι πετρελαίου στη θάλασσα σε μια απόσταση 300 km.

Το πλούσιο σε παραφίνη πετρέλαιο το οποίο μεταφερόταν από το “Amazonne” είχε θερμανθεί στους 60° C όταν βρισκόταν στις δεξαμενές. Οπότε, όταν ήρθε σε επαφή με το θαλασσινό νερό, ψυχράνθηκε με αποτέλεσμα το σχηματισμό γαλακτώματος. Συνολικά, σχεδόν 3.000 τόνοι της παχύρρευστης ουσίας προκάλεσαν ρύπανση στις ακτογραμμές.

Εξαιτίας των άσχημων καιρικών συνθηκών αλλά και της διαρροής του πετρελαίου που έλαβε χώρα σε απόσταση 300 km, οι επιχειρήσεις στη θάλασσα ήταν περιορισμένες με αποτέλεσμα τη συλλογή περίπου 5 τόνων υγρών αποβλήτων.

Τα φύκια, η άμμος, τα βότσαλα και τα απόβλητα απορρυπάνθηκαν επί τόπου και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν σε εξειδικευμένα κέντρα επεξεργασίας. Στο βόρειο “Finistere”,

2.100 τόνοι ελαφρώς ρυπασμένων από το πετρέλαιο αποβλήτων (λιγότερο από 5%) υπέστησαν υγειονομική ταφή. Τα υπόλοιπα στερεά απόβλητα, δηλαδή τα απόβλητα από τις νότιες ακτές του “Finistere” τα οποία ανέρχονταν σε 4375 τόνους, καθώς και οι 300 τόνοι αποβλήτων που συλλέχθηκαν μετά την ολοκλήρωση των επιχειρήσεων καθαρισμού στη βόρεια ακτή, συγκεντρώθηκαν στο λιμάνι της “Brest” και στη συνέχεια υπέστησαν επεξεργασία με ασβέστη. Επιπλέον, σχεδόν 10.000 τόνοι αποβλήτων ανακτήθηκαν από τις ακτές της “Breton” και 2.000 – 3.000 τόνοι από τις ακτές της Νορμανδίας. Τέλος, περίπου 1.200 τόνοι από μολυσμένα βότσαλα έπρεπε να καθαριστούν και να επιστραφούν στη θέση τους πριν από τις εαρινές παλίρροιας. Συνολικά, συλλέχθηκαν 20.000 τόνοι στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.3.: Προστασία του “Aber Benoit” κάνοντας χρήση πλωτού φράγματος.



Εικόνα 2.4.: Πετρέλαιο που προσέβαλε τις ακτές μετά το ατύχημα του “Amazonne”

2.3. Amoco Cadiz

Στις 16 Μαρτίου 1978, το δεξαμενόπλοιο “Amoco Cadiz”, ενώ μετέφερε 227.000 τόνους αργού πετρελαίου, υπέστη βλάβη στο σύστημα ηδάλιουχίας του εν μέσω ισχυρής καταιγίδας και παρά τις προσπάθειες που έγιναν για τη ρυμούλκηση του, προσάραξε στο “Portsall” της Γαλλίας, στην ακτή της “Breton”.

Τα κύματα προκάλεσαν το σπάσιμο του σκάφους σε δύο μέρη με αποτέλεσμα την διαφυγή ολόκληρου του φορτίου στη θάλασσα. Στη συνέχεια, οι άνεμοι και τα κύματα οδήγησαν το πετρέλαιο στην ακτή με αποτέλεσμα να προσβληθούν 360 km ακτογραμμής (από την “Brest” μέχρι το “Saint Briec”).

Παρά τις άσχημες καιρικές συνθήκες, οργανώθηκαν επιχειρήσεις αντιμετώπισης στη θάλασσα, κατά τη διάρκεια των οποίων συλλέχθηκαν περισσότεροι από 100.000 τόνοι υγρών αποβλήτων με τη μορφή γαλακτώματος (“chocolate mousse”).

Μερικές εβδομάδες μετά το ατύχημα, είχαν συλλεχθεί περίπου 45.000 τόνοι άμμου, φυκιών και άλλων χαλασμάτων που είχαν προσβληθεί από το πετρέλαιο. Η συνολική ποσότητα των στερεών αποβλήτων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων καθαρισμού στις ακτές, ανήλθε στους 120.000 τόνους.



Εικόνα 2.5.: Χειρωνακτικός καθαρισμός των ακτών (source: IFP)



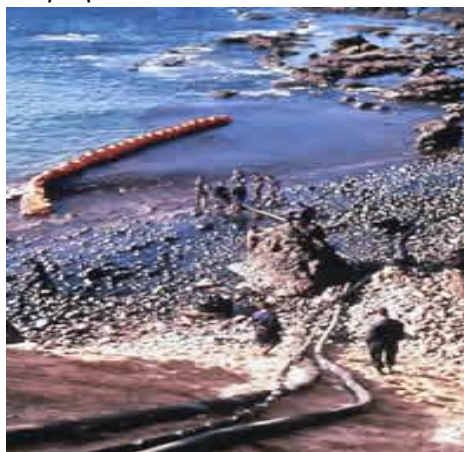
Εικόνα 2.6.: Χρήση βυτιοφόρων για την αποθήκευση του πετρελαίου που ανακτήθηκε Source: Cedre

2.4. Aragon

Στις 26 Δεκεμβρίου 1989, το δεξαμενόπλοιο “Aragon”, υπέστη βλάβη στην εγκατάσταση πρόωσης εν μέσω άσχημων καιρικών συνθηκών ενώ μετέφερε 235.000 τόνους αργού πετρελαίου από την Ισπανία προς το Μεξικό. Στις 29 Δεκεμβρίου, μια ρωγμή στη δεξαμενή Νο 1 προκάλεσε τη διαφυγή 25.000 τόνων πετρελαίου στη θάλασσα και σε απόσταση 70 km περίπου από την πλησιέστερη ακτή. Η δεξαμενή σφραγίστηκε προσωρινά από δύτες και το δεξαμενόπλοιο ρυμουλκήθηκε μέχρι την Τενερίφη προκειμένου να ξεφορτώσει το υπόλοιπο πετρέλαιο.

Τρεις εβδομάδες μετά το ατύχημα, η ρύπανση έφτασε στο νησί “Porto Santo” της Πορτογαλίας, μολύνοντας κατά αυτόν τον τρόπο μια πολύ δημοφιλή τουριστική παραλία. Για την αντιμετώπιση της ρύπανσης μεταφέρθηκε εξοπλισμός από την Γαλλία, τη Δανία, την Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο προς το “Porto Santo”.

Οι άσχημες καιρικές συνθήκες δεν επέτρεπαν τη διενέργεια οποιασδήποτε επιχείρησης στη θάλασσα. Αντίθετα, στις ακτές, η αποτελεσματικότητα των ομάδων καθαρισμού σε συνδυασμό με την αυτο-καθαριστική ικανότητα των παραλιών που οφειλόταν στην δραστηριότητα των κυμάτων, απέτρεψαν μια μεγάλη οικολογική καταστροφή. Οι ακτογραμμές καθαρίστηκαν με επιτυχία χάρη στη χρήση ανατρεπόμενων φορητών, μπουλντόζων και άλλου κατάλληλου εξοπλισμού. Επιπλέον, για τον καθαρισμό των βραχωδών ακτών έγινε χρήση διασκορπιστικών και πλύσης υψηλής πίεσης. Υπολογίζεται ότι κατά τη διάρκεια του καθαρισμού των ακτών συλλέχθηκαν περίπου 14.000 τόνοι στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.7.: Ρύπανση από το “Aragon” (πηγή: Cedre)



Εικόνα 2.8.: Ενδιάμεση αποθήκευση αποβλήτων (πηγή: Cedre)

2.5. Athos 1

Στις 26 Νοεμβρίου 2004, το δεξαμενόπλοιο “Athos 1” πλησίαζε το σταθμό εκφόρτωσης στην περιοχή της “Philadelphia” των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, όταν «χτύπησε» σε ένα μεταλλικό σωλήνα. Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρουσης ήταν η διαφυγή 1.000 τόνων ιδιαίτερα παχύρρευστου αργού πετρελαίου (με πυκνότητα μεγαλύτερη του νερού) στο περιβάλλον.

Από το ατύχημα του “Athos 1” μολύνθηκαν πάνω από 200 km ακτογραμμής στις πολιτείες “Pennsylvania”, “New Jersey” και “Delaware”. Κατά την επιχείρηση αντιμετώπισης της ρύπανσης στη θάλασσα αναπτύχθηκαν φράγματα με μήκος άνω των 30km, με αποτέλεσμα τη συλλογή περίπου 500 τόνων υγρών αποβλήτων. Τέλος, ο καθαρισμός των ακτών είχε ως αποτέλεσμα τη συλλογή 17.800 τόνων μολυσμένων υλικών και πετρελαίου.

2.6. Baltic Carrier

Στις 28 Μαρτίου 2001, κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας στην Βαλτική (9 Beaufort), το φορτηγό πλοίο “Tern” συγκρούστηκε με το δεξαμενόπλοιο “Baltic Carrier” μεταξύ των χωρικών υδάτων Γερμανίας και Δανίας. Το “Baltic Carrier” έφερε τη σημαία των “Marshall islands” και ήταν φορτωμένο με 30.000 τόνους “HFO”.

Το φορτηγό πλοίο “Tern” χτύπησε το “Baltic Carrier” στο βολβό, αφού βγήκε εκτός πορείας εξαιτίας βλάβης στο σύστημα πηδαλιουχίας. Από τη σύγκρουση προκλήθηκε διάρρηξη της δεξαμενής φορτίου No 6 του “Baltic Carrier”.

Η ποσότητα “HFO” που διέφυγε στο περιβάλλον εκτιμήθηκε αρχικά ότι ανέρχονταν στους 1.500 με 1.900 τόνους. Όμως, στη συνέχεια έγινε διόρθωση της εκτίμησης, οπότε έγινε γνωστό ότι διέφυγαν 2.700 τόνοι (όση ήταν και η χωρητικότητα της δεξαμενής No 6).

Κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών μετά τη σύγκρουση, οι κακές καιρικές συνθήκες δυσχέραιναν τις προσπάθειες που έκαναν οι λιμενικές αρχές της Δανίας προκειμένου να αντιμετωπίσουν την πετρελαιοκηλίδα. Παρόλα αυτά, κατάφεραν να συλλέξουν 2.000 τόνους υγρών αποβλήτων.

Από το πετρέλαιο που διέφυγε από το “Baltic Carrier” προσβλήθηκαν περίπου 50 km ακτογραμμής. Κατά την επιχείρηση καθαρισμού των ακτών συμμετείχαν 200 εργαζόμενοι της πολιτικής προστασίας, οι οποίοι κατάφεραν να συγκεντρώσουν 10.750 τόνους στερεών αποβλήτων. Τα στερεά απόβλητα που συγκεντρώθηκαν ήταν κυρίως άμμος (όχι φύκια και χαλάσματα).



Εικόνα 2.9.: Περιορισμός του πετρελαίου με χρήση φραγμάτων (πηγή: Cedre)

2.7. Black Sea Storm

Στις 10 και στις 11 Νοεμβρίου 2007 μια πολύ ισχυρή καταιγίδα έπληξε το στενό του “Kerch”, το οποίο βρίσκεται μεταξύ της Ουκρανίας (στα δυτικά) και της Ρωσίας (στα ανατολικά) και συνδέει τη θάλασσα του “Αζοβ” (στα βόρεια) με τη Μαύρη θάλασσα (στα νότια). Κατά την εκδήλωση αυτής της καταιγίδας παρατηρήθηκαν άνεμοι ταχύτητας 110 km/h οι οποίοι προκάλεσαν κύματα ύψους μεγαλύτερου από 5 μέτρα σε μια περιοχή όπου το βάθος του βυθού είναι μεταξύ 7 και 12 μέτρων.

Πολλά από τα σκάφη που βρίσκονταν στην περιοχή αγνόησαν την προειδοποίηση των Ουκρανικών αρχών σχετικά με τις άσχημες καιρικές συνθήκες και βρέθηκαν εν μέσω μιας πολύ σπάνιας κατάστασης (σε όρους καιρικών συνθηκών και κατάστασης θάλασσας) για την περιοχή. Αυτές οι συνθήκες προκάλεσαν σοβαρές ζημιές σε περίπου 10 σκάφη, τα περισσότερα εκ των οποίων ήταν αγκυροβολημένα.

Στις 11 Νοεμβρίου 2007, τέσσερα πλοία βυθίστηκαν στο στενό του “Kerch”:

Το ρωσικό δεξαμενόπλοιο “Volgoneft-139” έσπασε σε δύο μέρη ενώ μετέφερε 3.500 τόνους μαζούτ. Από τις δεξαμενές που βρίσκονταν στο πρυμναίο κομμάτι του δεξαμενοπλοίου διέφυγαν περίπου 1.300 τόνοι πετρελαίου στη θάλασσα. Οι υπόλοιποι 1.000 τόνοι που βρίσκονταν στο πρυμναίο κομμάτι του πλοίου, αντλήθηκαν από αυτό πριν τη ρυμούλκηση του μέχρι το λιμάνι “Kavkaz”. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μικρή διαρροή από το προσαραγμένο πρωαίο κομμάτι του πλοίου, όπου παρέμεναν περίπου 1.000 τόνοι πετρελαίου.

Το ρωσικό πλοίο “Volnogorsk” ναυάγησε και τώρα βρέθηκε σε βάθος 10,6 μέτρων με 2.500 τόνους θείου. Δεν παρατηρήθηκε διαρροή πετρελαίου από το συγκεκριμένο σκάφος.

Το ρωσικό πλοίο “Nahichevan” βυθίστηκε σε βάθος 9,5 μέτρων με 2.400 τόνους θείου.

Το ρωσικό πλοίο “Kovel”, το οποίο μετέφερε 2.100 τόνους θείου, παρασύρθηκε προς την Ουκρανική ακτογραμμή και βυθίστηκε περίπου στο μέσο του στενού του “Kerch” και σε βάθος 9,3 μέτρων. Οι δύτες που επιθεώρησαν το πλοίο, παρατήρησαν μικρή διαρροή καυσίμου εξαιτίας της καταστροφής του μηχανοστασίου.

Συνολικά εκτιμάται ότι διέφυγαν στη θάλασσα 1.300 τόνοι μαζούτ (Heavy Fuel Oil – HFO), 2,3 τόνοι λιπαντικών, 25 τόνοι πετρελαίου “diesel” και 5,5 τόνοι πετρελαίου θέρμανσης.

Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν δεν επέτρεψαν τη διενέργεια επιχειρήσεων αντιμετώπισης της ρύπανσης στη θάλασσα. Όμως, στις ακτές (προσβλήθηκαν περίπου 10 km ακτογραμμής) οργανώθηκε επιχείρηση καθαρισμού στην οποία συμμετείχαν περισσότερα από 500 άτομα – υπάλληλοι του Υπουργείου έκτακτων αναγκών. Συνολικά, συλλέχθηκαν 14.700 τόνοι στερεών αποβλήτων στους οποίους περιέχονταν μολυσμένη άμμος, μολυσμένος εξοπλισμός, κ.ά.

2.8. Boehlen

Στις 15 Οκτωβρίου 1976, το δεξαμενόπλοιο “Boehlen” με σημαία Ανατολικής Γερμανίας, μετέφερε 9.500 τόνους “Boscan” (ένα είδος μαζούτ από τη Βενεζουέλα) και κατευθυνόταν προς το “Rostock” της Γερμανίας. Ενώ βρισκόταν στα ανοιχτά της Γαλλίας (περίπου 20 km από τις ακτές της “Breton”), βρέθηκε εν μέσω μιας πολύ ισχυρής καταιγίδας και βυθίστηκε

κοντά στο νησί “Sein”. Η μεγαλύτερη ποσότητα του μεταφερόμενου πετρελαίου (το οποίο είχε θερμανθεί στους 40-45 °C για να διευκολυνθεί η άντληση του κατά την εκφόρτωση) διέφυγε στη θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται ότι διέφυγαν 7.000 τόνοι.

Στη θάλασσα, οι επιχειρήσεις αντιμετώπισης ήταν περιορισμένες εξαιτίας των άσχημων καιρικών συνθηκών, αλλά παρόλα αυτά συλλέχθηκαν 1.000 τόνοι υγρών αποβλήτων.

Οι τεράστιες πετρελαιοκηλίδες που δημιουργήθηκαν «χτύπησαν» τις ακτές του νησιού “Sein” πριν φτάσουν και τις κυρίως βραχώδεις ακτές της “Breton”, όπου απείλησαν την τοπική πανίδα. Για τον καθαρισμό των ακτών (υπολογίζεται ότι μολύνθηκαν περίπου 20 km ακτογραμμής) κλήθηκε ο στρατός, ο οποίος συνέβαλε στη συγκέντρωση 8.000 τόνων στερεών αποβλήτων χρησιμοποιώντας κουβάδες και φτυάρια.

2.9. Braer

Το βράδυ της 4^{ης} Ιανουαρίου 1993, το λιβεριανής σημαίας δεξαμενόπλοιο “Braer”, ενώ έπλεε εν μέσω καταιγίδας από Νορβηγία προς Καναδά (μέσω της συντομότερης αλλά και πιο επικίνδυνης διαδρομής), υπέστη ζημιά στη μηχανολογική του εγκατάσταση εξαιτίας της εισροής υδάτων στις δεξαμενές καυσίμου του πλοίου. Η ρυμούλκηση του πλοίου δεν ήταν εφικτή καθώς το πλήρωμα εκκένωσε άμεσα το πλοίο και υπήρχε έλλειψη ρυμουλκού ανοιχτής θαλάσσης στην περιοχή. Κατά συνέπεια το πλοίο προσάραξε στα νησιά “Shetlands” της Σκωτίας και η ζημιά που υπέστη το πλοίο προκάλεσε τη διαφυγή του φορτίου του στη θάλασσα.

Κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος δώδεκα ημερών μετά την προσάραξη του Braer, οι 84.500 τόνοι αργού πετρελαίου (Norwegian Gullfaks) που αποτελούσαν το φορτίο διέφυγαν στο περιβάλλον, καθώς οι σχεδόν συνεχείς δυνατοί άνεμοι και τα κύματα έσπαγαν στα δύο το πλοίο.

Οι ιδιαίτερα άσχημες καιρικές συνθήκες ήταν απαγορευτικές για τη διενέργεια μηχανικής ανάκτησης του πετρελαίου από τη θάλασσα. Όμως, κατά διαστήματα, όταν κόπαζαν οι άνεμοι γινόταν χρήση χημικών διασκορπιστικών από αέρος. Συνολικά, έγινε χρήση 130 τόνων χημικών διασκορπιστικών.

Περιορισμένες ήταν και οι επιχειρήσεις στις ακτές, τόσο εξαιτίας των καιρικών συνθηκών όσο και εξαιτίας της ελάχιστης μόλυνσης που υπέστησαν σε σχέση με την ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε. Από τις 39 παραλίες που θεωρήθηκαν ότι απειλούνται, οι 20 υπέστησαν μόλυνση και από αυτές μόνο οι 9 χρειάστηκαν καθαρισμό. Συνολικά, ανακτήθηκαν από τις ακτές 2.000 τόνοι αποβλήτων.

Το ατύχημα του Braer ήταν αρκετά ασυνήθιστο καθώς στο πλαίσιο αυτού δε δημιουργήθηκε κηλίδα. Η φύση του πετρελαίου σε συνδυασμό με τη διασκορπιστική δράση των ανέμων και των κυμάτων επέφερε τον φυσικό διασκορπισμό του πετρελαίου μέσω της στήλης ύδατος. Τα σταγονίδια πετρελαίου απορροφήθηκαν από ιζήματα σωματιδίων τα οποία βυθίστηκαν τελικά στον πυθμένα της θάλασσας. Τα υποθαλάσσια ρεύματα συνέβαλαν στη διάχυση του πετρελαίου αυτού σε μια μεγάλη έκταση. Όμως, σημαντική ποσότητα του πετρελαίου (περίπου 30%) κατέληξε τελικά σε δύο βαθιές «δεξαμενές» ιζημάτων (περίπου 10.500 τόνους στα δυτικά της χερσονήσου του “South Shetland” και περίπου 12.500 τόνοι στα νότιο-ανατολικά του “Fair Isle”). Εκτιμήθηκε ότι το πετρέλαιο αυτό θα διαλυόταν

σταδιακά, αλλά δεν ήταν γνωστό τι οικολογικές συνέπειες θα μπορούσε να επιφέρει αυτή η διαδικασία.

Συνολικά, επηρεάστηκαν 30-50 km² γης (περίπου 600 km ακτογραμμής) και απαγορεύτηκε η κατανάλωση προϊόντων που προέρχονταν από αυτά τα εδάφη. Επιπλέον, υπήρξε και ανησυχία του πληθυσμού σχετικά με τις αναθυμιάσεις από το πετρέλαιο και τα χημικά διασκορπιστικά, καθώς οι αναθυμιάσεις αυτές είναι πιθανό να προκαλέσουν ναυτία και διάφορες άλλες ενοχλήσεις.

Αν σκεφτεί κανείς την ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε, οι περιβαλλοντικές συνέπειες ήταν απροσδόκητα περιορισμένες.



Εικόνα 2.10.: Η μαινόμενη θάλασσα προκάλεσε το φυσικό διασκορπισμό των 84.500 τόνων αργού πετρελαίου που διέφυγαν από το “Braer” μέσω της δράσης των κυμάτων και της εξάτμισης (πηγή: ITOPF/J.Y. Huet)

2.10. Bright Artemis

Στις 14 Αυγούστου 2006, το δεξαμενόπλοιο “Bright Artemis”, μετέφερε 250.000 τόνους πετρελαίου από τον Περσικό κόλπο προς την Ιαπωνία όταν έλαβε σήμα κινδύνου από το εμπορικό πλοίο “Amar” και αποφάσισε να σπεύσει σε βοήθεια. Στην περιοχή επικρατούσαν δυνατοί άνεμοι οι οποίοι «έριξαν» το εμπορικό πλοίο πάνω στο δεξαμενόπλοιο. Κατά συνέπεια, δημιουργήθηκε ρήγμα έκτασης 5 m² στη γάστρα του “Bright Artemis”.

Παρατηρήθηκε διαρροή από δύο δεξαμενές του “Bright Artemis” οι οποίες υπέστησαν ζημιά. Το πετρέλαιο μεταφέρθηκε γρήγορα σε άλλες δεξαμενές οι οποίες είχαν μείνει ανέπαφες. Υπολογίζεται ότι διέφυγαν στο περιβάλλον 4.500 τόνοι πετρελαίου.

Το ατύχημα του “Bright Artemis” έγινε στον Περσικό κόλπο και μακριά από τις ακτές (300 μίλια δυτικά των “Nicobar islands”) και έτσι η ρύπανση δεν τις απείλησε. Επίσης, καθώς η ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε ήταν σχετικά μικρή και βρισκόταν μακριά από τις ακτές, η εταιρία του “Bright Artemis”, “Mitsui OSK Lines” αποφάσισε να μην επέμβει και να αφήσει το θαλάσσιο περιβάλλον και την εξάτμιση να αντιμετωπίσουν την πετρελαιοκηλίδα.

2.11. Christos Bitas

Στις 12 Οκτωβρίου 1978, το δεξαμενόπλοιο “Christos Bitas”, έπλεε από το “Rotterdam” προς το “Belfast” με φορτίο 35.000 τόνων αργού πετρελαίου από το Ιράν, όταν προσάραξε σε απόσταση 15 περίπου χιλιομέτρων από την ακτή “Pembrokeshire” στην Ουαλία. Η

προσάραξη αυτή επέφερε τη διαφυγή 4.000 τόνων πετρελαίου στο περιβάλλον. Ο πλοίαρχος κατάφερε να επαναπλεύσει το σκάφος χωρίς βοήθεια και αποφάσισε να συνεχίσει το ταξίδι θεωρώντας ότι δεν υπήρχε πλέον σημαντική διαρροή πετρελαίου. Παρόλα αυτά ενημέρωσε τις λιμενικές αρχές σχετικά με την πετρελαιοκηλίδα.

Καθώς υπήρχε μεγάλος βαθμός επικινδυνότητας για την εμφάνιση περιβαλλοντικής ρύπανσης, οι λιμενικές αρχές ενημέρωσαν αμέσως την ιδιοκτήτρια εταιρεία του πλοίου (Adriatic Transports Ltd) και την ιδιοκτήτρια του φορτίου (British Petroleum (BP)). Έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι το “Christos Bitas” είχε υποστεί σοβαρές βλάβες και συνέχιζε να χάνει πετρέλαιο. Κατά συνέπεια, η BP διέταξε να σταματήσει αμέσως το σκάφος προς αποφυγή εξάπλωσης της ρύπανσης.

Στις 13 Οκτωβρίου, δύο δεξαμενόπλοια προσέγγισαν το “Christos Bitas” προκειμένου να πάρουν το φορτίο του. Αυτή η επιχείρηση διήρκεσε αρκετές ημέρες. Μέχρι τις 20 Οκτωβρίου, είχαν απομακρυνθεί 26.000 τόνοι πετρελαίου από το “Christos Bitas”. Τότε, δημιουργήθηκε το ζήτημα του τι θα γινόταν με το σκάφος. Το κόστος επισκευής του σκάφους ήταν πολύ μεγάλο και έτσι ο πλοιοκτήτης συμφώνησε να το βυθίσουν. Αυτό δεν μπορούσε να γίνει στην θάλασσα της Ιρλανδίας εξαιτίας της βλάβης που θα προκαλούσε στο περιβάλλον. Έτσι, το “Christos Bitas” ρυμουλκήθηκε μέχρι μια περιοχή με βαθιά νερά στον Ατλαντικό Ωκεανό όπου δε προκαλούσε προβλήματα στη ναυσιπλοΐα και την αλιεία. Βυθίστηκε στις 31 Οκτωβρίου. Σχηματίστηκε μια πετρελαιοκηλίδα αλλά η εναέρια παρατήρηση στις 13 Νοεμβρίου έδειξε ότι είχε διασκορπιστεί με φυσικό τρόπο.

Η έκταση της ρύπανσης δεν ήταν δυνατό να διαπιστωθεί καθώς η ομίχλη που επικρατούσε δεν επέτρεπε την από αέρος επιθεώρηση. Συγκεντρώθηκε ένας στόλος 40 σκαφών, ο οποίος προέβη στην ανάπτυξη φραγμάτων για τον περιορισμό του πετρελαίου ενώ έγινε και χρήση χημικών διασκορπιστικών.

Στις 16 Οκτωβρίου, ο άνεμος άλλαξε κατεύθυνση και ταυτόχρονα δυνάμωσε καθιστώντας αδύνατη την διεξαγωγή εναέριων επιθεωρήσεων. Μικρές ποσότητες πετρελαίου έκαναν την εμφάνιση τους κοντά στα νησιά “Skomer” και “Skokholm” τα οποία είναι περιβάλλοντα υπό προστασία. Σε μια προσπάθεια αποτροπής του πετρελαίου να φτάσει σε αυτά τα νησιά έγιναν επιχειρήσεις ψεκασμού χημικών διασκορπιστικών, οι οποίες μείωσαν σημαντικά την ποσότητα του πετρελαίου. Παρόλα αυτά, στη συνέχεια έγιναν λιγότερο αποτελεσματικές καθώς το πετρέλαιο άρχισε να σχηματίζει γαλάκτωμα με το νερό. Από τις επιχειρήσεις που έγιναν στη θάλασσα, συγκεντρώθηκαν 360 τόνοι υγρών αποβλήτων.

Από το ατύχημα του “Christos Bitas” προσβλήθηκαν περίπου 15 km ακτογραμμής. Για τον καθαρισμό τους έγινε με χρήση τρακτέρ, κουβάδων και φτυαριών και επετεύχθη η συλλογή 25 τόνων στερεών αποβλήτων περίπου. Η επιχείρηση καθαρισμού τελείωσε με πλύση υψηλής πίεσης και ρίψη χημικών διασκορπιστικών (όπου αυτό επιτρεπόταν).



Εικόνα 2.11.: Ρίψη χημικών διασκορπιστικών μετά το ατύχημα του “Christos Bitas” (πηγή: BP)

2.12. Coral Bulker

Στις 25 Δεκεμβρίου 2000, το εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carrier) “Coral Bulker”, εν μέσω άσχημων καιρικών συνθηκών, είχε ρίξει άγκυρα και περίμενε να εισέλθει στο λιμάνι “Viana do Castelo” της Πορτογαλίας. Είχε ταξιδέψει ως εκεί από το Tallinn (Εσθονία) με φορτίο αποτελούμενο από ξυλεία. Στις 11 μμ, το πλοίο χτύπησε στον εξωτερικό τοίχο του λιμανιού. Τα ύφαλα του πλοίου υπέστησαν μεγάλες ζημιές και η starboard δεξαμενή Νο 4 καθώς και το μηχανοστάσιο κατακλύστηκαν από νερό.

Οι 630 τόνοι μαζούτ (HFO) και οι 70 τόνοι πετρελαίου “Diesel” που αποτελούσαν τα καύσιμα του πλοίου, διέρρευσαν στο θάλασσα απειλώντας με ρύπανση τις παραλίες νότια και βόρεια του λιμανιού καθώς και τις εκβολές του ποταμού “Lima”. Από την πετρελαιοκηλίδα επηρεάστηκαν 30 km ακτογραμμής.

Για την προστασία του λιμανιού από το πετρέλαιο αναπτύχθηκαν φράγματα και έτσι ήταν εφικτή η συλλογή 8 τόνων υγρών αποβλήτων από την επιφάνεια της θάλασσας.

Στις ακτές έγιναν επιχειρήσεις καθαρισμού, οι οποίες είχαν σαν αποτέλεσμα τη συγκέντρωση 6.500 σάκων που περιείχαν 360 τόνους μολυσμένης άμμου.

2.13. Erika

Στις 11 Δεκεμβρίου 1999, το μαλτέζικο δεξαμενόπλοιο “Erika” φορτωμένο με 31.000 τόνους μαζούτ (Heavy Fuel Oil no 6), αντιμετώπισε δομικά προβλήματα εν μέσω άσχημων καιρικών συνθηκών έξω από την ακτή “Biscay” ενώ εκτελούσε δρομολόγιο από το “Dunkirk” της Γαλλίας προς το “Livorno” της Ιταλίας. Ο πλοίαρχος έστειλε αρχικά σήμα συναγερμού και προέβη σε μεταφορά φορτίου από δεξαμενή σε δεξαμενή. Στη συνέχεια, ενημέρωσε τις γαλλικές αρχές ότι η κατάσταση ήταν υπό έλεγχο και ότι κατευθυνόταν προς το λιμάνι της “Donges” με μειωμένη ταχύτητα. Την επόμενη ημέρα, στις 6:05 πμ., ο πλοίαρχος εξέπεμψε σήμα κινδύνου: το πλοίο έσπαγε σε 2 μέρη.

Το “Erika” έσπασε σε 2 μέρη στις 8:15 πμ., σε διεθνή ύδατα, περίπου 30 μίλια (48 km) νότια του “Penmarc’h” (νότια “Britanny” - Γαλλία). Η πλώρη βυθίστηκε το επόμενο βράδυ σε μικρή απόσταση από το σημείο όπου το πλοίο έσπασε στα δύο. Στις 14:15 της 12^{ης} Δεκεμβρίου, η πρύμνη ρυμουλκήθηκε προκειμένου να μην καταλήξει στο γαλλικό νησί

“Belle-Ile” και βυθίστηκε την επόμενη ημέρα στις 14:50. Τα δύο κομμάτια του πλοίου κατέληξαν να βρίσκονται σε βάθος 120 m και σε απόσταση 10 km μεταξύ τους.

Με βάση τον όγκο του πετρελαίου που απαντήθηκε από το κουφάρι του “Erika”, υπολογίζεται ότι διέφυγαν στο περιβάλλον 20.000 τόνοι πετρελαίου. Κατά την αρχική εναέρια επιθεώρηση εντοπίστηκαν αρκετές κηλίδες οι οποίες κινούνταν στη θάλασσα. Μια από αυτές είχε μήκος 15 km και υπολογίζεται ότι ήταν γύρω στους 3.000 τόνους.

Στη θάλασσα, οι επιχειρήσεις αντιμετώπισης που οργανώθηκαν δεν ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματικές τόσο λόγω των άσχημων καιρικών συνθηκών όσο και λόγω του μη εφικτού διασκορπισμού της ρυπαντικής ουσίας (Heavy Fuel Oil). Έτσι, οι μόνες μέθοδοι που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στη θάλασσα ήταν ο περιορισμός και η ανάκτηση του πετρελαίου. Συνολικά, από τη θάλασσα συλλέχθηκαν 1.200 τόνοι υγρών αποβλήτων, γλιτώνοντας έτσι τις ζωές χιλιάδων θαλασσοπούλιων και μειώνοντας την μόλυνση της ακτής. Κατά συνέπεια, εξοικονομήθηκε το κόστος που θα απαιτούνταν για την ανάκτηση και τη διάθεση 12.000 – 15.000 τόνων μολυσμένων φυκιών, άμμου, βότσαλων και άλλων αποβλήτων. Οι 1.200 τόνοι γαλακτώματος πετρελαίου οι οποίοι ανακτήθηκαν από τη θάλασσα, υπέστησαν επεξεργασία σε διυλιστήριο.

Η διαρκής κίνηση των κηλίδων στη θάλασσα, σε συνδυασμό με το θρυμματισμό που υπέστησαν και την αδιαλυτότητα του συγκεκριμένου είδους πετρελαίου, είχε ως αποτέλεσμα τον ευρύ διασκορπισμό της μόλυνσης. Υπολογίζεται ότι μολύνθηκαν 450 km ακτογραμμής. Οι πρώτες ποσότητες πετρελαίου έφτασαν στις ακτές (νότιο “Finistere”) 11 ημέρες μετά το ατύχημα, στις 23 Δεκεμβρίου. Οι διασκορπισμένες αφίξεις πετρελαίου συνεχίστηκαν τις επόμενες ημέρες, καθώς πιθανότατα, η θάλασσα ανέσυρε κάποια ποσότητα πετρελαίου η οποία είχε ήδη φτάσει σε κάποια ακτή ή στον πυθμένα της θάλασσας, προσβάλλοντας τα νησιά “Groix” και “Belle-Ile” στις 25 Δεκεμβρίου και την περιοχή “Vendee” βόρεια του νησιού “Noirmoutier” στις 27 Δεκεμβρίου. Εξαιτίας των άσχημων καιρικών συνθηκών και των πολύ υψηλών παλιρροιών, η ρύπανση έφτασε πολύ ψηλά στις ακτές μολύνοντας τις κορυφές βράχων οι οποίοι ξεπερνούσαν τα 10 m ύψος. Στις 26 Δεκεμβρίου, 14 ημέρες μετά τη βύθιση του “Erika”, το νησί “Groix” προσβλήθηκε σφόδρα και η ρύπανση έφτασε μέχρι τη βόρεια και τη νότια κοίτη του ποταμού “Loire”. Ένα παχύρρευστο στρώμα πετρελαίου με πάχος 5-30 cm και εύρος αρκετών μέτρων κάλυψε μέρη της ακτής. Από τις επιχειρήσεις καθαρισμού των ακτών συλλέχθηκαν 250.000 τόνοι στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.12.: Το “Erika” τη στιγμή της βύθισης του



Εικόνα 2.13.:Ογκώδεις αφίξεις πετρελαίου στο “Loire Atlantique” (πηγή: Cedre)

2.14. Exxon Valdez

Στις 24 Μαρτίου 1989, το αμερικανικό δεξαμενόπλοιο “Exxon Valdez”, το οποίο είχε μόλις φορτώσει 180.000 τόνους αργού πετρελαίου στον τερματικό σταθμό του “Valdez”, απομακρύνθηκε από την πορεία του προκειμένου να αποφύγει κάποια παγόβουνα που παρασύρονταν από τα θαλάσσια ρεύματα. Ο καπετάνιος «έβαλε» το πλοίο στον αυτόματο πιλότο και σε λιγότερο από τριάντα λεπτά το πλοίο προσάραξε στο “Bligh Reef” το οποίο βρίσκεται μέσα στο στενό του “Prince William” με ταχύτητα 12 κόμβων.

Από την προσάραξη υπέστησαν ζημιές 11 από τις 18 δεξαμενές του πλοίου με αποτέλεσμα τη διαφυγή 38.500 τόνων αργού πετρελαίου στο περιβάλλον. Περισσότερα από 7.000 km² πετρελαιοκηλίδων προκάλεσαν μόλυνση σε 800 km ακτογραμμής.

Κατά τη διάρκεια του 1989 η εταιρεία του πλοίου “Exxon” προσέλαβε 11.000 άτομα προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ρύπανση όσο πιο γρήγορα και όσο πιο αποτελεσματικά γινόταν. Οι επιχειρήσεις αντιμετώπισης που έγιναν στη θάλασσα είχαν σαν αποτέλεσμα τη συλλογή 3.800 τόνων υγρών αποβλήτων. Στις ακτές έγινε μηχανική και χειρωνακτική ανάκτηση των στερεών αποβλήτων με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση 25.000 τόνων. Επιπλέον έγινε χρήση της τεχνικής της βιο-αποκατάστασης με την οποία επιταχύνονται οι διαδικασίες φυσικής αποδόμησης του πετρελαίου χάρη στη δράση μικροοργανισμών. Η μείωση της ποσότητας του πετρελαίου που κάλυπτε τις επιφάνειες στις οποίες εφαρμόστηκε η μέθοδος ήταν τρεις φορές πιο γρήγορη.

Η κηλίδα που προέκυψε από το ατύχημα του “Exxon Valdez” συγκλόνησε της Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και την εταιρεία “Exxon” που δεν είχαν φανταστεί ποτέ τέτοια καταστροφή. Η διαφυγή των 38.500 τόνων πετρελαίου στη θάλασσα από το “Exxon Valdez” ήταν υπεύθυνη για τη δημιουργία της μεγαλύτερης πετρελαιοκηλίδας που είχε καταγραφεί μέχρι εκείνη τη στιγμή στις ΗΠΑ. Το ατύχημα του “Exxon Valdez” είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία του κανονισμού για τη «διπλή γάστρα» της 6^{ης} Μαρτίου 1992 (MARPOL convention, rule 13F), η οποία τέθηκε σε ισχύ για όλα τα σκάφη μετά την 6^η Ιουλίου 1996.



Εικόνα 2.14.: Πάνω αριστερά στην εικόνα φαίνεται το “Exxon Valdez” και στην υπόλοιπη εικόνα η πετρελαιοκηλίδα που προέκυψε από το ατύχημα (Πηγή: Cedre)

Εικόνα 2.15.: Καθαρισμός των ακτών από τη ρύπανση που προκλήθηκε από το “Exxon Valdez” (Πηγή: Cedre)

2.15. Haven

Στις 11 Απριλίου 1991, το κυπριακό δεξαμενόπλοιο (τύπου VLCC) “Haven”, ενώ ήταν φορτωμένο με 144.000 τόνους αργού πετρελαίου και είχε αγκυροβολήσει ανοιχτά της ακτής της Γένοβας, έπιασε φωτιά και στη συνέχεια εξερράγη και έσπασε σε τρία μέρη. Ένα από τα

κομμάτια του “Haven” βυθίστηκε επί τόπου ενώ τα υπόλοιπα βυθίστηκαν κατά τη διάρκεια της ρυμούλκησης τους. Παρά τις σημαντικές επιχειρήσεις αντιμετώπισης της ρύπανσης που έλαβαν χώρα στη θάλασσα, οι κηλίδες μετατοπίστηκαν προς τα δυτικά με αποτέλεσμα να προσβληθούν τμήματα της “Ligurian coast”, ενώ το πετρέλαιο έφτασε και μέχρι τη γαλλική Ριβιέρα (ως την περιοχή “Hyeres”). Οι ιταλικές αρχές αποφάσισαν να προβούν σε καύση της μεγαλύτερης ποσότητας πετρελαίου στη θάλασσα, παρακολουθώντας παράλληλα τις επιδράσεις στο περιβάλλον.

Στις 14 Απριλίου, υπολογίζεται ότι η κηλίδα είχε μήκος 12 μέτρα και πλάτος 4 μέτρα. Η κινητικότητα της ήταν περιορισμένη εξαιτίας της έλλειψης ανέμων και της ήρεμης θάλασσας. Η επιθεώρηση του ναυαγίου οδήγησε στο συμπέρασμα ότι θα έπρεπε να γίνει απάντληση του φορτίου εξαιτίας της κακής κατάστασης της γάστρας.

Μια μελέτη σχετικά με τη δυναμική των κηλίδων έδειξε υψηλό βαθμό εξάτμισης του πετρελαίου αλλά και το σχηματισμό κομματιών πίσσας. Κατά συνέπεια, αναπτύχθηκε ένα σύστημα παρακολούθησης του αέρα, του νερού, των ιζημάτων, των παραλιών, των ακτών και της θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας.



Εικόνα 2.16.: Η φλεγόμενη πρύμνη του “Haven” στον κόλπο της Γένοβας (πηγή: Cedre)

2.16. Hebei Spirit

Στις 7 Δεκεμβρίου 2007, το δεξαμενόπλοιο “Hebei Spirit” βρισκόταν αγκυροβολημένο μπροστά στο λιμάνι του “Incheon” στη δυτική ακτή της Νότιας Κορέας, νότια της “Seoul”, όταν χτυπήθηκε από τη φορτηγίδα “Samsung 1” η οποία παρασυρόταν αφού το σύρμα ρυμούλκησης της είχε σπάσει.

Η σύγκρουση είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία τριών ανοιγμάτων στη γάστρα του “Hebei Spirit” και τη δημιουργία μιας πετρελαιοκηλίδας στη “Yellow Sea” 8 μόλις χιλιόμετρα από την ακτή, η οποία αποτελούταν από τουλάχιστον 10.000 τόνους αργού πετρελαίου. Για την Κορέα, η κηλίδα αυτή ήταν συγκρίσιμη με αυτή που προκλήθηκε από το ατύχημα του “Sea Prince” το 1995 και η οποία ήταν η μεγαλύτερη πετρελαιοκηλίδα που είχε εκδηλωθεί στη χώρα μέχρι τότε.

Οι ακτοφυλακές, το ναυτικό και τα αλιευτικά σκάφη έκαναν χρήση διασκορπιστικών προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα ρυπαντικής ουσίας που κινούνταν προς την ακτή. Επιπλέον, οι ομάδες ανταπόκρισης ανέπτυξαν φράγματα μπροστά σε ευαίσθητες περιοχές

κατά μήκος της ακτογραμμής. Παρόλα αυτά οι κινούμενες κηλίδες προσέβαλαν πάνω από 300 km ακτογραμμής. Η ακτογραμμή που προσβλήθηκε αποτελείται από βραχώδεις περιοχές, αμμώδεις ακτές και παραλίες με βότσαλα.

Τα τρία είδη πετρελαίου που διέφυγαν στο περιβάλλον προέρχονταν όλα από τον Περσικό κόλπο: “Iranian Heavy”, “Upper Zakum” και “Khafji”. Και τα τρία είδη είναι ελαφρύ αργό πετρέλαιο με παρόμοια χαρακτηριστικά. Αντίθετα με τις προβλέψεις των μοντέλων, το πετρέλαιο παρέμεινε σχετικά ρευστό και δεν υπέστη γαλακτωματοποίηση σε μεγάλο βαθμό. Το χαμηλό ιξώδες του πετρελαίου συνεπαγόταν ότι ήταν εφικτή η χρήση “skimmers” στην επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι ήταν εφικτή η συγκέντρωση 1.500 τόνων υγρών αποβλήτων.

Στις παραλίες, έγινε επιλεκτικός καθαρισμός χειρωνακτικά (με χρήση φτυαριών, κουβάδων και απορροφητικών) και σε βραχώδεις περιοχές, οι Κορεατικές αρχές έκαναν χρήση της πλύσης υψηλής πίεσης. Μερικές ακτές καθαρίστηκαν με φυσικό τρόπο χάρη στη δράση των κυμάτων και των παλιρροιών. Συνολικά τα στερεά απόβλητα που συλλέχθηκαν ανήλθαν σε 9.200 τόνους.

Στην περιοχή του ατυχήματος υπήρχαν 15 εγκαταστάσεις καύσης οι οποίες δέχονταν στερεά απόβλητα. Μέχρι τις 19 Δεκεμβρίου 2007, 1.173 τόνοι αποβλήτων είχαν γίνει δεκτοί, το 20% των οποίων υπέστη καύση.

2.17. Interceptor

Στις 30 Μαΐου 2008, το δεξαμενόπλοιο “Interceptor”, το οποίο έφερε σημαία Παναμά, είχε προσεγγίσει εν μέσω δυσμενών καιρικών συνθηκών τη Σαλαμίνα προκειμένου να ανεφοδιαστεί με καύσιμα. Όμως, κατά τη διάρκεια της πετρέλευσης, ένα ατύχημα οδήγησε στη διαφυγή 10 τόνων πετρελαίου στη θάλασσα.

Η οργάνωση επιχειρήσεων αντιμετώπισης στη θάλασσα ήταν άμεση. Αναπτύχθηκαν φράγματα για τον περιορισμό του πετρελαίου και έγινε μηχανική ανάκτηση. Ως αποτέλεσμα των ενεργειών αυτών, συλλέχθηκαν 6 τόνοι υγρών αποβλήτων.

Από το ατύχημα του “Interceptor” προσβλήθηκε περίπου 1 km ακτογραμμής η οποία ήταν κυρίως αμμώδης. Στις ακτές οργανώθηκε επιχείρηση καθαρισμού κατά την οποία συγκεντρώθηκαν 2 τόνοι στερεών αποβλήτων.

2.18. Lebanon Conflict

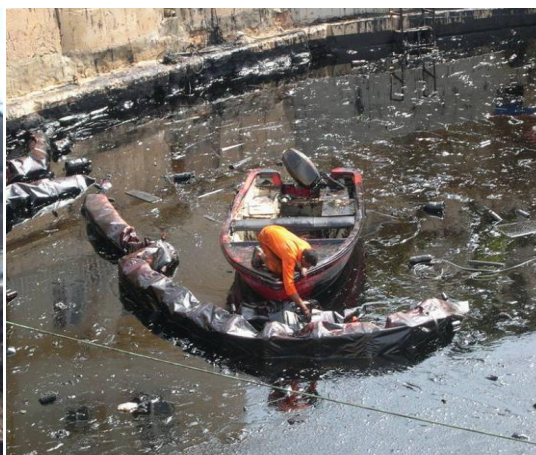
Στις 13 και στις 15 Ιουλίου 2006, το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας “Jyeh”, το οποίο εδρεύει ακριβώς πάνω στην ακτογραμμή του Λιβάνου (30 km νότια του “Beirut”) χτυπήθηκε από Ισραηλινές βόμβες. Μέρος του μαζούτ (HFO) κάηκε. Όμως, υπολογίζεται ότι περίπου 15.000 τόνοι άκαυστου καυσίμου πετρελαίου διέφυγαν στη θάλασσα και παρασύρθηκαν προς το βορά εξαιτίας των νοτιοδυτικών ανέμων που επικρατούσαν. Η ρύπανση προσέβαλε σχεδόν το μισό της ακτογραμμής των 200 km του Λιβάνου, επηρεάζοντας έτσι διάφορα υποστρώματα: άμμος, πέτρες, βράχια, λιμενικές εγκαταστάσεις.

Οι επιχειρήσεις αντιμετώπισης που έγιναν στη θάλασσα είχαν σαν αποτέλεσμα τη συλλογή 350 τόνων υγρών αποβλήτων. Μεγάλο πρόβλημα αποτέλεσε η μεγάλη ποσότητα μολυσμένων από το πετρέλαιο αποβλήτων που είχαν συγκεντρωθεί στις ακτές του Λιβάνου

και που δημιουργούσαν μεγάλη ποσότητα μολυσμένου εξοπλισμού. Υπολογίζεται ότι συγκεντρώθηκαν 3.980 τόνοι αποβλήτων.



Εικόνα 2.17.: Δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου στο εργοστάσιο “Jyeh” μετά τους βομβαρδισμούς (Πηγή: Le Floch Dépollution)



Εικόνα 2.18.: Πετρελαιοκηλίδα και μολυσμένα χαλάσματα «παγιδευμένα» σε λιμάνι (Πηγή: ΕΠΕ)

2.19. Mara A

Στις 17 Οκτωβρίου 2008, το εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carrier) “Mara A”, το οποίο έφερε σημαία Πορτογαλίας είχε προσεγγίσει τις εγκαταστάσεις «Ηρακλής» στο Αλιβέρι Εύβοιας, εν μέσω καλών καιρικών συνθηκών. Κατά τη διάρκεια της πετρέλευσης εκδηλώθηκε ένα ατύχημα το οποίο είχε ως αποτέλεσμα τη διαφυγή 3 τόνων μαζούτ (HFO) στη θάλασσα.

Από το ατύχημα του “Mara A” προσβλήθηκαν 3 km ακτογραμμής, η οποία περιελάμβανε αμμώδεις παραλίες, παραλίες με βότσαλα και βραχώδεις ακτές. Από τις επιχειρήσεις που διενεργήθηκαν στη θάλασσα επετεύχθη η συλλογή 16 τόνων υγρών αποβλήτων. Στις ακτές, ο καθαρισμός που έλαβε χώρα, είχε ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση 11 τόνων στερεών αποβλήτων.

2.20. Prestige

Την Τετάρτη 13 Νοεμβρίου 2002, το μονής γάστρας δεξαμενόπλοιο “Prestige”, το οποίο έφερε σημαία “Bahamas”, εξέπεμψε σήμα κινδύνου ενώ βρισκόταν στα ανοιχτά της περιοχής του ακρωτηρίου “Finisterre” (Γαλικία - Ισπανία). Το δεξαμενόπλοιο μετέφερε φορτίο 77.000 τόνων μαζούτ (Heavy Fuel Oil – HFO), το οποίο είχε φορτώσει στην Αγία Πετρούπολη (Ρωσία) και στο “Ventspils” (Λετονία), και κατευθυνόταν στη Σιγκαπούρη μέσω του Γιβραλτάρ. Το πλοίο εμφάνισε μια κλίση 30 μοιρών προς τα δεξιά ενώ βρισκόταν εν μέσω τρικυμίας και πολύ ισχυρών ανέμων και κατά συνέπεια ζήτησε μερική εκκένωση του πλοίου. Τα εικοσιτέσσερα από τα είκοσι επτά μέλη του πληρώματος εγκατέλειψαν το πλοίο μέσω ελικοπτερου, ενώ ο καπετάνιος, ο υπό-πλοίαρχος και ο πρώτος μηχανικός έμειναν στο πλοίο. Η μηχανή είχε υποστεί βλάβη και το πλοίο ήταν πλέον ακυβέρνητο και παρασυρόταν ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Η από αέρος επιθεώρηση ανέδειξε μια πετρελαιοκηλίδα στη θάλασσα.

Όλη τη νύχτα, τέσσερα ρυμουλκά της SASEMAR (Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima) του ισπανικού οργανισμού που ήταν υπεύθυνος για τη διάσωση στη θάλασσα και τον έλεγχο της ρύπανσης, προσπαθούσαν να ρυμουλκήσουν το δεξαμενόπλοιο. Όμως, το

σύστημα ρυμούλκησης έκτακτης ανάγκης του “Prestige” δε λειτουργούσε και έτσι όλες οι προσπάθειες απέτυχαν. Τελικά, ένα ρυμουλκό πλοίο από την εταιρεία διάσωσης “Smit” κατάφερε να ρυμουλκήσει το “Prestige” στις 14 Νοεμβρίου. Όλη την ημέρα ρυμουλκούνταν προς τα βόρεια/βορειοδυτικά και στη συνέχεια προς τα νότια. Στις 15 Νοεμβρίου, υπέστη ρήγμα άνω των 35 μέτρων στη δεξιά πλευρά και στις 16 Νοεμβρίου άρχισε να ρυμουλκείται προς τα νοτιοδυτικά προκειμένου να αποφύγει τα Πορτογαλικά ύδατα.

Στις 19 Νοεμβρίου στις 9 πμ, το πλοίο έσπασε σε δύο μέρη, σε απόσταση 130 ναυτικών μιλίων (250 km) από τις ισπανικές ακτές (δυτικά / νοτιοδυτικά του ακρωτηρίου “Finistere”). Στις 12 μμ, το πρυμναίο κομμάτι του “Prestige” βυθίστηκε σε βάθος 3500 μέτρων. Το πρωμαίο κομμάτι ακολούθησε στις 4 μμ.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της πετρελαιοκηλίδας ήταν η γήρανση του πετρελαίου το οποίο παρέμεινε στη θάλασσα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η πετρελαιοκηλίδα που προκλήθηκε ήταν «μοναδική» από πολλές απόψεις. Αρχικά, όσον αφορά την κίνηση της αφού ήταν η πρώτη φορά που μια πετρελαιοκηλίδα κατάφερε να μολύνει 6 χώρες. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στην επιλογή των μεθόδων και των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας τόσο στη θάλασσα όσο και στην ακτή, έπαιξε η διαδικασία διάλυσης της πετρελαιοκηλίδας.

Υπολογίζεται ότι από τους 77.000 τόνους μαζούτ που μετέφερε το “Prestige”, οι 64.000 διέφυγαν στη θάλασσα. Η επιχείρηση αντιμετώπισης που οργανώθηκε ήταν πιθανότατα η μεγαλύτερη του είδους που είχε οργανωθεί ως τότε. Στα χωρικά ύδατα της Ισπανίας συλλέχθηκαν 50.000 τόνοι υγρών αποβλήτων. Επειδή κάποια ποσότητα πετρελαίου πέρασε και στα χωρικά ύδατα της Γαλλίας της επιχείρησης επιλήφθηκαν οι γαλλικές αρχές από εκείνο το σημείο. Από την επιχείρηση αντιμετώπισης στις θάλασσες της Γαλλίας συγκεντρώθηκαν 2.000 τόνοι υγρών αποβλήτων.

Από το ατύχημα του “Prestige” προσβλήθηκαν 1.300 km ακτογραμμής. Οι επιχειρήσεις καθαρισμού των ακτών που οργανώθηκαν τόσο στην Ισπανία όσο και στη Γαλλία ήταν πρωτόγνωρες. Από τις ακτές της Ισπανίας συλλέχθηκαν 63.000 τόνοι στερεών αποβλήτων. Στη νοτιοδυτική περιοχή της Γαλλίας συγκεντρώθηκαν 18000 τόνοι στερεών αποβλήτων και στη δυτική περιοχή της Γαλλίας συγκεντρώθηκαν 15267 τόνοι στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.19.: Το “Prestige” βυθίζεται (Πηγή: BSAM / Douanes françaises)

2.21. Riga Sailor

Στις 9 Μαρτίου 2006, το πλοίο γενικού φορτίου “Riga Sailor”, το οποίο έφερε σημαία Μάλτας, συγκρούστηκε με τον προβλήτα στο λιμάνι της Μήλου. Από τη σύγκρουση αυτή διέφυγαν στη θάλασσα περίπου 180 τόνοι μαζούτ (HFO) και παρατηρήθηκε πετρελαιοκηλίδα 350 m².

Κατά την επιχείρηση αντιμετώπισης που οργανώθηκε στη θάλασσα, συλλέχθηκαν 220 τόνοι υγρών αποβλήτων. Επιπλέον, από το ατύχημα του “Riga Sailor” προσβλήθηκαν 2 km ακτογραμμής τα οποία αποτελούνταν κυρίως από αμμώδεις και βραχώδεις ακτές. Από την επιχείρηση καθαρισμού των εν λόγω ακτών, συγκεντρώθηκαν 210 τόνοι στερεών αποβλήτων.

2.22. Rose G

Στις 26 Ιανουαρίου 2009, το δεξαμενόπλοιο “Rose G”, το οποίο έφερε ιταλική σημαία είχε προσεγγίσει την Ελευσίνα για ανεφοδιασμό όταν η αστοχία ενός αγωγού κατά τη διάρκεια της πετρέλευσης προκάλεσε τη διαφυγή 11 τόνων πετρελαίου (diesel oil) στη θάλασσα.

Στην περιοχή επικρατούσαν καλές καιρικές συνθήκες και από το πετρέλαιο που διέφυγε προσβλήθηκε περίπου 1 km ακτογραμμής η οποία αποτελούνταν κυρίως από αμμώδεις παραλίες. Για την αντιμετώπιση της ρύπανσης οργανώθηκε επιχείρηση τόσο στη θάλασσα όσο και στην ακτή. Συνολικά, συλλέχθηκαν 8 τόνοι υγρών αποβλήτων και 3 τόνοι στερεών αποβλήτων.

2.23. Sea Diamond

Στις 5 Απριλίου 2007, το κρουαζιερόπλοιο “Sea Diamond”, το οποίο έφερε ελληνική σημαία, προσάραξε σε ένα χαρτογραφημένο ηφαιστειακό ύφαλο ανατολικά της «Νέας Καμένης» και εντός της καλντέρας της Σαντορίνης. Το πλοίο άρχισε να βάζει νερά και ανέπτυξε κλίση προς τα δεξιά, η οποία έφτασε μέχρι και τις 12 μοίρες. Αρχικά αναφέρθηκε ότι οι 1.195 επιβάτες εκκένωσαν το πλοίο μέσα σε περίπου τέσσερις ώρες. Στη συνέχεια το πλοίο ρυμουλκήθηκε μακριά από τα βράχια και η κλίση του σταθεροποιήθηκε. Αργότερα, αναφέρθηκε ότι δύο από τους επιβάτες του αγνοούνταν.

Ο μεγάλος όγκος υδάτων που είχαν εισχωρήσει στο πλοίο, προκάλεσε τη βύθιση του λίγο πριν τις 7 πμ στις 6 Απριλίου 2007 περίπου 1 km από την ακτή. Μετά τη βύθιση του, η πλώρη του πλοίου βρέθηκε στα 62 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η πρύμνη του βρέθηκε στα 180 μέτρα κάτω από τη θάλασσα.

Από το ατύχημα του “Sea Diamond” διέφυγαν στη θάλασσα 486 τόνοι πετρελαίου οι οποίοι προκάλεσαν τη μόλυνση 5 km ακτογραμμής περίπου. Οι ακτές που προσβλήθηκαν ήταν κυρίως βραχώδεις και παραλίες με βότσαλα αλλά υπήρχαν και λιγοστές αμμώδεις παραλίες.

Η επιχείρηση που οργανώθηκε για την αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκλήθηκε από το ατύχημα του “Sea Diamond” ήταν η μεγαλύτερη αυτού του είδους που είχε οργανωθεί στην Ελλάδα μέχρι εκείνη τη στιγμή. Στη θάλασσα, χρησιμοποιήθηκαν αντιρρυπαντικά σκάφη, ρυμουλκά, δεξαμενόπλοιο, ενώ έγινε και ανάπτυξη πλωτών φραγμάτων και χρήση απορροφητικών υλικών. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω ενεργειών, συγκεντρώθηκαν 550 τόνοι υγρών αποβλήτων.

Στη συνέχεια, έγινε καθαρισμός των ακτών είτε με μηχανικά μέσα είτε χειρονακτικά, ενώ έγινε και πλύση υψηλής πίεσης σε βραχώδεις ακτές. Από τον καθαρισμό αυτό συλλέχθηκαν 225 τόνοι στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 2.20.: Η κλίση που εμφάνισε το “Sea Diamond” λίγο πριν τη βύθιση του (πηγή: ΕΠΕ)

2.24. Sea Empress

Το απόγευμα της 15^{ης} Φεβρουαρίου 1996, το λιβεριανής σημαίας δεξαμενόπλοιο “Sea Empress”, ενώ κατευθυνόταν προς το διωλιστήριο της Texaco στο “Milford Haven” φέροντας φορτίο 130.824 τόνων ελαφρού αργού πετρελαίου, προσάραξε σε βράχια κατά την είσοδο του στην παραλία του “Milford Haven” (στην περιοχή αυτή εδρεύουν αρκετά διωλιστήρια). Το ατύχημα του “Sea Empress” ήταν το δεύτερο που συνέβη στην ίδια περιοχή σε διάστημα 5 μηνών (το προηγούμενο ήταν αυτό του “Borga” στις 25 Οκτωβρίου 1995). Σύμφωνα με τους ειδικούς, αιτία αυτού του ατυχήματος ήταν η κακή εκτίμηση των ρευμάτων παλίρροιας και η διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ του καπετάνιου και του λιμεναρχείου.

Οι προσπάθειες που έγιναν προκειμένου να επαναπλεύσει το πλοίο, προκάλεσαν και άλλες προσαράξεις του πλοίου, με συνέπεια τη διαφυγή περίπου 73.000 τόνων πετρελαίου κατά τη διάρκεια της εβδομάδας που ακολούθησε. Κατά το διάστημα 23 Φεβρουαρίου – 4 Μαρτίου έγινε διενέργεια τεσσάρων επιχειρήσεων μεταφοράς φορτίου με αποτέλεσμα την ανάκτηση 58.000 τόνων πετρελαίου περίπου.

Για την αντιμετώπιση της πετρελαιοκηλίδας στη θάλασσα χρησιμοποιήθηκαν δύο στρατηγικές: ο ψεκασμός χημικών διασκορπιστικών από αέρος και ο περιορισμός του πετρελαίου στη θάλασσα. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω ενεργειών, συλλέχθηκαν 8.500 τόνοι υγρών αποβλήτων. Τα υγρά απόβλητα μεταφέρθηκαν στο διωλιστήριο της “Texaco” στο “Pembroke” προκειμένου να υποστούν διαχωρισμό με βαρύτητα.

Από το ατύχημα του “Sea Empress” προκλήθηκε ρύπανση σε 200 km ακτογραμμής. Κατά συνέπεια, οργανώθηκε καθαρισμός των ακτών ο οποίος είχε ως αποτέλεσμα τη συλλογή 3.000 τόνων στερεών αποβλήτων. Τα στερεά απόβλητα μεταφέρθηκαν αρχικά και αυτά στο

διωλιστήριο της “Texaco” προκειμένου να υποστούν επεξεργασία πριν χρησιμοποιηθούν σε αγροκαλλιέργειες (land farming) ή πριν διατεθούν μέσω υγειονομικής ταφής.

Τελικά, από τους 73.000 τόνους πετρελαίου που διέφυγαν στο περιβάλλον, εκτιμάται ότι:

- Το 35 – 40% εξατμίστηκε
- Το 10 – 20% διασκορπίστηκε με φυσικό τρόπο
- Το 6% περισυλλέχθηκε από τη θάλασσα
- Το 3 – 5% περισυλλέχθηκε στη στεριά
- Το 13% διασκορπίστηκε με τη χρήση χημικών
- Το 20% μπορεί να θάφτηκε ή να παγιδευτεί



Εικόνα 2.21.: Το θαλάσσιο «σκοπίσμα» (Πηγή: Cedre)



Εικόνα 2.22.: Μολυσμένη από το πετρέλαιο ακτή στο “Freshwater West Bay” (Πηγή: Cedre)

2.25. Selendang Ayu

Στις 7 Δεκεμβρίου 2004, το εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου (“bulk carrier”) “Selendang Ayu”, ενώ μετέφερε σόγια και διέθετε 1.600 τόνους μαζούτ (HFO) στις δεξαμενές του, υπέστη ζημιά στη μηχανή του εν μέσω καταιγίδας και προσάραξε στο νησί “Unalaska” στα νησιά “Aleutian” που βρίσκονται στην Αλάσκα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.

Από τους 1.600 τόνους καυσίμων που διέθετε το “Selendang Ayu”, στη θάλασσα διέφυγαν 1.203 τόνοι. Όμως, η διενέργεια επιχειρήσεων αντιμετώπισης της ρύπανσης στη θάλασσα ήταν αδύνατη εξαιτίας των ιδιαίτερα δύσκολων καιρικών συνθηκών. Κατά συνέπεια, οι επιχειρήσεις αντιμετώπισης της ρύπανσης επικεντρώθηκαν στον καθαρισμό των ακτών.

Από το ατύχημα του “Selendang Ayu” μολύνθηκαν 110 km ακτογραμμής η οποία ήταν κυρίως βραχώδης. Ο καθαρισμός των ακτών είχε ως αποτέλεσμα τη συλλογή 2.500 τόνων στερεών αποβλήτων.

2.26. Tanio

Το πρωί της 7^{ης} Μαρτίου 1980, το δεξαμενόπλοιο “Tanio”, το οποίο έφερε σημαία Παναμά, ενώ βρισκόταν στα ανοιχτά του “Finistere” (“Britanny”-Γαλλία), εξέπεμψε σήμα κινδύνου. Το “Tanio” έφερε φορτίο 26.000 τόνων μαζούτ (HFO No 6) και 900 τόνους bunker fuel oil

και έφευγε από το στενό μεταξύ Γαλλίας και Μεγάλης Βρετανίας όταν μια ισχυρότατη καταιγίδα προκάλεσε τη θραύση του δεξαμενόπλοιου σε δύο μέρη. Κατά συνέπεια, 6.000 τόνοι διέφυγαν στη θάλασσα.

Το υψηλό ιξώδες του πετρελαίου που διέφυγε σε συνδυασμό με τις άσχημες καιρικές συνθήκες δεν επέτρεψε ούτε τη χρήση χημικών διασκορπιστικών, ούτε τον περιορισμό και την ανάκτηση του πετρελαίου από τη θάλασσα.

Υπολογίζεται ότι η συνολική ποσότητα πετρελαίου που έφτασε στις ακτές ήταν περίπου 400 τόνοι και κατάφερε να προκαλέσει ρύπανση σε 150 km ακτογραμμής. Οι ακτές που προσβλήθηκαν ήταν κυρίως αμμώδεις παραλίες ενώ υπήρχαν και κάποιες βραχώδεις ακτές. Συνολικά, συγκεντρώθηκαν 80.000 τόνοι στερεών αποβλήτων ως αποτέλεσμα του καθαρισμού των ακτών.

2.27. Tasman Spirit

Στις 27 Ιουλίου 2003, το δεξαμενόπλοιο “Tasman Spirit”, φορτωμένο με 67.000 τόνους αργού πετρελαίου από το Ιράν, προσάραξε κατά την είσοδο του στο λιμάνι του “Karachi” (Πακιστάν). Η γάστρα του πλοίου τρύπησε και περίπου 27.000 τόνοι αργού πετρελαίου διέφυγαν στη θάλασσα. Η επιχείρηση μεταφοράς του πετρελαίου στις 13 Αυγούστου είχε ως αποτέλεσμα την ανάκτηση 13.000 τόνων πετρελαίου. Όμως, στη συνέχεια, οι κακές μετεωρολογικές συνθήκες που επικράτησαν διέκοψαν την εξέλιξη των εργασιών και το σκάφος έσπασε σε δύο μέρη (το σκάφος έσπασε στις 22 Αυγούστου και μέχρι τις 18 είχαν μεταφερθεί 25.000 τόνοι πετρελαίου ενώ στο σκάφος παρέμεναν ακόμη 14.000 τόνοι πετρελαίου).

Το πετρέλαιο που παρασυρόταν προς το λιμάνι του “Karachi”, περιορίστηκε με τη χρήση φραγμάτων και συνολικά ανακτήθηκαν από τη θάλασσα περίπου 140 τόνοι υγρών αποβλήτων.

Στη συνέχεια, η ρύπανση έφτασε στην παραλία “Clifton” (δίπλα στο “Karachi”), όπου εκτιμήθηκε ότι μια ποσότητα 300 m³ κάλυψε ακτογραμμή μήκους 6 km. Από τις ακτές περισυλλέχθηκαν 2.500 τόνοι στερεών αποβλήτων (κυρίως μολυσμένη άμμος).

2.28. Θεόφιλος

Στις 28 Ιουνίου 2008, το ελληνικό Ε/Γ-Ο/Γ «Θεόφιλος» προσέκρουσε σε ύφαλο στις Οινούσες εν μέσω ισχυρών ανέμων (7 Beaufort). Το αποτέλεσμα ήταν η διαφυγή 1,5 τόνων καύσιμου πετρελαίου στη θάλασσα.

Από το ατύχημα του «Θεόφιλος» προκλήθηκε ρύπανση σε 4 km ακτογραμμής. Μεταξύ των ακτών που προσβλήθηκαν υπήρχαν αμμώδεις παραλίες, παραλίες με βότσαλα και βραχώδεις ακτές. Από τις επιχειρήσεις καθαρισμού που έλαβαν χώρα σε θάλασσα και ακτές συλλέχθηκαν 1,1 τόνοι υγρών αποβλήτων και 1,2 τόνοι στερεών αποβλήτων.

2.29. Μυρτιδιώτισσα

Στις 25 Ιουλίου 2008, το ελληνικό Ε/Γ-Ο/Γ «Μυρτιδιώτισσα» υπέστη βλάβη και προσάραξε, εν μέσω δυνατών ανέμων, κατά την είσοδο του στο λιμάνι των Κυθήρων. Από

την προσάραξη διέφυγαν 60 τόνοι πετρελαίου (diesel oil) οι οποίοι προκάλεσαν ρύπανση σε 1 km ακτογραμμής.

Στη θάλασσα οργανώθηκε επιχείρηση αντιμετώπισης η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη συλλογή 100 τόνων υγρών αποβλήτων. Επίσης, συγκεντρώθηκαν και 6 τόνοι στερεών αποβλήτων, οι οποίοι αποτελούνταν κυρίως από απορροφητικά υλικά αφού οι ακτές που προσβλήθηκαν ήταν κυρίως βραχώδεις.

2.30. Παναγιώτης Π.

Στις 25 Οκτωβρίου 2008, το ελληνικό δεξαμενόπλοιο «Παναγιώτης Π.» απέπλεε από το νότιο τμήμα του λιμανιού της Ερμούπολης της Σύρου. Κατά τη διάρκεια των χειρισμών του απόπλου του, παρέσυρε με την άγκυρα του υποθαλάσσιο αγωγό τεχνητής νησίδας των εγκαταστάσεων ξηράς «ΣΕΚABIN Α.Ε.» με αποτέλεσμα τη θραύση αυτού και τη διαρροή 34 τόνων μαζούτ στη θάλασσα. Εκείνη τη στιγμή στην περιοχή επικρατούσαν άνεμοι εντάσεως 6 Beaufort.

Άμεσα έσπευσε στην περιοχή για παροχή βοήθειας, απορρυπαντικό σκάφος του Λιμενικού Σώματος, με τη συνδρομή του οποίου τοποθετήθηκε πλωτό φράγμα γύρω από την πετρελαιοκηλίδα με αποτέλεσμα τη συλλογή 22 τόνων υγρών αποβλήτων.

Επιπλέον, από το πετρέλαιο που διέφυγε προκλήθηκε ρύπανση σε 1 km ακτογραμμής η οποία χαρακτηριζόταν από παραλίες με βότσαλα και βραχώδεις ακτές. Από τον καθαρισμό των ακτών, συγκεντρώθηκαν 13 τόνοι στερεών αποβλήτων (κυρίως απορροφητικά υλικά και βότσαλα).

Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση μαθηματικών μεθόδων

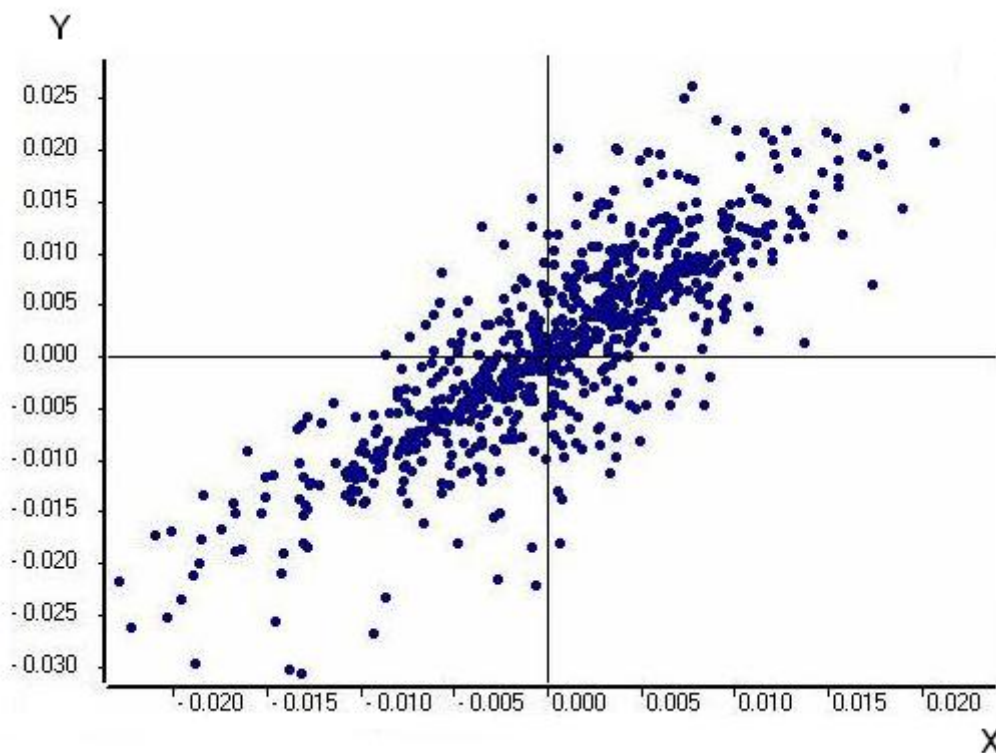
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η θεωρία των μαθηματικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Αρχικά, παρατίθεται η θεωρία της στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης και στη συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρία της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.

3.1. Στατιστική γραμμική παλινδρόμηση (απλή και πολλαπλή)

3.1.1. Εισαγωγή στη στατιστική γραμμική παλινδρόμηση

Η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression analysis) είναι μια στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της σχέσης που συνδέει δύο ή περισσότερες μεταβλητές. Οι εφαρμογές αυτής της τεχνικής είναι πολλές και αφορούν πολλούς τομείς όπως είναι αυτός της μηχανικής, των φυσικών, χημικών και βιολογικών επιστημών, των οικονομικών και κοινωνικών επιστημών κ.ά.

Στο πλαίσιο αυτής της ανάλυσης, αρχικά κατασκευάζεται ένα διάγραμμα το οποίο καλείται “scatter diagram” (Σχήμα 3.1.). Από αυτό το διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί μια σχέση, η οποία θα συνδέει τις μεταβλητές που περιλαμβάνονται σε αυτό.



Σχήμα 3.1. “Scatter diagram” για την γραφική αναπαράσταση δύο μεταβλητών.

Συνήθως, οι μεταβλητές αυτές «πέφτουν» πάνω, αλλά όχι ακριβώς, σε μια ευθεία γραμμή.

Αν θεωρήσουμε y την εξαρτημένη μεταβλητή και x την ανεξάρτητη μεταβλητή, τότε η εξίσωση της ευθείας γραμμής που συνδέει τις δύο μεταβλητές, είναι η ακόλουθη:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad 3.1$$

Όπου, β_0 : είναι το σημείο τομής

β_1 : η κλίση

Όμως, τα σημεία των δεδομένων δεν «πέφτουν» ακριβώς πάνω σε μια ευθεία γραμμή και κατά συνέπεια, η εξίσωση (3.1) θα πρέπει να διαφοροποιηθεί κατά τρόπο τέτοιο ώστε να ληφθεί υπ' όψιν η παραπάνω παρατήρηση.

Έστω ότι η διαφορά μεταξύ της τιμής y που παρατηρήθηκε και της ευθείας γραμμής $\beta_0 + \beta_1 \cdot x$ είναι ένα σφάλμα ε . Είναι βολικό να θεωρήσουμε ότι το ε είναι ένα στατιστικό σφάλμα, δηλαδή μια τυχαία μεταβλητή η οποία αντιπροσωπεύει την αδυναμία του μοντέλου να ταιριάζει απόλυτα τα δεδομένα. Αυτό το σφάλμα μπορεί να δημιουργηθεί εξαιτίας της επιρροής που ασκούν άλλες παράμετροι, σφάλματα μέτρησης κ.ά. στην ανεξάρτητη μεταβλητή.

Οπότε, ένα λογικό μοντέλο για την ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το εξής:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \varepsilon \quad 3.2$$

Η παραπάνω εξίσωση καλείται μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Η μεταβλητή X θα αποκαλείται «ανεξάρτητη μεταβλητή» (regressor), υπό την έννοια ότι μπορούμε να καθορίζουμε την τιμή της, ενώ η μεταβλητή Y θα αποκαλείται εξαρτημένη μεταβλητή (response), δηλαδή θα εξαρτάται από την τιμή της μεταβλητής X .

Επειδή η εξίσωση (3.2) περιέχει μόνο μια “regressor” μεταβλητή, καλείται μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Έστω ότι μπορούμε να «φτιάξουμε» την τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής X και να παρατηρήσουμε την αντίστοιχη τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής Y . Σε αυτή την περίπτωση, το τυχαίο στοιχείο ε θα καθορίζει τις ιδιότητες του Y . Επιπλέον, ας υποθέσουμε ότι η μέση τιμή και η διασπορά του ε είναι 0 και σ^2 αντίστοιχα. Τότε η μέση τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής σε οποιαδήποτε τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής, είναι:

$$E y|x = \mu_{y|x} = E \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \varepsilon = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad 3.3.a$$

(δηλαδή η ίδια σχέση που παρατηρήσαμε να προκύπτει από το “scatter diagram”)

Η διασπορά του y δεδομένης μιας τιμής του x , είναι:

$$Var y|x = \sigma_{y|x}^2 = Var \beta_0 + \beta_1 \cdot x = \sigma^2 \quad 3.3.b$$

Έτσι, το πραγματικό μοντέλο παλινδρόμησης $\mu_{y|x} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$, είναι μια γραμμή μέσων τιμών, δηλαδή το ύψος της γραμμής παλινδρόμησης σε οποιαδήποτε τιμή του x είναι η αναμενόμενη τιμή του y για αυτό το x .

Οι παράμετροι β_0 και β_1 καλούνται συνήθως «συντελεστές παλινδρόμησης». Αυτοί οι συντελεστές έχουν μια απλή και συχνά χρήσιμη ερμηνεία. Η κλίση β_1 , είναι η αλλαγή στη μέση τιμή της κατανομής του y που παράγεται από μια μεταβολή μονάδας του x . Αν στο εύρος των δεδομένων του x συμπεριλαμβάνεται το $x=0$, τότε το σημείο τομής β_0 είναι το μέσο της κατανομής του y όταν το $x=0$. Αν το εύρος του x δε συμπεριλαμβάνει το 0, τότε το β_0 δεν έχει πρακτικά ερμηνεία.

Επιπλέον, η μεταβλητότητα του y για μια συγκεκριμένη τιμή του x , καθορίζεται από τη διασπορά του στοιχείου σφάλματος του μοντέλου σ^2 . Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια κατανομή των τιμών του y για κάθε x και ότι η διασπορά αυτής της κατανομής είναι η ίδια για κάθε x .

Γενικά, η εξαρτημένη (“response”) μεταβλητή y , μπορεί να συσχετιστεί με k ανεξάρτητες (“regressor”) μεταβλητές, x_1, x_2, \dots, x_k έτσι ώστε να ισχύει η σχέση:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon \quad 3.4$$

Η σχέση αυτή καλείται «μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης» επειδή συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν περισσότερες της μιας ανεξάρτητες μεταβλητές.

Το επίθετο «γραμμική» χρησιμοποιείται προκειμένου να δείξουμε ότι το μοντέλο είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ και όχι επειδή το y είναι γραμμική συνάρτηση των x . Σε πολλά μοντέλα, είναι δυνατόν το y να συσχετίζεται με το x με μη γραμμικό τρόπο και το μοντέλο να θεωρείται σαν μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, εφόσον η εξίσωση είναι γραμμική ως προς τα β .

Ένας σημαντικός στόχος της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης είναι η εκτίμηση των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία καλείται και προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. υπάρχουν αρκετές τεχνικές εκτίμησης παραμέτρων μια εκ των οποίων είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

3.1.2. Εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων

Οι παράμετροι β_0 και β_1 είναι άγνωστες και πρέπει να εκτιμηθούν μέσω ενός συνόλου δεδομένων, έστω ότι έχουμε n ζεύγη δεδομένων $(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_n, x_n)$.

Εκτίμηση των β_0 και β_1

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των β_0 και β_1 . Δηλαδή, θα εκτιμήσουμε τα β_0 και β_1 έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των παρατηρήσεων y_i και της ευθείας γραμμής να είναι ελάχιστη

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 3.5$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα “sample regression model” γραμμμένο με όρους n ζευγών δεδομένων (y_i, x_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), σε αντίθεση με την εξίσωση (3.2) που λογίζεται ως “population regression model”.

Έτσι, το κριτήριο των ελαχίστων τετραγώνων είναι το ακόλουθο:

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad 3.6$$

Οι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων του β_0 και του β_1 , έστω β_0^* και β_1^* , πρέπει να ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0^*, \beta_1^*} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0^* - \beta_1^* x_i) = 0$$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_1} \right|_{\beta_0^*, \beta_1^*} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0^* - \beta_1^* x_i) x_i = 0$$

Απλοποιώντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις, έχουμε:

$$n\beta_0^* + \beta_1^* \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i$$

3.7

$$\beta_0^* \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1^* \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i$$

Οι εξισώσεις (3.7) καλούνται κανονικές εξισώσεις ελαχίστων τετραγώνων. Η λύση σε αυτές τις κανονικές εξισώσεις είναι η ακόλουθη:

$$\beta_0^* = \bar{y} - \beta_1^* \bar{x}$$

3.8

$$\beta_1^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}$$

όπου $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ και $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ είναι η μέση τιμή των y_i και x_i αντίστοιχα. Οπότε, τα

β_0^* και β_1^* των εξισώσεων (3.7) και (3.8) είναι οι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων του σημείου τομής και της κλίσης αντίστοιχα. Έτσι, το προσαρμοσμένο μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι το ακόλουθο:

$$y^* = \beta_0^* + \beta_1^* x \quad 3.9$$

Οι ποσότητες που περιλαμβάνονται στις σχέσεις (3.8) και που δίνουν τα β_0^* , β_1^* μπορούν να γραφτούν ως:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad 3.10$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) \quad 3.11$$

$$\text{Οπότε, είναι: } \beta_1^* = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad 3.12$$

Η διαφορά μεταξύ της τιμής y_i που παρατηρείται και της αντίστοιχης προσαρμοσμένης τιμής y_i^* είναι ένα υπόλοιπο. Με μαθηματικούς όρους, το i -στό κατάλοιπο ισούται με:

$$e_i = y_i - y_i^* = y_i - \beta_0^* - \beta_1^* x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 3.13$$

Τα υπόλοιπα παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη διερεύνηση της ακρίβειας του μοντέλου και στον έλεγχο της απόκλισης από τις υποθέσεις. Το ζήτημα των υπολοίπων θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

3.1.3. Εκτίμηση του σ^2

Εκτός από την εκτίμηση των β_0 και β_1 , απαιτείται και μια εκτίμηση του σ^2 για τον έλεγχο των υποθέσεων και την κατασκευή ενδιάμεσων εκτιμήσεων που να είναι σχετικές με το μοντέλο παλινδρόμησης. Ο ιδανικός στόχος θα ήταν η εκτίμηση αυτή να μην εξαρτάται από την ακρίβεια του προσαρμοσμένου μοντέλου. Αυτό είναι εφικτό μόνο όταν υπάρχουν αρκετές εκτιμήσεις του y για τουλάχιστον μια τιμή του x , ή όταν έχουμε πρότερη πληροφόρηση για το σ^2 .

Όταν αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, η εκτίμηση του σ^2 αποκτάται από τα υπόλοιπα ή από το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων.

$$SS_{RES} = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 \quad 3.14$$

Αν στην παραπάνω σχέση θέσουμε $y_i^* = \beta_0^* + \beta_1^* x_i$, τότε θα λάβουμε την ακόλουθη απλοποιημένη μορφή:

$$SS_{RES} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2 - \beta_1^* S_{XY} \quad 3.15$$

Όμως είναι:

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \equiv SS_T \quad 3.16$$

Οπότε, η σχέση (3.15) γίνεται:

$$SS_{RES} = SS_T - \beta_1^* S_{XY} \quad 3.17$$

Το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων έχει n-2 βαθμούς ελευθερίας, επειδή δύο βαθμοί ελευθερίας σχετίζονται με τις εκτιμήσεις β_0^* και β_1^* που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του y_i^* .

Ένας «αμερόληπτος» εκτιμητής του σ^2 είναι:

$$\sigma^{*2} = \frac{SS_{RES}}{n-2} = MS_{RES} \quad 3.18$$

Η τετραγωνική ρίζα του σ^{*2} καλείται μερικές φορές «τυπικό σφάλμα της παλινδρόμησης» και έχει τις ίδιες μονάδες με την εξαρτημένη μεταβλητή y. Επειδή το σ^{*2} εξαρτάται από το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων, οποιαδήποτε αθέτηση των υποθέσεων του μοντέλου σχετικά με τα σφάλματα του μοντέλου ή λάθος μορφή του μοντέλου, μπορεί να βλάψουν σοβαρά την χρησιμότητα του σ^{*2} σαν εκτίμηση του σ^2 . Επειδή το σ^{*2} υπολογίζεται από τα υπόλοιπα του μοντέλου παλινδρόμησης, λέμε ότι είναι μια εκτίμηση του σ^2 που εξαρτάται από το μοντέλο.

3.1.4. Ανάλυση της διακύμανσης

Προκειμένου να ελεγχθεί η σημασία της παλινδρόμησης μπορεί επίσης να γίνει μια ανάλυση διακύμανσης. Η ανάλυση της διακύμανσης βασίζεται στον διαχωρισμό της συνολικής διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής. Προκειμένου να επιτύχουμε αυτόν τον διαχωρισμό, θα πρέπει να ξεκινήσουμε με την ταυτότητα:

$$y_i - \bar{y} = y_i^* - \bar{y} + y_i - y_i^* \quad 3.19$$

Τετραγωνίζοντας και τα δύο μέλη της παραπάνω εξίσωσης και αθροίζοντας όλες τις n παρατηρήσεις, έχουμε:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 + 2 \sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y})(y_i - y_i^*)$$

Ο τελευταίος όρος του δεξιού μέλους, μπορεί να γραφτεί:

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y})(y_i - y_i^*) &= 2 \sum_{i=1}^n y_i^* (y_i - y_i^*) - 2\bar{y} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*) \\ &= 2 \sum_{i=1}^n y_i^* e_i - 2\bar{y} \sum_{i=1}^n e_i = 0 \end{aligned}$$

Αφού το άθροισμα των υπολοίπων είναι πάντα 0 και το άθροισμα των υπολοίπων σταθμισμένων από την αντίστοιχη προσαρμοσμένη τιμή y_i^* είναι επίσης 0.

$$\text{Οπότε, } \sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}^2 = \sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}^2 + \sum_{i=1}^n y_i - y_i^{*2} \quad 3.20$$

Το αριστερό μέλος της παραπάνω εξίσωσης είναι το διορθωμένο άθροισμα των τετραγώνων των παρατηρήσεων, SS_T , το οποίο μετρά τη συνολική διασπορά των παρατηρήσεων. Τα δύο στοιχεία του SS_T μετράνε, αντίστοιχα, το ποσό της διασποράς στις παρατηρήσεις y_i που υπολογίστηκαν από τη γραμμή παλινδρόμησης και τη διασπορά των υπολοίπων που δεν εξηγείται από την γραμμή της παλινδρόμησης. Είναι σύνηθες να καλούμε

το $SS_R = \sum_{i=1}^n y_i^* - \bar{y}^2$ ως το άθροισμα τετραγώνων του μοντέλου ή της παλινδρόμησης.

Οπότε, με βάση τα παραπάνω, είναι:

$$SS_T = SS_R + SS_{RES} \quad 3.21$$

Έτσι, το άθροισμα των τετραγώνων παλινδρόμησης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$SS_R = \beta_1^* S_{XY} \quad 3.22$$

3.1.5. Συντελεστής προσδιορισμού R^2

Η ποσότητα

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_{RES}}{SS_T} \quad 3.23$$

καλείται συντελεστής προσδιορισμού. Το R^2 ονομάζεται και λόγος διακύμανσης.

Επειδή είναι $0 \leq SS_{RES} \leq SS_T$, θα είναι και $0 \leq R^2 \leq 1$. Οι τιμές του R^2 που είναι κοντά στο 1 υποδηλώνουν ότι η περισσότερη από την διακύμανση του y εξηγείται από το μοντέλο παλινδρόμησης.

Η στατιστική μεταβλητή R^2 θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, αφού υπάρχει πάντα η πιθανότητα το R^2 να γίνει μεγάλο προσθέτοντας αρκετούς όρους στο μοντέλο. Για παράδειγμα, αν δεν υπάρχουν επαναλαμβανόμενα σημεία (περισσότερες από μια τιμές του y για το ίδιο x), ένα πολυώνυμο βαθμού $n-1$ θα ταιριάζει απόλυτα ($R^2=1$) με n σημεία δεδομένων. Όταν υπάρχουν επαναλαμβανόμενα σημεία, το R^2 δεν μπορεί ποτέ να είναι ακριβώς ίσο με το 1 επειδή το μοντέλο δεν μπορεί να εξηγήσει την διακύμανση που σχετίζεται με «καθαρό» σφάλμα.

Προφανώς, η αναμενόμενη τιμή του R^2 θα αυξάνεται (μειώνεται) όσο το S_{xx} (μέτρο της διάδοσης των x) αυξάνεται (μειώνεται). Έτσι, μια μεγάλη τιμή του R^2 μπορεί να προκύψει απλά επειδή το x ποικίλει πάνω από ένα μη ρεαλιστικά μεγάλο εύρος. Από την άλλη πλευρά, το R^2 μπορεί να είναι μικρό επειδή το εύρος των x ήταν πολύ μικρό για να επιτρέψει την ανίχνευση της σχέσης του με το y . Όμως, ακόμα και να προκύψει ένα μεγάλο R^2 , το γεγονός

αυτό από μόνο του δεν εγγυάται ότι το μοντέλο παλινδρόμησης θα είναι ένας ακριβής εκτιμητής.

3.1.6. Έλεγχος υπόθεσης για την κλίση και το σημείο τομής

Χρήση του t τεστ

Έστω ότι επιθυμούμε να ελέγξουμε την υπόθεση ότι η κλίση ισούται με μια σταθερά, έστω β_{10} . Οι υποθέσεις που πρέπει να σχηματιστούν είναι:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_{10}, \quad H_1 : \beta_1 \neq \beta_{10} \quad 3.24$$

Εφόσον τα σφάλματα e_i είναι $NID(0, \sigma^2)$, οι παρατηρήσεις y_i είναι $NID(\beta_0 + \beta_1 x_i, \sigma^2)$. Το β_1^* είναι γραμμικός συνδυασμός των παρατηρήσεων. Οπότε το β_1^* είναι κανονικά κατανομημένο με μέση τιμή β_1 και διακύμανση σ^2 / S_{XX} .

Επομένως, η στατιστική μεταβλητή:

$$Z_o = \frac{\beta_1^* - \beta_{10}}{\sqrt{\sigma^2 / S_{XX}}}$$

Ακολουθεί κατανομή $N(0,1)$ αν υπόθεση $H_0: \beta_1 = \beta_{10}$ είναι πραγματική. Αν το σ^2 ήταν γνωστό, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το Z_o για να ελέγξουμε τις αρχικές υποθέσεις.

Έχει ήδη δειχθεί ότι το MS_{RES} είναι ένας εκτιμητής του σ^2 και μπορεί να αποδειχθεί ότι η παράσταση $\frac{n-2}{\sigma^2} MS_{RES}$ ακολουθεί μια χ_{n-2}^2 κατανομή και ότι τα MS_{RES} και β_1^* είναι ανεξάρτητα.

Ακολούθως παρατίθεται ο ορισμός μιας t στατιστικής μεταβλητής:

$$t_o = \frac{\beta_1^* - \beta_{10}}{\sqrt{MS_{RES} / S_{XX}}} \quad 3.25$$

Η οποία ακολουθεί μια t_{n-2} κατανομή αν η υπόθεση $H_0: \beta_1 = \beta_{10}$ είναι πραγματική. Οι βαθμοί ελευθερίας που σχετίζονται με το t_o είναι ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που σχετίζονται με το MS_{RES} .

Έτσι, ο λόγος t_o είναι το στατιστικό τεστ που χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε την υπόθεση $H_0: \beta_1 = \beta_{10}$. Η διαδικασία ελέγχου υπολογίζει το t_o και συγκρίνει την παρατηρούμενη τιμή του t_o από την παραπάνω εξίσωση με το άνω $\alpha/2$ ποσοστό σημείο της t_{n-2} κατανομής ($t_{\alpha/2, n-2}$). Αυτή η διαδικασία απορρίπτει την ασήμαντη υπόθεση αν:

$$|t_o| > t_{\alpha/2, n-2} \quad 3.26$$

Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση P-τιμής (P-value).

Ο παρονομαστής της στατιστικής μεταβλητής ελέγχου το, καλείται συχνά ως εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα, ή πιο απλά, το τυπικό σφάλμα της κλίσης. Είναι:

$$se \beta_1^* = \sqrt{\frac{MS_{RES}}{S_{XX}}} \quad 3.27$$

Για τον λόγο αυτό, βλέπουμε συχνά το το γραμμένο ως:

$$t_o = \frac{\beta_1^* - \beta_{10}}{se \beta_1^*} \quad 3.28$$

Μια παρόμοια διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να ελέγξουμε τις υποθέσεις σε σχέση με το σημείο τομής (intercept). Για να ελέγξουμε τις υποθέσεις:

$$H_o : \beta_0 = \beta_{00}, \quad H_1 : \beta_0 \neq \beta_{00} \quad 3.29$$

Θα χρησιμοποιούσαμε την στατιστική μεταβλητή ελέγχου:

$$t_o = \frac{\beta_0^* - \beta_{00}}{\sqrt{MS_{RES} \left(\frac{1}{n} + \bar{x}^2 / S_{XX} \right)}} = \frac{\beta_0^* - \beta_{00}}{se \beta_0^*} \quad 3.30$$

όπου $se \beta_0^* = \sqrt{MS_{RES} \left(\frac{1}{n} + \bar{x}^2 / S_{XX} \right)}$ είναι το τυπικό σφάλμα του σημείου τομής.

Απορρίπτουμε την υπόθεση $H_o : \beta_0 = \beta_{00}$ αν $|t_o| > t_{\alpha/2, n-2}$.

3.1.7. Έλεγχος της σημασίας της παλινδρόμησης

Μια πολύ σημαντική και ειδική περίπτωση των υποθέσεων στην εξίσωση (3.24) είναι η:

$$H_o : \beta_1 = 0, \quad H_1 : \beta_1 \neq 0 \quad 3.31$$

Αυτές οι υποθέσεις σχετίζονται με τη σημασία της παλινδρόμησης. Η ανικανότητα απόρριψης της $H_o : \beta_1 = 0$ υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των X και Y. Αυτό μπορεί να σημαίνει είτε ότι το X δεν μπορεί να εξηγήσει την απόκλιση του Y και ότι ο καλύτερος εκτιμητής του Y για οποιοδήποτε X είναι $y^* = \bar{y}$ είτε ότι η σχέση μεταξύ X και Y δεν είναι γραμμική. Έτσι, η ανικανότητα απόρριψης της $H_o : \beta_1 = 0$ είναι ισοδύναμη με την άποψη ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των Y και X.

Εναλλακτικά, αν η $H_o : \beta_1 = 0$ απορριφθεί, αυτό συνεπάγεται ότι το X μπορεί να εξηγήσει την διασπορά του Y. Η απόρριψη της $H_o : \beta_1 = 0$ μπορεί να σημαίνει είτε ότι το μοντέλο ευθείας γραμμής είναι επαρκές, είτε ότι παρά την ύπαρξη της γραμμικής επιρροής του X,

καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με την προσθήκη υψηλότερων πολυωνυμικών όρων του X .

Η διαδικασία ελέγχου της $H_0: \beta_1 = 0$ μπορεί να αναπτυχθεί από δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση απλά χρησιμοποιεί την στατιστική μεταβλητή t της εξίσωσης (3.28) με $\beta_{10} = 0$:

$$t_o = \frac{\beta_1^*}{se \beta_1^*}$$

Η υπόθεση που σχετίζεται με την σημασία της παλινδρόμησης θα απορριπτόταν αν $|t_o| > t_{\alpha/2, n-2}$.

3.1.8. Προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου

1. Η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής Y και της ανεξάρτητης μεταβλητής X πρέπει να είναι γραμμική (ή τουλάχιστον κατά προσέγγιση γραμμική). Ο έλεγχος της γραμμικότητας μπορεί να γίνει με διαγράμματα καταλοίπων ή με διαγράμματα διασποράς (scatter plots) X και Y .
2. Τα σφάλματα πρέπει να είναι ανεξάρτητα. Προκειμένου να ελεγχθεί η ανεξαρτησία των σφαλμάτων, μπορεί να γίνει χρήση ελέγχων τυχαιότητας (runs tests), ελέγχων αυτοσυσχέτισης (κυρίως για χρονολογικά δεδομένα), δεικτών Durbin-Watson (συσχέτιση διαδοχικών σφαλμάτων-αυτοσυσχέτιση 1^{ης} τάξης) κ.ά.
3. Τα σφάλματα πρέπει να ακολουθούν κανονική κατανομή. Προκειμένου να ελεγχθεί η κανονικότητα των σφαλμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε διαγράμματα είτε στατιστικοί έλεγχοι (π.χ. τεστ κανονικότητας Kolmogorov-Smirnov).
4. Τα σφάλματα πρέπει να διακρίνονται από ομοσκεδαστικότητα. Για να ελεγχθεί αυτή η ιδιότητα των σφαλμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαγράμματα καταλοίπων ανά X , διαγράμματα καταλοίπων ανά Y^* . Επιπλέον, μπορούν να γίνουν και έλεγχοι ισότητας διακυμάνσεων ομαδοποιώντας τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών X .

3.1.9. Παρατηρήσεις σχετικά με την ανάλυση παλινδρόμησης

1. Τα μοντέλα παλινδρόμησης προορίζονται για εξισώσεις παρεμβολής πάνω από το εύρος των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του μοντέλου.
2. Η κατανομή των τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής X παίζει σημαντικό ρόλο στην προσαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων. Αυτό συμβαίνει επειδή ενώ όλα τα σημεία έχουν το ίδιο βάρος στον καθορισμό του ύψους της γραμμής ελαχίστων τετραγώνων, η κλίση επηρεάζεται πολύ περισσότερο από τις μακρινές τιμές του X .
3. Οι ακραίες και οι «κακές» τιμές μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή διαταραχή της προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων.

4. Παρά το γεγονός ότι μια ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να «δείχνει» μια ισχυρή σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, αυτό δεν υποδηλώνει ότι οι μεταβλητές σχετίζονται με αιτιώδη τρόπο.

3.2. Ασαφής γραμμική παλινδρόμηση

3.2.1. Εισαγωγή στην ασαφή γραμμική παλινδρόμηση

Σε περιπτώσεις όπου το προς μοντελοποίηση σύστημα διακρίνεται από μια ασαφή δομή, δεν είναι κατάλληλη η εφαρμογή της στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, όταν το υπό μελέτη σύνολο δεδομένων δεν είναι «ικανό» να υποστηρίξει μια ανάλυση στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης, η εκτίμηση παραμέτρων παλινδρόμησης μπορεί να γίνει μέσω της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.

Η ασαφής γραμμική παλινδρόμηση είναι πιο αποτελεσματική από την στατιστική παλινδρόμηση (ή άλλα εργαλεία που στηρίζονται σε στατιστικές τεχνικές) όταν:

- 1) Οι υποθέσεις της στατιστικής παλινδρόμησης είτε παραβιάζονται είτε δεν μπορούν να εφαρμοστούν
- 2) Πρέπει να ερμηνευθούν ασαφείς διαδικασίες και να προβλεφθούν τα αποτελέσματα αυτών
- 3) Τα διαθέσιμα δεδομένα είναι λίγα και χαρακτηρίζονται από ανακρίβεια
- 4) Το υπό μελέτη σύστημα επηρεάζεται από ανθρώπινες εκτιμήσεις.

Στο πλαίσιο της στατιστικής παλινδρόμησης, οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών που παρατηρούνται και των εκτιμώμενων τιμών, αποδίδονται σε σφάλματα που γίνονται κατά την παρατήρηση. Αντίθετα, στην ασαφή παλινδρόμηση, αυτές οι αποκλίσεις αποδίδονται στην αοριστία της δομής του συστήματος και αντιπροσωπεύουν την ασάφεια των παραμέτρων του συστήματος.

3.2.2. Ασαφής συνάρτηση με ασαφείς παραμέτρους

Έστω δύο σύνολα X και Y και μια συνάρτηση $f: X \rightarrow Y$ η οποία αντιστοιχίζει στοιχεία από το X στο Y . Αν οι παράμετροι δίνονται από ασαφή σύνολα A , τότε η συνάρτηση καλείται ασαφής και συμβολίζεται $f: X \rightarrow Y, A$. Όταν το x είναι δεδομένο, το ασαφές σύνολο $Y = f(x, A)$ το οποίο παίρνει τιμές από το σύνολο A , μπορεί να οριστεί όπως φαίνεται παρακάτω.

Ορισμός 1: Η ασαφής συνάρτηση συμβολίζεται

$$f: X \rightarrow Y, A \quad ; \quad Y = f(x, A) \quad (3.32)$$

Όπου $F(y)$ είναι το σύνολο όλων των ασαφών υποσυνόλων του Y . Το ασαφές σύνολο Y καθορίζεται από τη συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_Y y = \begin{cases} \max_{a|y=f(x,a) \neq \emptyset} \mu_A a, & a|y=f(x,a) \neq \emptyset \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.33)$$

Όπου A είναι ένα ασαφές σύνολο στον χώρο των παραγώγων των παραμέτρων των οποίων η συνάρτηση συμμετοχής συμβολίζεται με $\mu_A a$.

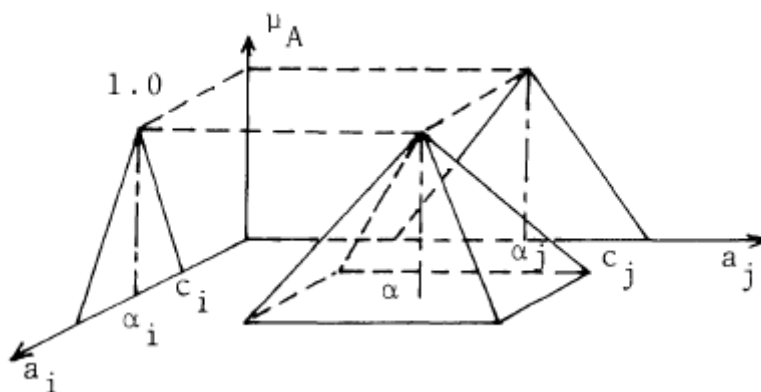
Ο ορισμός 1 είναι μια φυσική προέκταση της έννοιας της απεικόνισης συνόλων. Με δεδομένο το x , ένα ασαφές σύνολο A απεικονίζεται μέσα στο Y και η απεικόνιση του A δίνεται από τον ορισμό 1. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, οι ασαφείς παράμετροι θεωρείται ότι περιορίζονται στον ακόλουθο τύπο ασαφών συνόλων.

Ορισμός 2: Οι ασαφείς παράμετροι καθορίζονται από τα ασαφή σύνολα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Αυτό το ασαφές σύνολο μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$\mu_A \alpha = \min_j [\mu_{A_j} a_j] \quad (3.34)$$

$$\mu_{A_j} a_j = \begin{cases} 1 - \frac{|a_j - \alpha_j|}{c_j}, & a_j - c_j \leq a_j \leq a_j + c_j \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.35)$$

όπου $c_j > 0$.



Σχήμα 3.2. Ασαφές σύνολο της παραμέτρου A : $A \triangleq$ «περίπου a .»

Η ασαφής παράμετρος του ορισμού 2 σημαίνει «περίπου a » και μπορεί να περιγραφεί από ένα κέντρο a και ένα εύρος c . Κατά συνέπεια, οι ασαφείς παράμετροι $A = A_1, \dots, A_n$ μπορούν να καθοριστούν από τη διανυσματική μορφή των:

$$A = a, c, \quad a = a_1, \dots, a_n^t, \quad c = c_1, \dots, c_n^t. \quad (3.36)$$

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι ένα ασαφές σύνολο A_i καθορίζεται πάνω στην πραγματική γραμμή \mathbb{R}^1 και το A καθορίζεται πάνω στον διανυσματικό χώρο \mathbb{R}^n και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα καρτεσιανό προϊόν.

Προκειμένου να γίνουν κατανοητοί οι ορισμοί 1 και 2, μπορεί να θεωρηθεί η ακόλουθη ασαφής γραμμική συνάρτηση:

$$Y = A_1 x_1 + A_2 x_2 \quad (3.37)$$

όπου $A = \begin{bmatrix} 1,4 \\ 2,1 \end{bmatrix}$. Με δεδομένο ότι είναι $x = \begin{bmatrix} 1,1 \end{bmatrix}^t$, προκύπτει το ασαφές σύνολο $Y = \begin{bmatrix} 5,3 \end{bmatrix}$. Σύμφωνα με αυτό το παράδειγμα, «περίπου 1» και «περίπου 4» ισούται με «περίπου 5». Γενικεύοντας αυτή την ιδέα καταλήγουμε στην ακόλουθη πρόταση.

Πρόταση 1: Δεδομένης της ασαφούς παραμέτρου $A = a, c$, η ασαφής γραμμική συνάρτηση

$$Y = A_1 x_1 + \dots + A_n x_n = Ax \quad (3.38)$$

λαμβάνεται ως την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_Y(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|y - x^t a|}{c^t |x|}, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0, y = 0 \\ 0, & x = 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

όπου $|x| = |x_1|, \dots, |x_n|^t$ και $\mu_Y(y) = 0$, όταν $c^t |x| \leq |y - x^t a|$.

3.2.3. Ανάπτυξη του μοντέλου ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης

Στο πλαίσιο της επίλυσης ενός προβλήματος παλινδρόμησης, πρέπει να επιλεγεί το καταλληλότερο μαθηματικό μοντέλο και να καθοριστεί ποιο είναι το μοντέλο που μπορεί να ταιριάξει καλύτερα στα δεδομένα που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1..

Αριθμός δείγματος	Δεδομένα εξόδου y	Δεδομένα εισόδου x
1	y_1	x_{11}, \dots, x_{1n}
.	.	.
.	.	.
.	.	.
N	y_N	x_{N1}, \dots, x_{Nn}

Πίνακας 3.1. Δεδομένα εισόδου – εξόδου

Στον παραπάνω πίνακα, το y_i καλείται αποτέλεσμα ή παρατήρηση για το i -οστό δείγμα και το x_{ij} καλείται ως j -οστό δεδομένο η j -οστή ανεξάρτητη μεταβλητή για το i -οστό δείγμα.

Στην περίπτωση όπου το προς επίλυση πρόβλημα έχει την παραπάνω μορφή, είναι συνετή η προσφυγή στο πρόβλημα της γραμμικής παλινδρόμησης. Έστω ότι το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης έχει την μορφή $y = a'x$, τότε η απόκλιση μεταξύ της τιμής που παρατηρήθηκε και της εκτίμησης που έγινε είναι $y_i^* = a'x_i$

$$y_i - y_i^* = e_i, i = 1, \dots, N \quad (3.40)$$

γενικά λογίζεται ως το σφάλμα παρατήρησης e_i , το οποίο είναι μια τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή ίση με το μηδέν. Όμως, σε αυτή την περίπτωση, θεωρείται ότι αυτές οι αποκλίσεις εξαρτώνται από την ασάφεια της δομής του συστήματος. Με άλλα λόγια, οι αποκλίσεις είναι στενά συνδεδεμένες με την ασάφεια των παραμέτρων του συστήματος και όχι τόσο με τα σφάλματα παρατήρησης.

Με βάση την παραπάνω θεώρηση, μπορεί να θεωρηθεί η ακόλουθη ασαφής γραμμική συνάρτηση

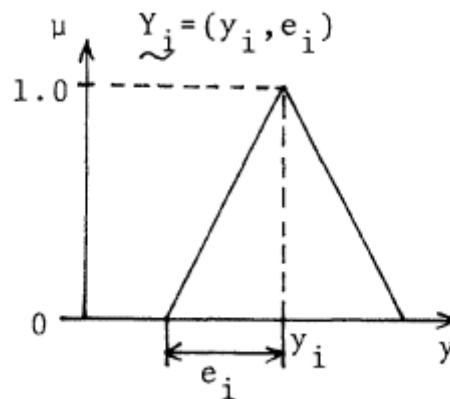
$$Y = A_1 x_1 + \dots + A_n x_n = Ax \quad (3.41)$$

όπου A_i είναι το ασαφές σύνολο που ορίστηκε στον ορισμό 2. Όταν ο πίνακας 3.1 περιλαμβάνει δεδομένα που δεν είναι ασαφή, το πρόβλημα του μοντέλου ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης είναι ο καθορισμός ασαφών παραμέτρων A^* τέτοιων ώστε το ασαφές σύνολο εξόδου $Y_i^* = A^* x_i$ να περιλαμβάνει το y_i σε βαθμό μεγαλύτερο του h . Η διασπορά των δεδομένων αναπαριστά την ασάφεια του φαινομένου στο οποίο στηρίζεται η ανάπτυξη του μοντέλου.

Για τα μη ασαφή δεδομένα εισόδου-εξόδου, όπως είναι αυτά του πίνακα 3.1, έχει ήδη σχηματιστεί το ασαφές μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης (3.36). Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στα ασαφή δεδομένα εξόδου τα οποία συμβολίζονται ως $Y_i = y_i, e_i$, όπου y_i είναι το κέντρο και e_i το εύρος. Τα δεδομένα εισόδου-εξόδου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. και το σχήμα 3.3.

Αριθμός δείγματος	Ασαφής δεδομένα εξόδου \tilde{Y}	Δεδομένα εισόδου x
1	$\tilde{Y}_1 = y_1, e_1$	x_{11}, \dots, x_{1n}
·	·	·
·	·	·
·	·	·
N	$\tilde{Y}_N = y_N, e_N$	x_{N1}, \dots, x_{Nn}

Πίνακας 3.2. Δεδομένα εισόδου-Ασαφής δεδομένα εξόδου

Σχήμα 3.3. Ασαφές δεδομένο εξόδου $\tilde{Y}_i = y_i, e_i$

Η συνάρτηση συμμετοχής του Y_i δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{Y_i} \ y = 1 - \frac{|y_i - y|}{e_i} \quad (3.42)$$

Προκειμένου να σχηματιστεί ένα μοντέλο ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης υποτίθεται ότι ισχύουν οι ακόλουθες υποθέσεις:

1) Τα δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα ασαφές γραμμικό μοντέλο:

$$Y_i^* = A_1^* x_{i1} + \dots + A_n^* x_{in} \triangleq A^* x_i \quad (3.43)$$

όπου ο τύπος της ασαφούς παραμέτρου A_i δίνεται στον ορισμό 2. Δεδομένου του x_i , το Y_i^* μπορεί να ληφθεί από την Πρόταση 1:

$$\mu_{Y_i^*} \ y = 1 - \frac{|yi - x_i^t a|}{c^t |x_i|} \quad (3.44)$$

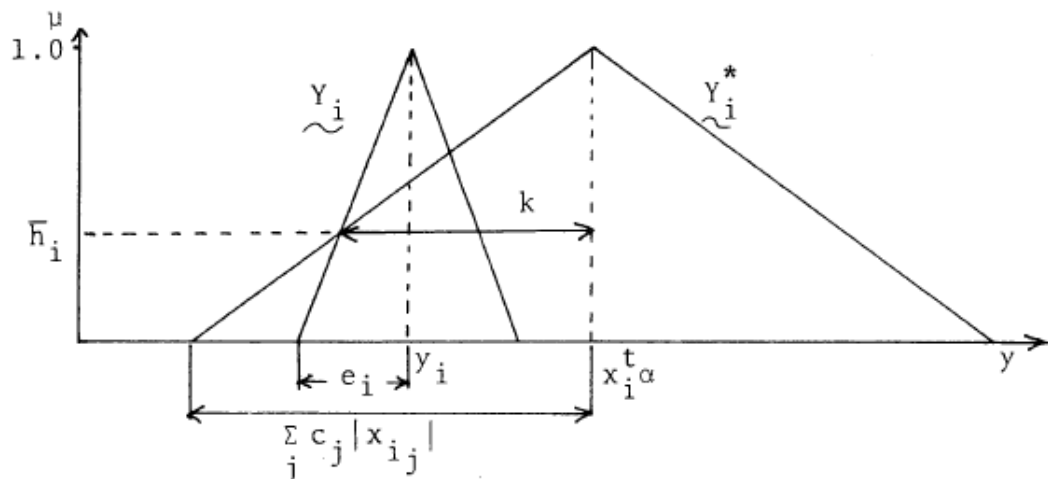
2) Ο βαθμός προσαρμογής του εκτιμώμενου ασαφούς γραμμικού μοντέλου $Y_i^* = A^* x_i$ στα δεδομένα $Y_i = y_i, e_i$ μετράται από τον δείκτη \bar{h}_i ο οποίος μεγιστοποιεί το h ενώ υπόκειται στον περιορισμό $Y_i^h \subset Y_i^{*h}$ όπου

$$\begin{aligned} Y_i^h &= y \mid \mu_{Y_i} \quad y \geq h \\ Y_i^{*h} &= y \mid \mu_{Y_i^*} \quad y \geq h \end{aligned} \quad (3.45)$$

είναι σύνολα βαθμού h . Ο δείκτης \bar{h}_i απεικονίζεται στο σχήμα 3.4. Ο βαθμός προσαρμογής του ασαφούς γραμμικού μοντέλου για όλα τα δεδομένα Y_1, \dots, Y_N καθορίζεται από $\min_j [\bar{h}_j]$.

3) Η ασάφεια του ασαφούς γραμμικού μοντέλου καθορίζεται από:

$$J = c_1 + \dots + c_n \quad (3.46)$$



Σχήμα 3.4. Βαθμός προσαρμογής του Y_i^* για ασαφή δεδομένα Y_i

Τελικά το πρόβλημα συνίσταται στον υπολογισμό των ασαφών παραμέτρων A_i^* οι οποίες ελαχιστοποιούν το J που υπόκειται στον περιορισμό $\bar{h}_i \geq H$ για όλα τα i , όπου H είναι μια τιμή επιλεγμένη από τον λήπτη των αποφάσεων και αντιπροσωπεύει τον βαθμό προσαρμογής του ασαφούς γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης.

Το \bar{h}_i μπορεί να ληφθεί από τη σχέση:

$$\bar{h}_i = 1 - \frac{|y_i - x_i^t a|}{\sum_j c_j |x_{ij}| - e_i} \quad (3.47)$$

Η παραπάνω σχέση βασίζεται στην ακόλουθη σχέση, η οποία προκύπτει από το διάγραμμα 3.4:

$$1: 1 - \bar{h}_i = \left(\sum_j c_j |x_{ij}| \right) : k \quad (3.48)$$

όπου

$$k = |y_i - x^t a| + e_i \quad 1 - \bar{h}_i \quad (3.49)$$

Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα προς επίλυση συνίσταται στον υπολογισμό των ασαφών παραμέτρων $A_i^* = a_i, c_i$ οι οποίες αποτελούν την λύση του ακόλουθου προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού:

$$\begin{aligned} \min_{a,c} J &= c_1 + \dots + c_n, \quad c_i \geq 0 \\ a^t x_i + 1 - H \sum_j c_j |x_{ij}| &\geq y_i + 1 - H e_i \\ -a^t x_i + 1 - H \sum_j c_j |x_{ij}| &\geq -y_i + 1 - H e_i, \\ i &= 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (3.50)$$

3.2.4. Μέθοδοι ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης

Η πρώτη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης είναι αυτή που περιγράφεται από τις σχέσεις γραμμικού προγραμματισμού (3.50) και παρουσιάστηκε στο άρθρο “Linear regression analysis with fuzzy model, Tanaka et al., IEEE 1982”. Από τότε έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι ασαφούς παλινδρόμησης κάνοντας χρήση κριτηρίων βελτιστοποίησης για γραμμική ή μη γραμμική ασαφή προσαρμογή του μοντέλου.

Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή τριών διαφορετικών μεθόδων ασαφούς παλινδρόμησης. Η πρώτη από τις μεθόδους στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση της ασάφειας, η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στα ελάχιστα τετράγωνα και στο πλαίσιο της τρίτης μεθόδου γίνεται εφαρμογή της ασαφούς παλινδρόμησης μέσω της ανάλυσης διαστημάτων (interval analysis).

3.2.4.1. Ασαφής παλινδρόμηση με χρήση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας

Στην ασαφή παλινδρόμηση, οι αποκλίσεις μεταξύ των παρατηρούμενων και των εκτιμώμενων τιμών αποδίδονται στην ασάφεια του συστήματος ή στην ασάφεια των παραμέτρων της παλινδρόμησης. Ο στόχος της ανάλυσης ασαφούς παλινδρόμησης είναι η ανάδειξη ενός μοντέλου, στο πλαίσιο του οποίου θα εντάσσονται όλα τα ασαφή δεδομένα που παρατηρούνται βάσει ενός προκαθορισμένου κριτηρίου προσαρμογής. Ανάλογα με το

κριτήριο προσαρμογής που θα επιλεγθεί, διαμορφώνονται και διαφορετικά μοντέλα ασαφούς παλινδρόμησης.

Οι σχέσεις 3.50 (Tanaka et al. 1982) αντιπροσωπεύουν την πρώτη ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης με χρήση μοντέλου ασάφειας. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, οι παράμετροι παλινδρόμησης είναι ασαφείς αριθμοί, οι οποίοι μπορούν να εκφραστούν ως ενδιάμεσοι αριθμοί με τιμές συμμετοχής. Εφόσον οι παράμετροι της παλινδρόμησης είναι ασαφείς αριθμοί, η εκτιμώμενη εξαρτημένη μεταβλητή \hat{Y} είναι επίσης ένας ασαφής αριθμός. Μια ανάλυση ασαφούς παλινδρόμησης με μια μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή X , καταλήγει στον ακόλουθο διμεταβλητό μοντέλο παλινδρόμησης:

$$\hat{Y} = A_0 + \tilde{A}_1 X, \quad (3.51)$$

Όπου \tilde{A}_0 είναι η ασαφής παράμετρος της τομής και \tilde{A}_1 είναι η ασαφής παράμετρος της κλίσης. Κάθε ασαφής παράμετρος $\tilde{A}_i = m_i, c_i$ εκφράζεται ως μια συμμετρική τριγωνική ασαφής συνάρτηση συμμετοχής, η οποία αποτελείται από ένα ασαφές κέντρο m_i και ένα ασαφές ημιπλάτος c_i .

Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, οι ασαφείς παράμετροι \tilde{A}_i $i = 0, 1$ καθορίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το εκτιμώμενο ασαφές δεδομένο εξόδου \hat{Y} να χαρακτηρίζεται από το ελάχιστο δυνατό ασαφές εύρος, ενώ παράλληλα να ικανοποιεί έναν προκαθορισμένο βαθμό εμπιστοσύνης h . Ο όρος h αναφέρεται ως μέτρο καλής προσαρμογής ή μέτρο συμβατότητας μεταξύ των δεδομένων και του μοντέλου παλινδρόμησης. Προκειμένου να υπολογιστούν οι ασαφείς παράμετροι $\tilde{A}_i = m_i, c_i$, πρέπει να επιλυθεί το ακόλουθο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } S = nc_0 + c_1 \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (3.52)$$

Με περιορισμούς $c_0 \geq 0, c_1 \geq 0$,

$$\sum_{j=0}^l m_j X_{ij} + 1 - h \sum_{j=0}^l c_j |X_{ij}| \geq Y_i + 1 - h e_i, \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (3.53)$$

$$\sum_{j=0}^l m_j X_{ij} - 1 - h \sum_{j=0}^l c_j |X_{ij}| \leq Y_i - 1 - h e_i, \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (3.54)$$

όπου S είναι η συνολική ασάφεια του μοντέλου παλινδρόμησης. Οι εξισώσεις 3.53 και 3.54 μπορούν να συμπεριλάβουν ασαφή δεδομένα που παρατηρήθηκαν και έχουν την μορφή $\tilde{Y}_i = Y_i, e_i$, όπου Y_i είναι το ασαφές κέντρο και e_i το ασαφές ημιπλάτος. Αν κάποια από τα

δεδομένα είναι σαφή, τότε το e αυτών θα ισούται με το μηδέν. Οπότε, ένας κανονικός σαφής αριθμός αποτελεί μια ειδική περίπτωση ασαφούς αριθμού. Οι παραπάνω σχέσεις 3.52 έως 3.54 αποτελούν μια διαφορετική μορφή του μοντέλου των “Tanaka et al.” που παρουσιάζεται στις σχέσεις 3.50.

3.2.4.2. Ασαφής παλινδρόμηση με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται δύο μέθοδοι ασαφούς παλινδρόμησης που στηρίζονται στα ελάχιστα τετράγωνα. Αρχικά θα γίνει αναφορά στην ασαφή παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του κριτηρίου μέγιστης συμβατότητας όπως αυτό προτάθηκε από τον “Celmins”. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί και η ασαφής παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας.

3.2.4.2.1. Ασαφής παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του κριτηρίου μέγιστης συμβατότητας

Ο “Celmins” πρότεινε μια προσέγγιση για ασαφή παλινδρόμηση με ελάχιστα τετράγωνα η οποία στηρίζεται στο μέτρο συμβατότητας μεταξύ των δεδομένων και του προσαρμοσμένου μοντέλου. Ορίζοντας τις συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_A X$ και $\mu_B X$ δύο ασαφών

ποσοτήτων \tilde{A} και \tilde{B} εισήγαγε την έννοια του μέτρου συμβατότητας μεταξύ των \tilde{A} και \tilde{B} ως $\gamma(\tilde{A}, \tilde{B})$. Για παράδειγμα, αν οι $\mu_A X$ και $\mu_B X$ είναι δύο κανονικοποιημένες

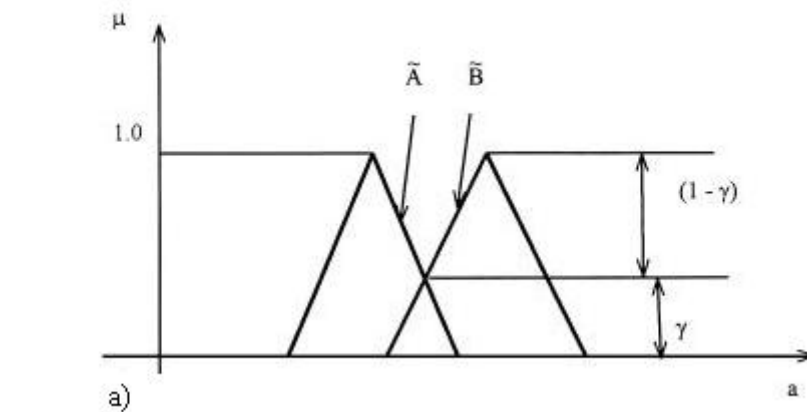
τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής, τότε το μέτρο συμβατότητας $\gamma(\tilde{A}, \tilde{B})$ μπορεί να εκφραστεί με τον τρόπο που φαίνεται στην παρακάτω σχέση και στο σχήμα 3.5.

$$\gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) = \max_x \min \mu_A X, \mu_B X \quad (3.55)$$

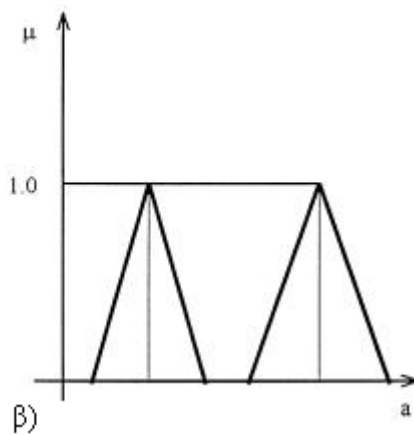
Η τιμή του γ είναι μεταξύ του 0 και του 1. Δύο ακραίες περιπτώσεις του μέτρου συμβατότητας είναι: $\gamma = 0$, αν τα εύρη των δύο ασαφών ποσοτήτων δεν επικαλύπτουν το ένα το άλλο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.β και $\gamma = 1$, αν τα κέντρα των δύο ασαφών ποσοτήτων επικαλύπτονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.γ. Το μέτρο συμβατότητας γ έχει παρόμοιο σκοπό με τον βαθμό εμπιστοσύνης h που συζητήθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Ο σκοπός της προσαρμογής των δεδομένων σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση είναι η ανεύρεση ενός μοντέλου του οποίου τα δεδομένα και το προσαρμοσμένο μοντέλο να χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη δυνατή συνολική συμβατότητα. Έστω γ_i το μέτρο συμβατότητας μεταξύ κάθε δεδομένου και του προσαρμοσμένου μοντέλου, τότε ένα μέτρο της συνολικής συμβατότητας είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων του γ_i από την μονάδα. Δηλαδή, για παράδειγμα η συνάρτηση – στόχος για τα δεδομένα είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων (W) όπως αυτή που

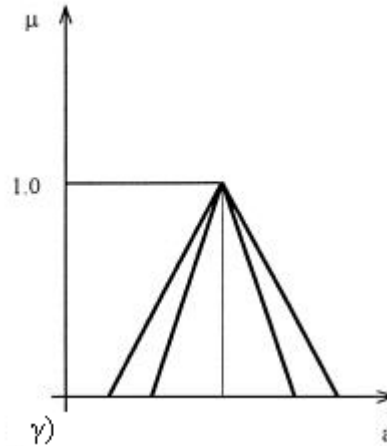
Συνάρτηση συμμετοχής



Συνάρτηση συμμετοχής



Συνάρτηση συμμετοχής



Σχήμα 3.5.: Μέτρο συμβατότητας. Α) Ορισμός μέτρου συμβατότητας γ μεταξύ δύο ασαφών ποσοτήτων \tilde{A} και \tilde{B} , β) $\gamma = 0$, γ) $\gamma = 1$

παρουσιάζεται ακολούθως:

$$W = \sum_{i=1}^m 1 - \gamma_i^2 \quad (3.56)$$

Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η τελική σχέση για την ασαφή παλινδρόμηση με ελάχιστα τετράγωνα και χρήση του κριτηρίου μέγιστης συμβατότητας είναι η ακόλουθη:

$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X = m_0 + m_1 X \pm \sqrt{c_0^2 + 2c_{01}X + c_1^2 X^2} \quad (3.57)$$

Το πρώτο μέρος της εξίσωσης 3.57, $m_0 + m_1 X$, αντιπροσωπεύει την κεντρική γραμμή του ασαφούς μοντέλου παλινδρόμησης. Οι παράμετροι m_0 και m_1 υπολογίζονται μέσω μιας σταθμισμένης παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων και ο όρος $1/(\text{ασάφεια δεδομένου})^2$ χρησιμοποιείται ως το «βάρος» που αντιστοιχίζεται σε κάθε δεδομένο προκειμένου να εφαρμοστεί η σταθμισμένη παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων. Όσον αφορά το δεύτερο

μέρος της εξίσωσης 3.57, $\pm\sqrt{c_o^2 + 2c_{o1}X + c_1^2X^2}$, χαρακτηρίζει το πάνω και το κάτω εξωτερικό όριο του μοντέλου παλινδρόμησης. Τα c_o και c_1 είναι τα ασαφή ημιπλάτη των παραμέτρων \tilde{A}_o και \tilde{A}_1 . Το c_{o1} είναι η ασαφής «συμφωνία» (concordance) μεταξύ των \tilde{A}_o και \tilde{A}_1 . Η «συμφωνία» μεταξύ δύο ασαφών παραμέτρων έχει παρόμοια έννοια με την πιθανολογική συνδιακύμανση μεταξύ δύο κανονικών παραμέτρων. Μέσω επαναλαμβανόμενων υπολογισμών και εφαρμογής της σχέσης 3.57 με το επιθυμητό μέτρο συμβατότητας μεταξύ 0 και 1, αποκτώνται τα c_o , c_1 και c_{o1} .

3.2.4.2.2. Ασαφής παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας

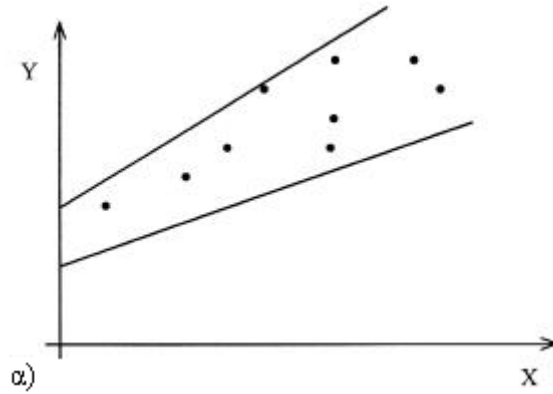
Οι “Savic” και “Pedrycz” σχημάτισαν μια μέθοδο για ασαφή παλινδρόμηση συνδυάζοντας την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων με το κριτήριο ελαχιστοποίησης της ασάφειας. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει είναι η χρήση της κανονικής παλινδρόμησης με ελάχιστα τετράγωνα προκειμένου να υπολογιστούν οι ασαφείς κεντρικές τιμές των παραμέτρων ασαφούς παλινδρόμησης. Το δεύτερο βήμα, συνίσταται στον υπολογισμό των ασαφών ευρών των παραμέτρων ασαφούς παλινδρόμησης με χρήση του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας.

Στο πρώτο βήμα, γίνεται η προσαρμογή μιας γραμμής παλινδρόμησης στα δεδομένα κάνοντας χρήση των διαθέσιμων πληροφοριών σχετικά με την κεντρική τιμή των ασαφών παρατηρήσεων. Τα ασαφή δεδομένα αντιμετωπίζονται ως απλοποιημένα σαφή δεδομένα και η ανάλυση παλινδρόμησης εφαρμόζεται ως μια τυπική ανάλυση παλινδρόμησης με ελάχιστα τετράγωνα. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας, χρησιμοποιούνται ως κεντρικές τιμές των παραμέτρων ασαφούς παλινδρόμησης.

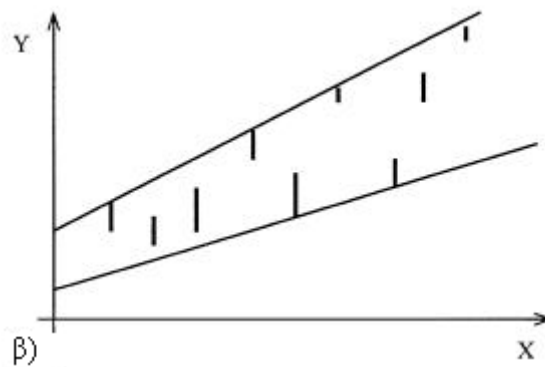
Στο δεύτερο βήμα, οι ασαφείς παράμετροι καθορίζονται μέσω της χρήσης του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της ασάφειας. Τα εύρη των εξισώσεων υπολογίζονται από τις εξισώσεις 3.52-3.54 όπως και στην προηγούμενη μέθοδο με την μόνη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται τα ασαφή κέντρα των παραμέτρων παλινδρόμησης έτσι όπως αυτά υπολογίζονται στο πρώτο βήμα.

3.2.4.3. Ανάλυση διαστημάτων (Interval Regression)

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, τα ασαφή δεδομένα και οι ασαφείς παράμετροι παλινδρόμησης αντιμετωπίζονται ως ενδιάμεσοι αριθμοί. Οι ενδιάμεσες διαδικασίες των εξισώσεων 3.59 και 3.60 εφαρμόζονται στην ασαφή παλινδρόμηση, η οποία κατά συνέπεια καλείται «ενδιάμεση ανάλυση παλινδρόμησης» (interval regression analysis). Οι παράμετροι ασαφούς παλινδρόμησης καθορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα ασαφή δεδομένα εξόδου να βρίσκονται εντός ενός ασαφούς μοντέλου παλινδρόμησης. Μια ενδιάμεση παλινδρόμηση για σαφή X και σαφή Y παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.α και ένα μοντέλο ενδιάμεσης παλινδρόμησης για σαφή X και ασαφή Y , παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.β.



Σχήμα 3.6.α): Μοντέλο ενδιάμεσης παλινδρόμησης για σαφή X και σαφή Y δεδομένα



Σχήμα 3.6.β): Μοντέλο ενδιάμεσης παλινδρόμησης για σαφή X και ασαφή Y δεδομένα

Για $\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X$, οι ασαφείς παράμετροι παλινδρόμησης $\tilde{A}_0 = m_0, c_0$ και $\tilde{A}_1 = m_1, c_1$ υπολογίζονται μέσω του ακόλουθου σχηματισμού γραμμικού προγραμματισμού:

$$\text{Ελαχιστοποίηση} \quad nc_0 + c_1 \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.58)$$

Με περιορισμούς: $c_0 \geq 0$ και $c_1 \geq 0$,

$$m_0 - c_0 + m_1 - c_1 X_i \leq Y_{i,L}, \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (3.59)$$

$$m_0 + c_0 + m_1 + c_1 X_i \geq Y_{i,U}, \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (3.60)$$

όπου $Y_{i,L}$ και $Y_{i,U}$ είναι τα κάτω και άνω όρια για κάθε ασαφές δεδομένο, αντίστοιχα. Η συνάρτηση της σχέσης 3.58 οδηγεί στην ελαχιστοποίηση των συνολικών ασαφών ευρών. Οι περιορισμοί των εξισώσεων 3.59 και 3.60, χρησιμοποιούνται προκειμένου να περιοριστούν όλα τα παρατηρούμενα δεδομένα μέσα σε ένα ασαφές μοντέλο παλινδρόμησης.

Κεφάλαιο 4: Περιγραφή μεθοδολογίας

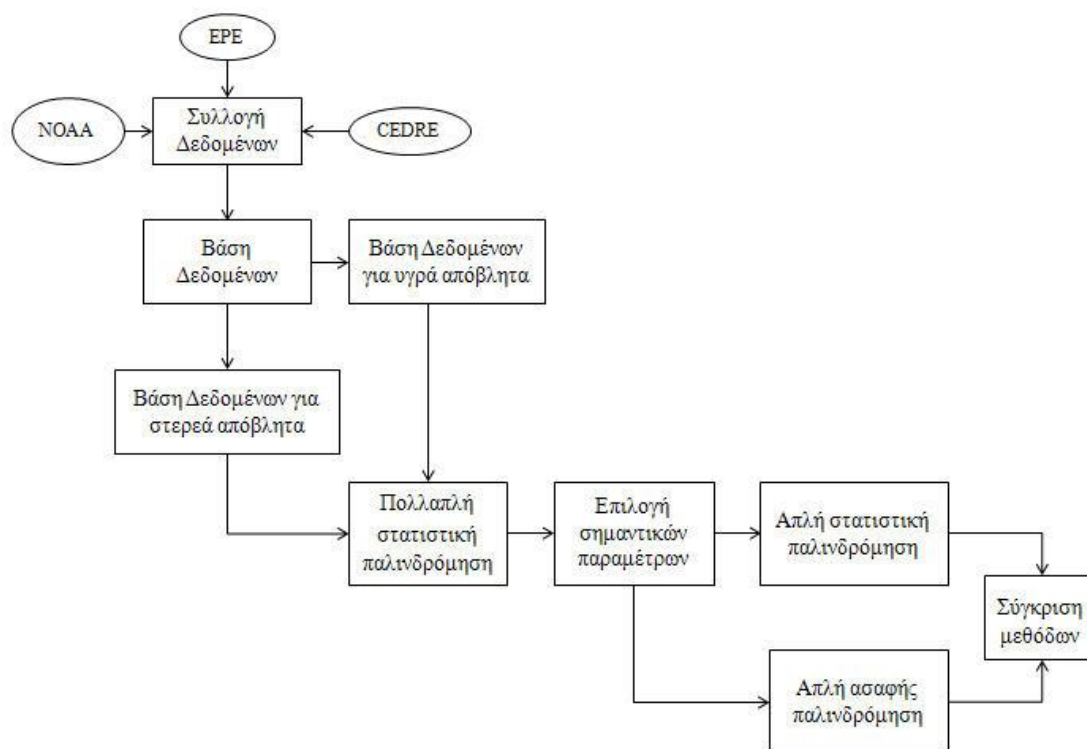
4.1. Ανάλυση στόχου της παρούσας εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η εκτίμηση της παραγωγής αποβλήτων (υγρών και στερεών) μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας. Όμως, στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επεξηγηθεί ο όρος «παραγωγή αποβλήτων» που χρησιμοποιείται συστηματικά. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, με τον όρο «παραγωγή αποβλήτων» (υγρών ή στερεών) περιγράφεται η ποσότητα αποβλήτων που συλλέγεται μετά από ένα περιστατικό ρύπανσης από πετρέλαιο στη θάλασσα.

Προφανώς, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εκτίμηση της συνολικής ποσότητας αποβλήτων που παράγεται μετά την εκδήλωση ενός περιστατικού ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω εκτιμήσεων και σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία για τη συνολική παραγωγή αποβλήτων μετά την εκδήλωση πετρελαιοκηλίδας. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι είναι πολύ δύσκολη η καταγραφή στοιχείων σχετικά με τη συνολική παραγωγή αποβλήτων.

4.2. Πορεία ανάπτυξης του μοντέλου

Η μεθοδολογία για την εκτίμηση παραγωγής αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης των πετρελαιοκηλίδων, αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα (Σχήμα 4.1.): (1) Συλλογή δεδομένων, (2) Διαμόρφωση βάσης δεδομένων, (3) Πολλαπλή στατιστική παλινδρόμηση, (4) Επιλογή σημαντικότερων παραμέτρων, (5) Απλή στατιστική παλινδρόμηση, (6) Απλή ασαφής παλινδρόμηση και (7) Σύγκριση μεθόδων.



Σχήμα 4.1.: Πορεία υπολογισμών

Στο πλαίσιο του πρώτου κεφαλαίου της παρούσας εργασίας, αναδείχθηκαν τα είδη των αποβλήτων που παράγονται κατά την διάρκεια αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων και αναλύθηκαν οι διαδικασίες από τις οποίες αποτελείται η διαχείριση αυτών των αποβλήτων. Από αυτήν την ανάλυση έγινε αντιληπτό ότι η παραγωγή αποβλήτων παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στο περιβαλλοντικό όσο και στο οικονομικό κόστος μιας πετρελαιοκηλίδας.

Στόχο αυτής της εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της παραγωγής αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων. Για τον λόγο αυτό συγκεντρώθηκαν τα τριάντα ιστορικά ατυχημάτων, τα οποία παρατέθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Το επόμενο βήμα ήταν η απομόνωση των παραμέτρων, οι οποίες φαίνονταν να επηρεάζουν την παραγωγή των αποβλήτων και βάσει αυτών σχηματίστηκαν δύο βάσεις δεδομένων. Η μια σχετίζεται με την παραγωγή υγρών αποβλήτων και η άλλη με την παραγωγή στερεών αποβλήτων.

Για την επεξεργασία των δεδομένων τα οποία συγκεντρώθηκαν στις δύο βάσεις δεδομένων, αρχικά επιλέχθηκε η μέθοδος της στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης (πολλαπλής και απλής). Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου συνέβαλε στην ανάδειξη των παραμέτρων που πραγματικά επηρέαζαν την παραγωγή αποβλήτων. Όμως, καθώς ο αριθμός των περιστατικών για τα οποία υπήρχαν στοιχεία ήταν σχετικά περιορισμένος, δεν ήταν ασφαλή τα συμπεράσματα της στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης. Επιπλέον, στο γεγονός ότι η στατιστική παλινδρόμηση δεν αρκεί για την επεξεργασία των εν λόγω δεδομένων, συνηγορεί και η ασάφεια που διακατέχει την σχέση μεταξύ παραγωγής αποβλήτων και των παραμέτρων που επιλέχθηκαν.

Κατά συνέπεια, το επόμενο βήμα στην επεξεργασία των δεδομένων αποτέλεσε η ασαφής γραμμική παλινδρόμηση. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια εξαιρετική εναλλακτική επιλογή για την εκτίμηση των παραμέτρων παλινδρόμησης σε περιπτώσεις όπου το σύνολο των δεδομένων είναι ανεπαρκές για την υποστήριξη στατιστικής παλινδρόμησης, καθώς και σε περιπτώσεις όπου η σχέση που συνδέει τις μεταβλητές ενός μοντέλου κρίνεται ασαφής. Η μέθοδος της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε μόνο για τις παραμέτρους, οι οποίες επηρέαζαν πραγματικά την παραγωγή αποβλήτων έτσι όπως αυτές προέκυψαν από την στατιστική παλινδρόμηση.

Τέλος, κρίθηκε σκόπιμη η σύγκριση των δύο μεθόδων. Για τον λόγο αυτό έγινε και κοινή παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων σε διαγράμματα. Το γεγονός αυτό συνέβαλε σημαντικά στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.3. Βάση δεδομένων

Προκειμένου να επιτευχθεί η ανάπτυξη του μοντέλου για την εκτίμηση παραγωγής αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων, κρίθηκε απαραίτητη η συγκέντρωση στοιχείων από περιστατικά ρύπανσης που είχαν εκδηλωθεί στο παρελθόν. Για την άντληση αυτών των στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν πηγές όπως είναι το “Cedre” (Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution), το “NOAA” (National Oceanic and Atmospheric Administration) και το αρχείο της εταιρείας Τεχνική Προστασίας Περιβάλλοντος Α.Ε.

Από τις προαναφερθείσες πηγές επιτεύχθηκε η συλλογή τριάντα περιστατικών ρύπανσης, για τα οποία υπήρχαν πληροφορίες σχετικά με τα απόβλητα που παράχθηκαν. Τα ιστορικά των περιστατικών αυτών παρατέθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Στη συνέχεια όμως, ήταν

απαραίτητη η απομόνωση των στοιχείων που θα συνέβαλαν στην διαμόρφωση του μοντέλου καθώς και ορισμένων γενικών στοιχείων. Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται τα γενικά στοιχεία που περιγράφουν το καθένα από τα ατυχήματα που σχηματίζουν τη βάση δεδομένων.

Όμως, τα δεδομένα που αποτελούν το αντικείμενο του ενδιαφέροντος αυτής της εργασίας είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή των αποβλήτων. Επειδή οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή των υγρών αποβλήτων δεν είναι ακριβώς οι ίδιες με τις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων, κρίθηκε σκόπιμη η διενέργεια ξεχωριστής ανάλυσης για την καθεμία από τις δύο κατηγορίες αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό στις επόμενες δύο ενότητες παρουσιάζονται δύο ξεχωριστές βάσεις δεδομένων. Η πρώτη περιλαμβάνει τις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή υγρών αποβλήτων και η δεύτερη περιλαμβάνει τις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων.

4.3.1. Βάση δεδομένων για υγρά απόβλητα

Από την μελέτη των ιστορικών των ατυχημάτων του δεύτερου κεφαλαίου, προέκυψε ότι η παραγωγή υγρών αποβλήτων επηρεάζεται από: (1) την ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε (tons), (2) το είδος του πετρελαίου που διέφυγε, (3) τις καιρικές συνθήκες, (4) την απόσταση του σημείου εκδήλωσης της πετρελαιοκηλίδας από την ακτή και (5) τη χώρα και τη χρονολογία κατά την οποία εκδηλώθηκε η πετρελαιοκηλίδα. Κατά συνέπεια, κρίθηκε απαραίτητη η απομόνωση αυτών των στοιχείων σε μια ξεχωριστή βάση δεδομένων (Πίνακας 4.5.) προκειμένου να διευκολυνθεί η επεξεργασία τους.

Ακόμα και πριν την επεξεργασία των δεδομένων με την μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης, είναι αρκετά εμφανές ότι η παράμετρος που θα ασκεί την μεγαλύτερη επιρροή στην παραγωγή υγρών αποβλήτων θα είναι η ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε στο περιβάλλον. Όμως, πέρα από αυτήν την παράμετρο θα πρέπει να ελεγχθούν και οι υπόλοιπες που μπορεί να θεωρηθεί ότι επηρεάζουν την παραγωγή υγρών αποβλήτων.

Το είδος του πετρελαίου που διέφυγε στο περιβάλλον αποτελεί μια παράμετρο που θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν. Όσο πιο «βαρύ» είναι το πετρέλαιο τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να σχηματίσει γαλακτώματα προκαλώντας σημαντική αύξηση των υγρών αποβλήτων και τόσο μειώνεται η πιθανότητα μέρος αυτού να υποστεί φυσικό διασκορπισμό. Στον Πίνακα 4.5. περιλαμβάνεται μια στήλη στην οποία προσδιορίζονται κάποιοι χαρακτηρισμοί σχετικά με το είδος του πετρελαίου που διέφυγε σε καθένα από τα ατυχήματα που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Όμως, καθώς δεν μπορεί να γίνει κάποια επεξεργασία δεδομένων που έχουν την μορφή χαρακτηρισμών, κρίθηκε σκόπιμη η ανάπτυξη μιας κλίμακας από το 1 έως το 3 (Πίνακας 4.2), η οποία θα αντιπροσωπεύει αυτούς τους χαρακτηρισμούς.

Πίνακας 4.1.: Γενικά στοιχεία που περιγράφουν τα ατυχήματα που αποτελούν τη βάση δεδομένων

A/A	Όνομα πλοίου	Είδος Πλοίου	Σημαία	Ημερομηνία ατυχήματος	Είδος ατυχήματος	Τοποθεσία ατυχήματος
1	Aegean Sea	Δεξαμενόπλοιο	Ελλάδας	3/12/1992	Προσάραξη	Ισπανία
2	Amazzone	Δεξαμενόπλοιο	Ιταλίας	30/1/1988	Βλάβη στο πλοίο	Γαλλία
3	Amoco Cadiz	Δεξαμενόπλοιο	Λιβερίας	16/3/1978	Προσάραξη	Γαλλία
4	Aragon	Δεξαμενόπλοιο	Ισπανίας	26/12/1989	Βλάβη στο πλοίο	Πορτογαλία
5	Athos 1	Δεξαμενόπλοιο	Κύπρου	26/11/2004	Σύγκρουση	ΗΠΑ
6	Baltic Carrier	Δεξαμενόπλοιο	Νήσων "Marshall"	28/3/2001	Σύγκρουση	Δανία
7	Black Sea Storm	1 Δεξαμενόπλοιο και 3 άλλα πλοία	Ρωσίας	10/11/2007	Βύθιση πλοίων εν μέσω θύελλας	Μαύρη θάλασσα
8	Boehlen	Δεξαμενόπλοιο	Αν. Γερμανίας	15/10/1976	Βλάβη στο πλοίο	Γαλλία
9	Braer	Δεξαμενόπλοιο	Λιβερίας	4/1/1993	Προσάραξη	Σκωτία
10	Bright Artemis	Δεξαμενόπλοιο	Σιγκαπούρης	14/8/2006	Σύγκρουση	Περσικός κόλπος
11	Christos Bitas	Δεξαμενόπλοιο	Ελλάδας	12/10/1978	Προσάραξη	Ουαλία
12	Coral Bulker	Πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου	Χόνγκ Κόνγκ	25/12/2000	Προσάραξη	Πορτογαλία
13	Erika	Δεξαμενόπλοιο	Μάλτας	11/12/1999	Βλάβη στο πλοίο	Γαλλία
14	Exxon Valdez	Δεξαμενόπλοιο	Η.Π.Α	24/3/1989	Προσάραξη	ΗΠΑ
15	Haven	Δεξαμενόπλοιο	Κύπρου	11/4/1991	Έκρηξη	Ιταλία
16	Hebei Spirit	Δεξαμενόπλοιο	Κίνας	7/12/2007	Σύγκρουση	Νότιος Κορέα
17	Interceptor	Δεξαμενόπλοιο	Παναμά	30/5/2008	Ατύχημα κατά την πετρέλευση	Ελλάδα
18	Lebanon Conflict	Εγκατάσταση	-	13/7/2006	Βομβαρδισμοί	Λίβανος
19	Mara A	Πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου	Πορτογαλίας	17/10/2008	Ατύχημα κατά την πετρέλευση	Ελλάδα
20	Prestige	Δεξαμενόπλοιο	Μπαχαμών	13/11/2002	Βλάβη στο πλοίο	Ισπανία
21	Riga Sailor	Γενικού φορτίου	Μάλτας	9/3/2006	Σύγκρουση	Ελλάδα
22	Rose G	Δεξαμενόπλοιο	Ιταλίας	26/1/2009	Αστοχία αγωγού κατά την πετρέλευση	Ελλάδα
23	Sea Diamond	Κρουαζιερόπλοιο	Ελλάδας	5/4/2007	Προσάραξη	Ελλάδα
24	Sea Empress	Δεξαμενόπλοιο	Λιβερίας	15/2/1996	Προσάραξη	Ηνωμένο Βασίλειο
25	Selendang Ayu	Πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου	Μαλαισίας	7/12/2004	Προσάραξη	ΗΠΑ
26	Tanio	Δεξαμενόπλοιο	Παναμά	7/3/1980	Βλάβη στο πλοίο	Γαλλία
27	Tasman Spirit	Δεξαμενόπλοιο	Ελλάδας	27/7/2003	Προσάραξη	Πακιστάν
28	Θεόφιλος	Ε/Γ-Ο/Γ	Ελλάδας	28/6/2008	Προσάραξη	Ελλάδα
29	Μυρτιδιώτισσα	Ε/Γ-Ο/Γ	Ελλάδας	25/7/2008	Βλάβη στο πλοίο	Ελλάδα
30	Παναγιώτης Π.	Δεξαμενόπλοιο	Ελλάδας	25/10/2008	Βλάβη στο πλοίο	Ελλάδα

Πίνακας 4.2. Κλίμακα για το είδος του πετρελαίου που διέφυγε

1	Ελαφρύ πετρέλαιο
2	Ελαφρύ και αργό πετρέλαιο
3	Αργό πετρέλαιο

Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την ανάπτυξη μιας κλίμακας που θα αντιπροσωπεύει τους χαρακτηρισμούς που προσδίδονται στις καιρικές συνθήκες στο πλαίσιο του Πίνακα 4.5.. Δηλαδή οι χαρακτηρισμοί, «δυσμενείς καιρικές συνθήκες», «καλές καιρικές συνθήκες» κλπ., αντιστοιχήθηκαν σε κλιμακωτές μεταβλητές, οι οποίες λαμβάνουν τιμές από 1 έως 3 (Πίνακας 4.3.). Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι οι χαρακτηρισμοί που αποδίδονται στις καιρικές συνθήκες (και κατά συνέπεια και οι κλιμακωτές μεταβλητές) περιγράφουν το κατά πόσο ήταν εφικτή η διενέργεια επιχειρήσεων στη θάλασσα.

Πίνακας 4.3. Κλίμακα για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διενέργεια επιχειρήσεων στη θάλασσα

1	Καλές καιρικές συνθήκες
2	Δυσμενείς καιρικές συνθήκες
3	Απαγορευτικές καιρικές συνθήκες

Μια ακόμη παράμετρος, η οποία επηρεάζει την παραγωγή υγρών αποβλήτων είναι το πόσο απέχει από την ακτή το σημείο όπου εκδηλώνεται μια πετρελαιοκηλίδα. Όσο πιο κοντά σε ακτογραμμή εκδηλώνεται μια πετρελαιοκηλίδα, τόσο πιο επιτακτική καθίσταται η διενέργεια επιχειρήσεων στη θάλασσα προκειμένου το πετρέλαιο να μην «χτυπήσει» την ακτή. Επιπροσθέτως, όσο λιγότερο απέχει το σημείο εκδήλωσης της πετρελαιοκηλίδας από την ακτή τόσο πιο εύκολος είναι ο περιορισμός του πετρελαίου και κατά συνέπεια και η συλλογή του. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί και η περίπτωση του “Bright Artemis” όπου η πετρελαιοκηλίδα εκδηλώθηκε σε απόσταση 480 km από την ακτή και αποφασίστηκε να μην διεξαχθεί επιχείρηση αντιμετώπισης στη θάλασσα.

Τέλος, είναι εμφανές ότι η παραγωγή αποβλήτων εξαρτάται και από το που και πότε εκδηλώθηκε η πετρελαιοκηλίδα. Υπάρχουν χώρες, όπως είναι οι ευρωπαϊκές, οι οποίες διαθέτουν περισσότερα μέσα για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης και άλλες όπως π.χ. το Πακιστάν, οι οποίες δεν έχουν κάνει ανάλογα βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση. Επιπλέον, η ικανότητα αντιμετώπισης περιστατικών ρύπανσης βελτιώθηκε σημαντικά μετά από τα ατυχήματα των “Erika” και “Prestige” καθώς από τότε έγιναν αξιοσημείωτες ενέργειες (π.χ. ίδρυση “EMSA”). Προκειμένου να ληφθεί υπ’ όψιν η εν λόγω παράμετρος, αναπτύχθηκε μια κλίμακα από 1 έως 3 (Πίνακας 4.4) η οποία αναπαριστά την ικανότητα αντιμετώπισης μιας πετρελαιοκηλίδας ανάλογα με τη χώρα και τη χρονολογία κατά την οποία εκδηλώθηκε το ατύχημα που προκάλεσε την δημιουργία πετρελαιοκηλίδας.

Πίνακας 4.4.: Κλίμακα για την ικανότητα αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας ανάλογα με την τοποθεσία και τη χρονολογία κατά την οποία αυτή εκδηλώθηκε

1	Καλή ικανότητα αντιμετώπισης
2	Ικανοποιητική ικανότητα αντιμετώπισης
3	Μικρή ικανότητα αντιμετώπισης

Στον Πίνακα 4.5. που παρατίθεται ακολούθως, περιέχονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή υγρών αποβλήτων είτε με την μορφή αριθμών είτε με την μορφή χαρακτηρισμών. Ενώ στον Πίνακα 4.6., οι χαρακτηρισμοί έχουν αντικατασταθεί με τις κλιμακωτές μεταβλητές που περιγράφηκαν παραπάνω. Επιπλέον, στον Πίνακα 4.6. περιλαμβάνονται και οι ποσότητες των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν από κάθε περιστατικό.

4.3.2. Βάση δεδομένων για στερεά απόβλητα

Από την μελέτη των ιστορικών των ατυχημάτων που παρατίθενται στο δεύτερο κεφάλαιο, προέκυψε ότι η παραγωγή στερεών αποβλήτων εξαρτάται από: (1) την ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons), (2) την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons), (3) την απόσταση του σημείου εκδήλωσης της πετρελαιοκηλίδας από την ακτή (km), (4) το μήκος της ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο (km), (5) το είδος της ακτής, (6) τις καιρικές συνθήκες και (7) την ικανότητα αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας με βάση την τοποθεσία και τη χρονολογία κατά την οποία εκδηλώθηκε το ατύχημα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε αποτελεί την πιο προφανή ίσως παράμετρο που επηρεάζει την παραγωγή τόσο των υγρών όσο και των στερεών αποβλήτων. Όμως, εκτός από αυτή την παράμετρο θα πρέπει να ελεγχθούν και οι υπόλοιπες που μπορεί να θεωρηθεί ότι επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων.

Μετά την εκδήλωση μιας πετρελαιοκηλίδας είναι αναγκαία η άμεση διενέργεια επιχείρησης αντιμετώπισης στη θάλασσα, καθώς η παραγωγή στερεών αποβλήτων εξαρτάται κατά πολύ από την έκβαση των επιχειρήσεων στη θάλασσα. Όσο περισσότερο πετρέλαιο συλλεχθεί στη θάλασσα, τόσο λιγότερο πετρέλαιο θα «χτυπήσει» τελικά τις ακτές με συνέπεια τον περιορισμό της παραγωγής στερεών αποβλήτων. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της παραπάνω παρατήρησης αποτελεί η περίπτωση του “Erika” και ειδικά αν συγκριθεί με την περίπτωση του “Amoco Cadiz”. Από το “Erika” διέφυγαν 20.000 τόνοι πετρελαίου και παράχθηκαν 250.000 τόνοι στερεών αποβλήτων όταν κατά την διάρκεια των επιχειρήσεων αντιμετώπισης στη θάλασσα συλλέχθηκαν 1.200 τόνοι υγρών αποβλήτων. Ενώ από το “Amoco Cadiz” διέφυγαν 227.000 τόνοι πετρελαίου και παράχθηκαν 120.000 τόνοι στερεών αποβλήτων όταν κατά το αποτέλεσμα της επιχείρησης αντιμετώπισης στη θάλασσα ήταν η συλλογή 100.000 τόνων υγρών αποβλήτων. Δηλαδή, από το ατύχημα του “Erika” παράχθηκε διπλάσια ποσότητα σε σχέση με αυτήν που παράχθηκε από το ατύχημα του “Amoco Cadiz” όταν η ποσότητα του πετρελαίου που διέφυγε από το “Erika” αντιστοιχεί στο 1/10 της ποσότητας του πετρελαίου που διέφυγε από το “Amoco Cadiz”. Επομένως, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για την ένταξη της ποσότητας υγρών αποβλήτων στις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων.

Πίνακας 4.5.: Παρουσίαση παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή υγρών αποβλήτων

A/A	Όνομα Πλοίου	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	Είδος πετρελαίου που διέφυγε	Καιρικές συνθήκες	Απόσταση από ακτή (km)	Χώρα & Χρονολογία ατυχήματος
1	Aegean Sea	67000	Ελαφρύ αργό	Δυσμενείς	4	Ισπανία 1992
2	Amazzone	2100	Αργό, παραφινέλαιο	Δυσμενείς	111	Γαλλία 1988
3	Amoco Cadiz	227000	Αργό	Καταιγίδα	5	Γαλλία 1974
4	Aragon	25000	Αργό	Δυσμενείς	60	Πορτογαλία 1989
5	Athos 1	1000	Αργό	Καλές	3	ΗΠΑ 2004
6	Baltic Carrier	2700	Καύσιμο	Δυσμενείς	35	Δανία 2001
7	Black Sea Storm	1333	Καύσιμο, diesel, θέρμανσης	Ιδιαίτερος δυσμενείς	2	Ουκρανία 2007
8	Boehlen	7000	Καύσιμο πετρέλαιο	Καταιγίδα	20	Γαλλία 1976
9	Braer	84500	Αργό, καύσιμο πετρέλαιο	Ιδιαίτερος δυσμενείς	1	Σκωτία 1993
10	Bright Artemis	4500	Ελαφρύ αργό	Δυσμενείς	480	Περσικός Κόλπος 2006
11	Christos Bitas	5000	Βαρύ αργό	Δυσμενείς	15	Ουαλία 1978
12	Coral Bulker	700	Καύσιμο, diesel	Δυσμενείς	1	Πορτογαλία 2000
13	Erika	20000	Καύσιμο	Δυσμενείς	48	Γαλλία 1999
14	Exxon Valdez	38500	Αργό	Καλές	10	ΗΠΑ 1989
15	Haven	144000	Αργό, diesel	Καλές	3	Ιταλία 1999
16	Hebei Spirit	10000	Ελαφρύ αργό	Καλές	4	Κορέα 2007
17	Interceptor	10	Καύσιμο	Δυσμενείς	1	Ελλάδα 2008
18	Lebanon Conflict	15000	Ενδιάμεσο καύσιμο	Ισχυροί άνεμοι	0	Λίβανος 2006
19	Mara A	3	Καύσιμο	Καλές	0	Ελλάδα 2008
20	Prestige	64000	Καύσιμο	Δυσμενείς	250	Ισπανία 2002
21	Riga Sailor	180	Καύσιμο	Καλές	0	Ελλάδα 2006
22	Rose G	11	Diesel	Καλές	1	Ελλάδα 2009
23	Sea Diamond	486	Καύσιμο, diesel	Καλές	1	Ελλάδα 2007
24	Sea Empress	73000	Ελαφρύ αργό	Ισχυρά ρεύματα παλίρροιας	0	Ηνωμένο Βασίλειο 1996
25	Selendang Ayu	1203	Bunker, gasoil	Ιδιαίτερος δυσμενείς	0	ΗΠΑ 2004
26	Tanio	6000	Καύσιμο	Ιδιαίτερος δυσμενείς	50	Γαλλία 1980
27	Tasman Spirit	27000	Αργό	Δυσμενείς	4	Πακιστάν 2003
28	Θεόφιλος	1.5	Καύσιμο	Ισχυροί άνεμοι	3	Ελλάδα 2008
29	Μυρτιδιώτισσα	60	Diesel	Ισχυροί άνεμοι	1	Ελλάδα 2008
30	Παναγιώτης Π.	34	Καύσιμο	Ισχυροί άνεμοι	0	Ελλάδα 2008

Πίνακας 4.6.: Παρουσίαση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή υγρών αποβλήτων και της ποσότητας που παράχθηκε σε κάθε περιστατικό

A/A	Όνομα Πλοίου	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	Είδος πετρελαίου που διέφυγε	Καιρικές συνθήκες	Απόσταση από ακτή (km)	Ικανότητα αντιμετώπισης	Υγρά απόβλητα (tons)
1	Aegean Sea	67000	1	2	4	2	3000
2	Amazzone	2100	2	2	111	2	5
3	Amoco Cadiz	227000	3	2	5	3	100000
4	Aragon	25000	3	3	60	2	0
5	Athos 1	1000	3	1	3	1	500
6	Baltic Carrier	2700	3	2	35	2	2000
7	Black Sea Storm	1333	2	3	2	2	0
8	Boehlen	7000	3	2	20	3	1000
9	Braer	84500	3	3	1	2	0
10	Bright Artemis	4500	1	2	480	2	0
11	Christos Bitas	5000	3	2	15	3	360
12	Coral Bulker	700	2	2	1	2	8
13	Erika	20000	3	2	48	2	1200
14	Exxon Valdez	38500	3	1	10	2	3800
15	Haven	144000	1	1	3	2	2000
16	Hebei Spirit	10000	2	1	4	1	1500
17	Interceptor	10	3	2	1	1	6
18	Lebanon Conflict	15000	2	2	0	2	350
19	Mara A	3	3	1	0	1	16
20	Prestige	64000	3	2	250	2	52000
21	Riga Sailor	180	3	1	0	1	220
22	Rose G	11	1	1	1	1	8
23	Sea Diamond	486	2	1	1	1	550
24	Sea Empress	73000	1	2	0	2	8500
25	Selendang Ayu	1203	2	3	0	1	0
26	Tanio	6000	3	3	50	3	0
27	Tasman Spirit	27000	3	2	4	3	140
28	Θεόφιλος	1.5	2	2	3	1	1.1
29	Μυρτιδιώτισσα	60	1	2	1	1	100
30	Παναγιώτης Π.	34	3	2	0	1	22

Οι καιρικές συνθήκες και η ικανότητα αντιμετώπισης επηρεάζουν και την παραγωγή στερεών αποβλήτων και για τον λόγο αυτό συμπεριλαμβάνονται στην αντίστοιχη βάση δεδομένων για τα στερεά απόβλητα. Αρχικά, οι παράμετροι αυτές έχουν την μορφή χαρακτηρισμών (Πίνακας 4.8.) και στη συνέχεια αντιστοιχούνται σε κλιμακωτές μεταβλητές (Πίνακας 4.9.) όπως έγινε και στην περίπτωση της βάσης δεδομένων για τα υγρά απόβλητα. Ισχύουν οι ίδιες κλίμακες που χρησιμοποιήθηκαν και παραπάνω.

Η απόσταση του σημείου εκδήλωσης της πετρελαιοκηλίδας από την ακτή επηρεάζει και την παραγωγή στερεών αποβλήτων καθώς όσο πιο μακριά από τις ακτές εκδηλώνεται ένα περιστατικό ρύπανσης από πετρέλαιο, τόσο μειώνεται η πιθανότητα το πετρέλαιο να «χτυπήσει» τις ακτές. Όμως, όσο πιο κοντά στις ακτές εκδηλώνεται ένα τέτοιο περιστατικό, τόσο πιο πιθανό είναι να συλλεχθούν μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων. Κατά συνέπεια, είναι σαφές ότι η εν λόγω παράμετρος συσχετίζεται άμεσα με την παραγωγή στερεών αποβλήτων, αλλά είναι ασαφής ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό.

Στη βάση δεδομένων για τα στερεά απόβλητα έχουν εισαχθεί και δύο μεταβλητές, οι οποίες δεν έκαναν την εμφάνισή τους στην αντίστοιχη βάση δεδομένων για τα υγρά απόβλητα. Πρόκειται για το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο και για το είδος της ακτής. Είναι προφανές ότι οι δύο αυτές παράμετροι ασκούν άμεση επιρροή στην παραγωγή στερεών αποβλήτων. Το προσβληθέν μήκος ακτογραμμής (km) έχει εισαχθεί στη βάση δεδομένων με την μορφή απόλυτων αριθμών. Όμως, το είδος ακτής αρχικά είχε την μορφή χαρακτηρισμών (Πίνακας 4.8.) και για το λόγο αυτό ήταν αναγκαία η ανάπτυξη μιας κλίμακας που θα αντιπροσωπεύει την παραγωγή στερεών αποβλήτων ανάλογα με το είδος της ακτογραμμής που προσβλήθηκε. Από την μελέτη των ιστορικών των ατυχημάτων του δευτέρου κεφαλαίου έχει προκύψει η πεποίθηση ότι η παραγωγή στερεών αποβλήτων είναι μεγαλύτερη όταν προσβάλλονται αμμώδεις ακτές ενώ είναι μικρότερη όταν προσβάλλονται βραχώδεις ακτές. Όταν η ακτογραμμή που προσβλήθηκε διαθέτει παραλίες με άμμο, παραλίες με βότσαλα και βραχώδεις ακτές (μικτή ακτογραμμή), τότε θεωρείται θα προκύψει μεσαία παραγωγή στερεών αποβλήτων. Προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν η εν λόγω παράμετρος, αναπτύχθηκε μια κλίμακα από 1 έως 3 (Πίνακας 4.7.) η οποία αντιπροσωπεύει το είδος της ακτής ανάλογα με την επίπτωση που έχει στην παραγωγή αποβλήτων.

Πίνακας 4.7.: Κλίμακα για το είδος της ακτής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο

1	Βραχώδης ακτογραμμή
2	Μικτή ακτογραμμή
3	Αμμώδης ακτογραμμή

Στον Πίνακα 4.8. περιέχονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων είτε με την μορφή αριθμών είτε με την μορφή χαρακτηρισμών. Ενώ στον Πίνακα 4.9., οι χαρακτηρισμοί έχουν αντικατασταθεί με τις κλιμακωτές μεταβλητές που περιγράφηκαν παραπάνω. Επιπλέον, στον Πίνακα 4.9. περιλαμβάνονται και οι ποσότητες των στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν από κάθε περιστατικό.

Πίνακας 4.8.: Παρουσίαση παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων

A/A	Όνομα Πλοίου	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	Ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons)	Απόσταση από ακτή (km)	Προσβληθέν μήκος ακτογραμμής (km)	Είδος ακτής	Καιρικές συνθήκες	Χώρα & Χρονολογία ατυχήματος
1	Aegean Sea	67000	3000	4	300	Αμμώδης	Δυσμενείς	Ισπανία 1992
2	Amazzone	2100	5	111	450	Αμμώδης	Δυσμενείς	Γαλλία 1988
3	Amoco Cadiz	227000	100000	5	360	Αμμώδης	Καταιγίδα	Γαλλία 1974
4	Aragon	25000	0	60	5	Μικτή	Δυσμενείς	Πορτογαλία 1989
5	Athos 1	1000	500	3	200	Μικτή	Καλές	ΗΠΑ 2004
6	Baltic Carrier	2700	2000	35	50	Αμμώδης	Δυσμενείς	Δανία 2001
7	Black Sea Storm	1333	0	2	10	Αμμώδης	Ιδιαίτερος δυσμενείς	Ουκρανία 2007
8	Boehlen	7000	1000	20	20	Βραχώδης	Καταιγίδα	Γαλλία 1976
9	Braer	84500	0	1	600	Μικτή	Ιδιαίτερος δυσμενείς	Σκωτία 1993
10	Bright Artemis	4500	0	480	0	-	Δυσμενείς	Περσικός Κόλπος 2006
11	Christos Bitas	5000	360	15	15	Βραχώδης	Δυσμενείς	Ουαλία 1978
12	Coral Bulker	700	8	1	30	Αμμώδης	Δυσμενείς	Πορτογαλία 2000
13	Erika	20000	1200	48	450	Μικτή	Δυσμενείς	Γαλλία 1999
14	Exxon Valdez	38500	3800	10	800	Μικτή	Καλές	ΗΠΑ 1989
15	Haven	144000	2000	3	110	Μικτή	Καλές	Ιταλία 1999
16	Hebei Spirit	10000	1500	4	300	Μικτή	Καλές	Κορέα 2007
17	Interceptor	10	6	1	1	Αμμώδης	Δυσμενείς	Ελλάδα 2008
18	Lebanon	15000	350	0	100	Μικτή	Ισχυροί άνεμοι	Λίβανος 2006
19	Mara A	3	16	0	3	Μικτή	Καλές	Ελλάδα 2008
20	Prestige	64000	52000	250	130	Μικτή	Δυσμενείς	Ισπανία 2002
21	Riga Sailor	180	220	0	2	Μικτή	Καλές	Ελλάδα 2006
22	Rose G	11	8	1	1	Αμμώδης	Καλές	Ελλάδα 2009
23	Sea Diamond	486	550	1	5	Μικτή	Καλές	Ελλάδα 2007
24	Sea Empress	73000	8500	0	200	Μικτή	Ισχυρά ρεύματα	Ηνωμένο Βασίλειο 1996
25	Selendang Ayu	1203	0	0	110	Βραχώδης	Ιδιαίτερος δυσμενείς	ΗΠΑ 2004
26	Tanio	6000	0	50	150	Μικτή	Ιδιαίτερος δυσμενείς	Γαλλία 1980
27	Tasman Spirit	27000	140	4	6	Αμμώδης	Δυσμενείς	Πακιστάν 2003
28	Θεόφιλος	1.5	1.1	3	4	Μικτή	Ισχυροί άνεμοι	Ελλάδα 2008
29	Μυρτιδιώτισσα	60	100	1	1	Βραχώδης	Ισχυροί άνεμοι	Ελλάδα 2008
30	Παναγιώτης Π.	34	22	0	1	Μικτή	Ισχυροί άνεμοι	Ελλάδα 2008

Πίνακας 4.9.: Παρουσίαση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων και της ποσότητας που παράχθηκε σε κάθε περιστατικό

A/A	Όνομα Πλοίου	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	Ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons)	Απόσταση από ακτή (km)	Προσβληθέν μήκος ακτογραμμής (km)	Είδος ακτής	Καιρικές συνθήκες	Ικανότητα αντιμετώπισης	Στερεά απόβλητα (tons)
1	Aegean Sea	67000	3000	4	300	3	2	2	1200
2	Amazzone	2100	5	111	450	3	2	2	20000
3	Amoco Cadiz	227000	100000	5	360	3	2	3	120000
4	Aragon	25000	0	60	5	2	3	2	14000
5	Athos 1	1000	500	3	200	2	1	1	17800
6	Baltic Carrier	2700	2000	35	50	3	2	2	10750
7	Black Sea Storm	1333	0	2	10	3	3	2	14700
8	Boehlen	7000	1000	20	20	1	2	3	8000
9	Braer	84500	0	1	600	2	3	2	2000
10	Bright Artemis	4500	0	480	0	1	2	2	0
11	Christos Bitas	5000	360	15	15	1	2	3	25
12	Coral Bulker	700	8	1	30	3	2	2	360
13	Erika	20000	1200	48	450	2	2	2	250000
14	Exxon Valdez	38500	3800	10	800	2	1	2	25000
15	Haven	144000	2000	3	110	2	1	2	1500
16	Hebei Spirit	10000	1500	4	300	2	1	1	9200
17	Interceptor	10	6	1	1	3	2	1	2
18	Lebanon	15000	350	0	100	2	2	2	3980
19	Mara A	3	16	0	3	2	1	1	11
20	Prestige	64000	52000	250	130	2	2	2	96000
21	Riga Sailor	180	220	0	2	2	1	1	210
22	Rose G	11	8	1	1	3	1	1	3
23	Sea Diamond	486	550	1	5	2	1	1	225
24	Sea Empress	73000	8500	0	200	2	2	2	3000
25	Selendang Ayu	1203	0	0	110	1	3	1	3900
26	Tanio	6000	0	50	150	2	3	3	80000
27	Tasman Spirit	27000	140	4	6	3	2	3	2500
28	Θεόφιλος	1.5	1.1	3	4	2	2	1	1.2
29	Μυρτιδιώτισσα	60	100	1	1	1	2	1	6
30	Παναγιώτης Π.	34	22	0	1	2	2	1	13

4.4. Πορεία υπολογισμών

Όπως έγινε κατανοητό τόσο από το σχήμα 4.1., όσο και από την παρουσίαση των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη του μοντέλου στο τρίτο κεφάλαιο, για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι της στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης (απλής και πολλαπλής) και της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης. Προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί χρησιμοποιήθηκε το “Excel” και το στατιστικό πακέτο “SPSS 17.0”.

Αρχικά, έγινε ανάλυση των δεδομένων που περιέχονται στις βάσεις δεδομένων για τα υγρά και για τα στερεά απόβλητα με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης ήταν η ανάδειξη των μεταβλητών που πραγματικά επηρεάζουν την παραγωγή αποβλήτων με κριτήρια την τιμή του «R τετράγωνο» και την τιμή “P” (“P value”).

Στη συνέχεια, έγινε χρήση της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την επεξεργασία των «σημαντικών» μεταβλητών έτσι όπως αυτές προέκυψαν από την πολλαπλή παλινδρόμηση. Στο πλαίσιο της ανάλυσης με τη μέθοδο της απλής στατιστικής παλινδρόμησης, απομονώθηκαν και κάποιες ακραίες τιμές (“outliers”) προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου.

Όμως, σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο δεν πληρούσε όλες τις προϋποθέσεις εφαρμογής της στατιστικής παλινδρόμησης. Κατά συνέπεια, κρίθηκε αναγκαία η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε η ασαφής γραμμική παλινδρόμηση για τις «σημαντικές» μεταβλητές που προέκυψαν από την πολλαπλή παλινδρόμηση.

Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε η εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα. Όμως, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αιτιολογηθεί η επιλογή της μεθόδου ασαφούς παλινδρόμησης που χρησιμοποιήθηκε τελικά. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τέσσερις μέθοδοι ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης. Για την επεξεργασία των δεδομένων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η μέθοδος της ανάλυσης διαστημάτων (Interval regression). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ειδική περίπτωση της μεθόδου ελαχιστοποίησης της ασάφειας όταν ο βαθμός εμπιστοσύνης h ισούται με το μηδέν. Η επιλογή της μεταξύ των άλλων μεθόδων βασίζεται στο γεγονός ότι προσφέρει τη δυνατότητα ένταξης όλων των ασαφών δεδομένων εντός ενός μοντέλου ασαφούς παλινδρόμησης.

Η μέθοδος της ανάλυσης διαστημάτων στηρίζεται στον γραμμικό προγραμματισμό, όπως και η μέθοδος ελαχιστοποίησης της ασάφειας. Όμως, κατά την εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού, είναι πιθανό να παρουσιαστούν κάποια προβλήματα καθώς αυξάνεται ο αριθμός του συνόλου των δεδομένων. Κάθε σύνολο δεδομένων αντιστοιχεί σε δύο περιορισμούς κατά τον σχηματισμό του μοντέλου ασαφούς παλινδρόμησης. Κατά συνέπεια, όσο αυξάνεται το δείγμα των δεδομένων, ανάλογα αυξάνεται και ο αριθμός των περιορισμών. Αυτή η αύξηση των περιορισμών μπορεί να επιφέρει δυσκολίες στους υπολογισμούς. Επιπλέον, κάθε φορά που προστίθεται η αφαιρείται μια μεταβλητή από το μοντέλο, θα πρέπει να σχηματιστεί εξ' αρχής το σύνολο των περιορισμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα

5.1. Επεξεργασία των δεδομένων για τα υγρά απόβλητα

5.1.1. Εφαρμογή της μεθόδου της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης στα δεδομένα για τα υγρά απόβλητα

Σε αυτό το πρώτο βήμα για την ανάλυση των δεδομένων για τα υγρά απόβλητα, εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 4.6. στο “Excel” όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 5.1.: Στατιστικά του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα

Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.819
R Τετράγωνο	0.671
Τυπικό σφάλμα	12988.749
Μέγεθος δείγματος	30

Πίνακας 5.2.: Ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	5	8.596E+09	1.72E+09	10.189	2.493E-05
Υπόλοιπο	25	4.218E+09	1.69E+08		
Σύνολο	30	1.281E+10			

Πίνακας 5.3.: Παράμετροι του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	0.327	0.054	6.026	2.71E-06
Είδος πετρελαίου	4423.578	2658.341	1.664	0.109
Καιρικές συνθήκες	-2998.728	3557.788	-0.843	0.407
Απόσταση από ακτή (km)	43.474	25.828	1.683	0.105
Ικανότητα αντιμετώπισης	-4673.077	4261.789	-1.097	0.283

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρατίθενται στον Πίνακα 5.3., ισχύει $p < 0.05$ μόνο για την ανεξάρτητη μεταβλητή «Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)», γεγονός που υποδεικνύει ότι αυτή η μεταβλητή επηρεάζει ουσιαστικά την παραγωγή υγρών αποβλήτων. Η εξέλιξη αυτή αναμενόταν και έχει τονιστεί σε προηγούμενη ενότητα. Όμως, δεν μπορούσαν να αγνοηθούν οι υπόλοιπες παράμετροι και για τον λόγο αυτό διεξήχθη η παραπάνω ανάλυση. Το αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης υποδεικνύει επίσης την ανάγκη περαιτέρω ανάλυσης της σχέσης που συνδέει την παραγωγή αποβλήτων με το πετρέλαιο που διαφεύγει στη θάλασσα.

5.1.2. Εφαρμογή της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή υγρών αποβλήτων με το πετρέλαιο που διαφεύγει στη θάλασσα

Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, εισήχθησαν στο “Excel” τα δεδομένα για τα υγρά απόβλητα και τις ποσότητες πετρελαίου που διέφυγαν στη θάλασσα. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης σε αυτά τα δεδομένα, φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες και στο Σχήμα 5.1.

Πίνακας 5.4.: Στατιστικά του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διαφεύγει στη θάλασσα και παραγωγής υγρών αποβλήτων

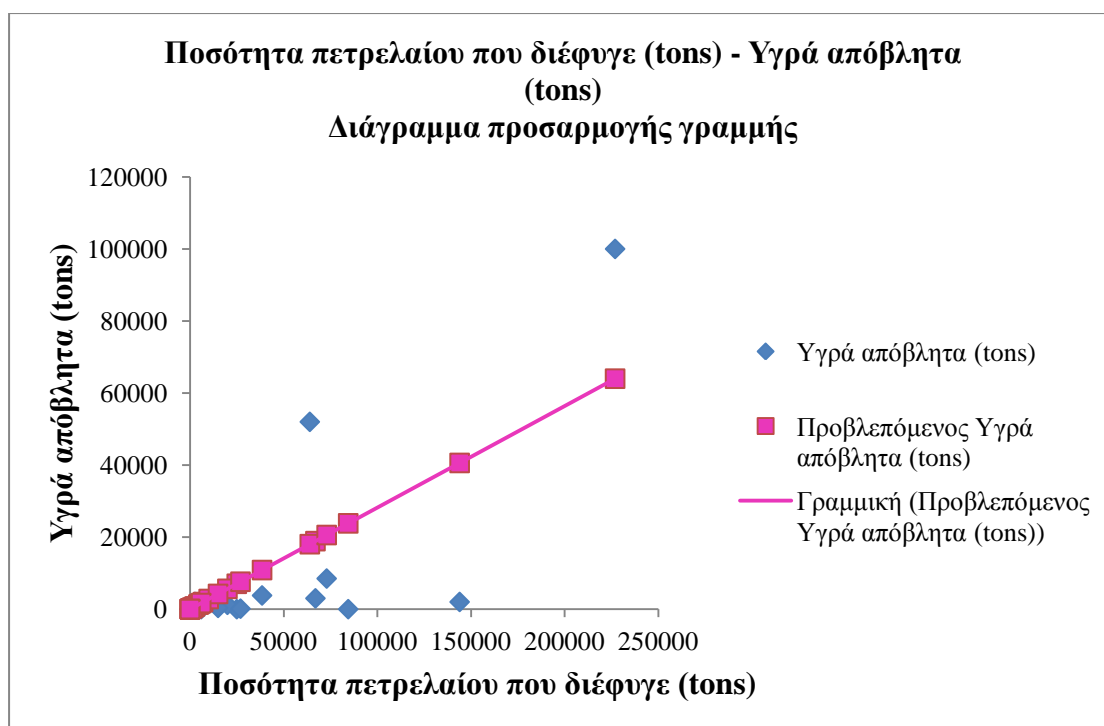
Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.776
R Τετράγωνο	0.602
Τυπικό σφάλμα	13268.633
Μέγεθος δείγματος	30

Πίνακας 5.4.: Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διαφεύγει στη θάλασσα και παραγωγής υγρών αποβλήτων

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	7.708E+09	7.708E+09	43.779	3.542E-07
Υπόλοιπο	29	5.106E+09	1.761E+08		
Σύνολο	30	1.281E+10			

Πίνακας 5.4.: Παράμετροι του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διαφεύγει στη θάλασσα και παραγωγής υγρών αποβλήτων

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	0.282	0.043	6.617	2.98E-07



Σχήμα 5.1.: Διάγραμμα προσαρμογής γραμμής ποσότητας πετρελαίου που διέφυγε (tons) - υγρών αποβλήτων (tons)

Συνεπώς, το μοντέλο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το:

$$y = 0.282 \cdot x$$

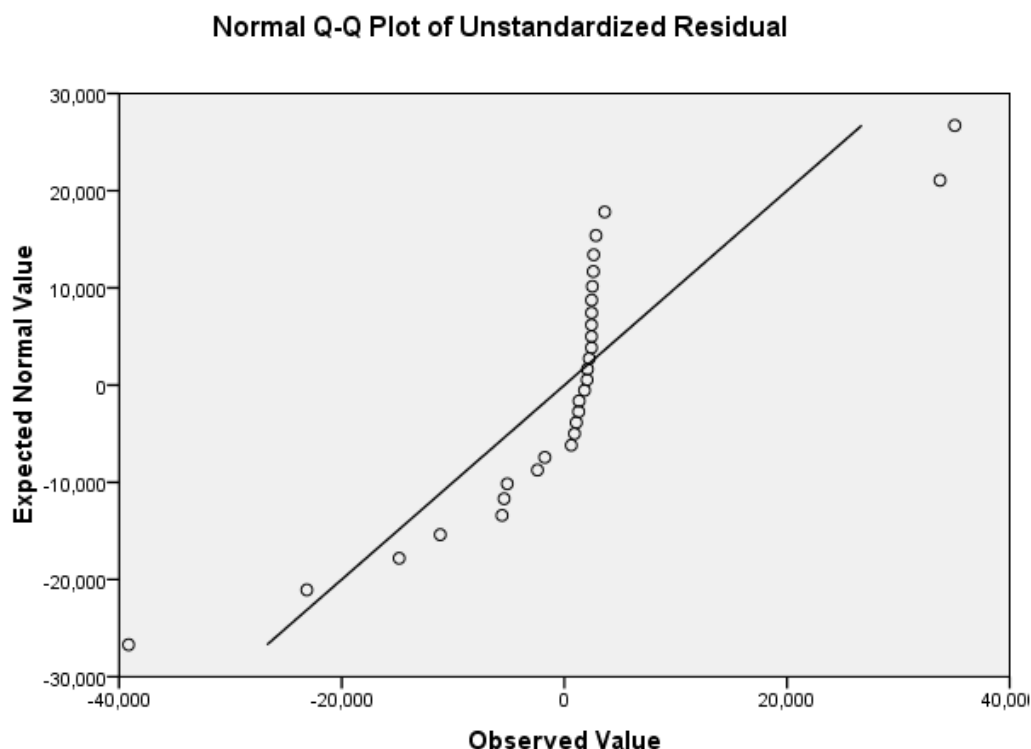
όπου, y : η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons)
 x : η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)

Έχει ήδη αναφερθεί ότι ένα μοντέλο παλινδρόμησης θεωρείται ότι δίνει «καλές προβλέψεις» για $R^2 > 0.7$. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι $R^2 = 0.6 < 0.7$ γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο μάλλον δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο αλλά καθώς είναι κοντά στο 0.7, δε θεωρείται αναγκαία η απόρριψη του με βάση αυτήν την παρατήρηση.

Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου αποτελεί το χαμηλό μέσο τετράγωνο των καταλοίπων (σε σχέση με το μέσο τετράγωνο των δεδομένων). Πράγματι, το $1.761E+08$ είναι κατά πολύ μικρότερο από το $7.708E+09$, οπότε η απαίτηση αυτή καλύπτεται.

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση του μοντέλου μέσω του έλεγχου των προϋποθέσεων εφαρμογής του. Ο έλεγχος των προϋποθέσεων συνίσταται στον έλεγχο κανονικότητας των καταλοίπων, τον έλεγχο ανεξαρτησίας των καταλοίπων, τον έλεγχο γραμμικότητας των καταλοίπων και τον έλεγχο ομοσκεδαστικότητας των καταλοίπων. Οι έλεγχοι αυτοί δεν χρησιμεύουν στη διαφοροποίηση των αριθμητικών παραμέτρων του μοντέλου, αλλά αποκλειστικά στην αξιολόγηση του. Εφόσον αυτοί οι έλεγχοι παρέχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο παρέχει μια αρκετά αξιόπιστη προσέγγιση των δεδομένων. Σε περίπτωση που οι έλεγχοι αυτοί δεν ικανοποιούνται, μπορεί και πάλι να γίνει αποδοχή του μοντέλου αλλά με επιφυλάξεις ως προς την αξιοπιστία του.

Με τη βοήθεια του προγράμματος “SPSS 17.0”, έγινε διαγραμματικός έλεγχος της κανονικότητας των καταλοίπων. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 5.2.), στο οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της κατανομής των καταλοίπων από την κανονική.



Σχήμα 5.2.: Διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Unstandardized residuals)

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι τα κατάλοιπα του παραπάνω μοντέλου δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα παραβιάζεται μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου (κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή των υπόλοιπων ελέγχων). Επομένως, η παραπάνω μορφή του μοντέλου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων και επιλέχθηκε η μέθοδος της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης για λόγους που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα.

5.1.3. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή υγρών αποβλήτων με το πετρέλαιο που διαφεύγει στη θάλασσα

Από τις μεθόδους ασαφούς παλινδρόμησης που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο, επιλέχθηκε η μέθοδος της ανάλυσης διαστημάτων (Interval regression). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ειδική περίπτωση της μεθόδου ελαχιστοποίησης της ασάφειας όταν ο βαθμός εμπιστοσύνης h ισούται με το μηδέν. Η επιλογή της μεταξύ των άλλων μεθόδων βασίζεται στο γεγονός ότι προσφέρει τη δυνατότητα ένταξης όλων των ασαφών δεδομένων εντός ενός μοντέλου ασαφούς παλινδρόμησης.

Στόχος της ανάλυσης με αυτή τη μέθοδο είναι να προκύψει μια σχέση της μορφής:

$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X$$

$$\text{όπου, } \tilde{A}_0 = m_0, c_0 \text{ και } \tilde{A}_1 = m_1, c_1$$

είναι οι ασαφείς παράμετροι παλινδρόμησης, οι οποίες υπολογίζονται μέσω των ακόλουθων σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού:

$$\text{Ελαχιστοποίηση} \quad nc_0 + c_1 \sum_{i=1}^n X_i$$

Με περιορισμούς: $c_0 \geq 0$ και $c_1 \geq 0$,

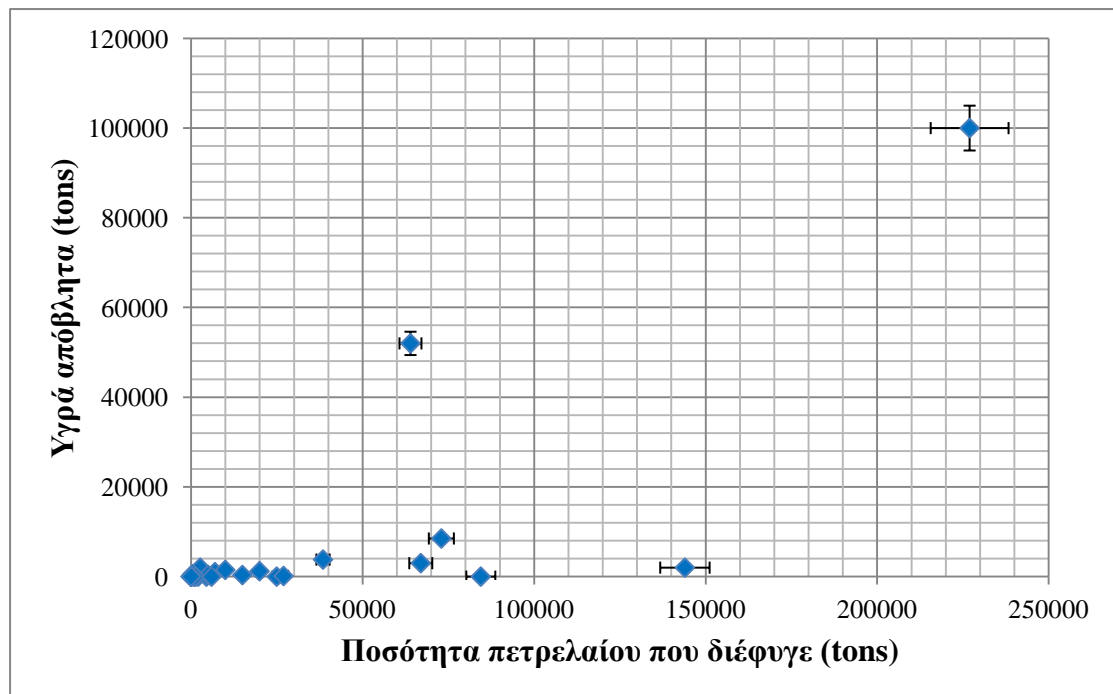
$$m_0 - c_0 + m_1 - c_1 X_i \leq Y_{i,L}, \text{ για } i = 1, \dots, n$$

$$m_0 + c_0 + m_1 + c_1 X_i \geq Y_{i,U}, \text{ για } i = 1, \dots, n$$

όπου $Y_{i,L}$ και $Y_{i,U}$ είναι τα κάτω και άνω όρια για κάθε ασαφές δεδομένο, αντίστοιχα και δίνονται από τις σχέσεις:

$$Y_{i,L} = Y_i - e_i, \quad Y_{i,U} = Y_i + e_i.$$

Ο υπολογισμός του ασαφούς ημιπλάτους e_i για κάθε ασαφές κέντρο Y_i , έγινε με χρήση διαγράμματος διασποράς των δεδομένων, όπου εισήχθησαν γραμμές σφάλματος (Σχήμα 5.3.).



Σχήμα 5.3.: Διάγραμμα για τον υπολογισμό του ασαφούς ημιπλάτους e_i για κάθε ασαφές κέντρο Y_i .

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της ασαφούς παλινδρόμησης.

Πίνακας 5.5.: Δεδομένα για την εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε στη θάλασσα (tons) και υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons).

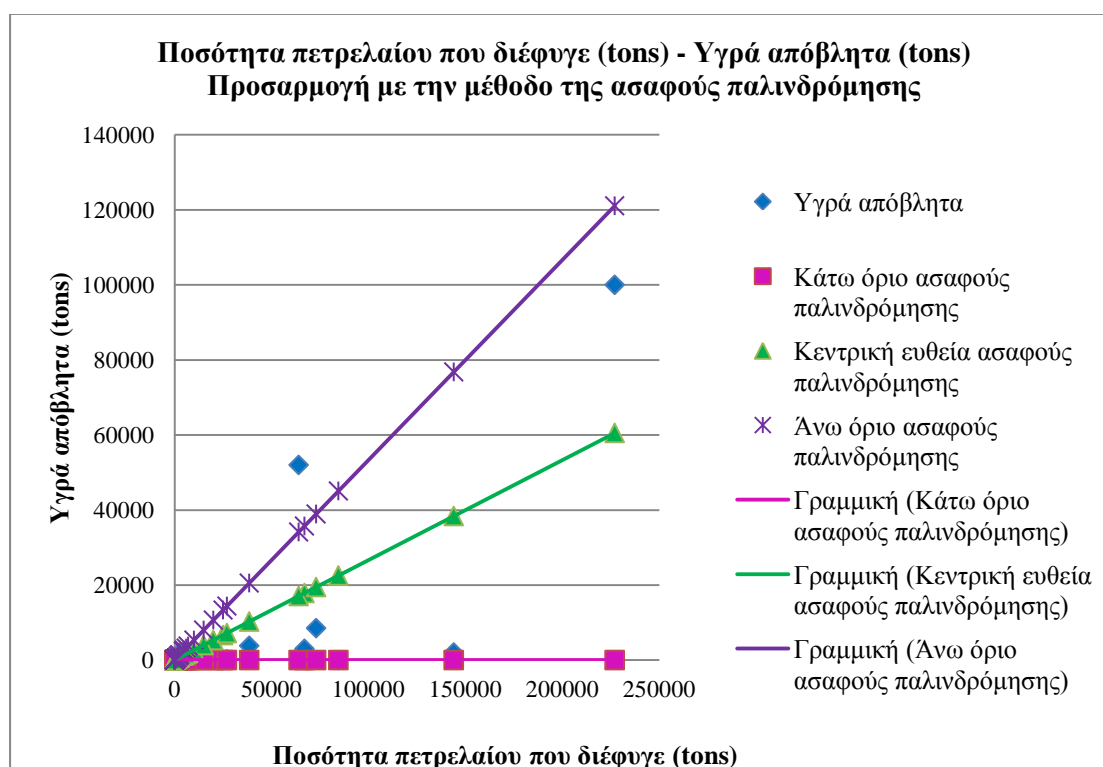
A/A	Όνομα Πλοίου	$X_i =$	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	$Y_i =$	Υγρά απόβλητα (tons)	e_i	
1	Aegean Sea	$X_1 =$	67000	$Y_1 =$	3000	$e_1 =$	350
2	Amazzone	$X_2 =$	2100	$Y_2 =$	5	$e_2 =$	0
3	Amoco Cadiz	$X_3 =$	227000	$Y_3 =$	100000	$e_3 =$	5000
4	Aragon	$X_4 =$	25000	$Y_4 =$	0	$e_4 =$	0
5	Athos 1	$X_5 =$	1000	$Y_5 =$	500	$e_5 =$	30
6	Baltic Carrier	$X_6 =$	2700	$Y_6 =$	2000	$e_6 =$	250
7	Black Sea Storm	$X_7 =$	1333	$Y_7 =$	0	$e_7 =$	0
8	Boehlen	$X_8 =$	7000	$Y_8 =$	1000	$e_8 =$	150
9	Braer	$X_9 =$	84500	$Y_9 =$	0	$e_9 =$	0
10	Bright Artemis	$X_{10} =$	4500	$Y_{10} =$	0	$e_{10} =$	0
11	Christos Bitas	$X_{11} =$	5000	$Y_{11} =$	360	$e_{11} =$	15
12	Coral Bulker	$X_{12} =$	700	$Y_{12} =$	8	$e_{12} =$	0
13	Erika	$X_{13} =$	20000	$Y_{13} =$	1200	$e_{13} =$	150
14	Exxon Valdez	$X_{14} =$	38500	$Y_{14} =$	3800	$e_{14} =$	300
15	Haven	$X_{15} =$	144000	$Y_{15} =$	2000	$e_{15} =$	120
16	Hebei Spirit	$X_{16} =$	10000	$Y_{16} =$	1500	$e_{16} =$	100
17	Interceptor	$X_{17} =$	10	$Y_{17} =$	6	$e_{17} =$	0
18	Lebanon Conflict	$X_{18} =$	15000	$Y_{18} =$	350	$e_{18} =$	10
19	Mara A	$X_{19} =$	3	$Y_{19} =$	16	$e_{19} =$	0
20	Prestige	$X_{20} =$	64000	$Y_{20} =$	52000	$e_{20} =$	2800
21	Riga Sailor	$X_{21} =$	180	$Y_{21} =$	220	$e_{21} =$	5
22	Rose G	$X_{22} =$	11	$Y_{22} =$	8	$e_{22} =$	0
23	Sea Diamond	$X_{23} =$	486	$Y_{23} =$	550	$e_{23} =$	30
24	Sea Empress	$X_{24} =$	73000	$Y_{24} =$	8500	$e_{24} =$	700
25	Selendang Ayu	$X_{25} =$	1203	$Y_{25} =$	0	$e_{25} =$	0
26	Tanio	$X_{26} =$	6000	$Y_{26} =$	0	$e_{26} =$	0
27	Tasman Spirit	$X_{27} =$	27000	$Y_{27} =$	140	$e_{27} =$	3
28	Θεόφιλος	$X_{28} =$	1.5	$Y_{28} =$	1.1	$e_{28} =$	0
29	Μυρτιδιώτισσα	$X_{29} =$	60	$Y_{29} =$	100	$e_{29} =$	2
30	Παναγιώτης Π.	$X_{30} =$	34	$Y_{30} =$	22	$e_{30} =$	0

Για την επίλυση των σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού, όπου εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 5.5., έγινε χρήση της εφαρμογής «Επίλυση» (“Solver”) του “Excel”. Η σχέση που προέκυψε παρατίθεται παρακάτω:

$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X \Rightarrow \hat{Y} = 0,0 + 0.267,0.267 X$$

Η παράμετρος \tilde{A}_0 , ορίστηκε ίση με το μηδέν (όπως και στην περίπτωση της στατιστικής παλινδρόμησης), αφού αν δεν διαφύγει πετρέλαιο στη θάλασσα δεν αναμένεται παραγωγή αποβλήτων.

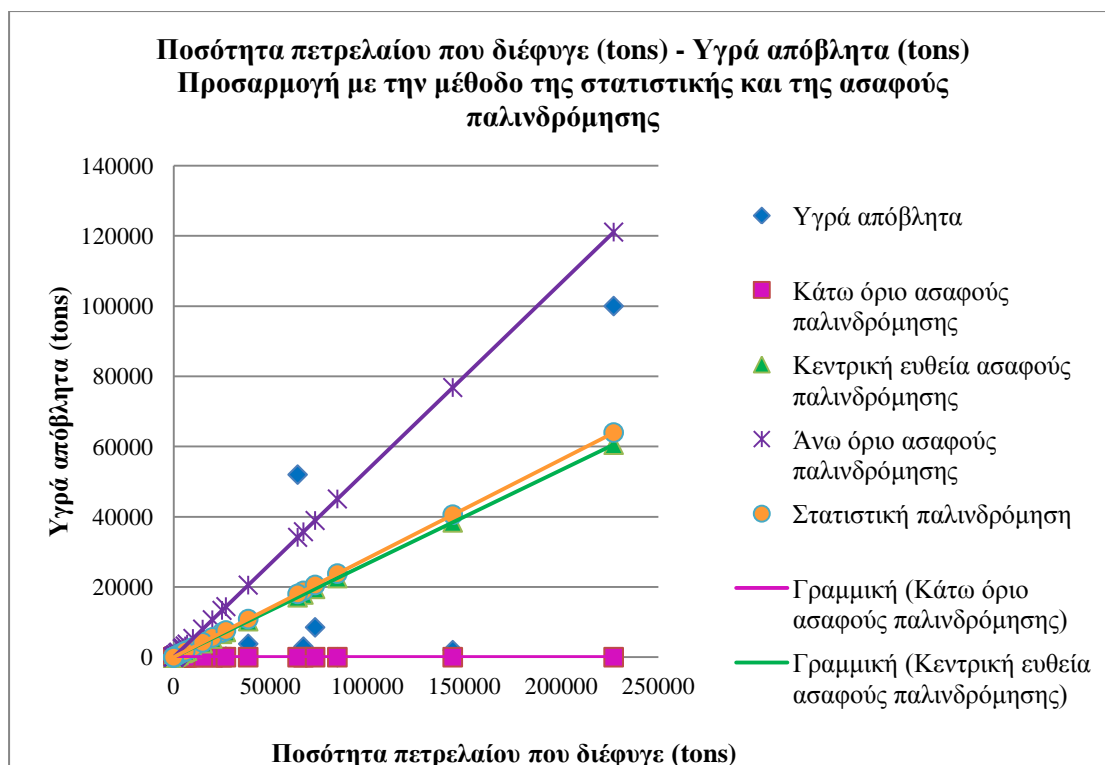
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ασαφούς παλινδρόμησης.



Σχήμα 5.4.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε (tons) και την παραγωγή υγρών αποβλήτων (tons).

Παρατηρείται ότι το ασαφές κέντρο της παραμέτρου \tilde{A}_1 είναι πολύ κοντά με το αποτέλεσμα που προέκυψε από την στατιστική παλινδρόμηση. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται και γραφικά στο ακόλουθο διάγραμμα.

Από την παρατήρηση του διαγράμματος του σχήματος 5.4., γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος που δίνει η ασαφής παλινδρόμηση είναι αρκετά μεγάλο. Συγκεκριμένα, πιο προβληματικό δείχνει να είναι το κάτω όριο της ασαφούς παλινδρόμησης, αφού υπαγορεύει ότι είναι πιθανό να διαφύγει πετρέλαιο στη θάλασσα και να μην παραχθούν υγρά απόβλητα. Η διαπίστωση αυτή δεν είναι παράλογη αφού όπως φαίνεται και από τα δεδομένα, κάτι τέτοιο έχει συμβεί σε αρκετές περιπτώσεις και μπορεί να ξανασυμβεί. Η αιτία αυτού του αποτελέσματος είναι το γεγονός ότι η παραγωγή υγρών αποβλήτων εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους παρά το γεγονός ότι κατά την ανάλυση τους δεν προέκυψε κάποια ισχυρή σχέση που να τις συνδέει.



Σχήμα 5.5.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε (tons) και την παραγωγή υγρών αποβλήτων (tons).

Από την παραπάνω ανάλυση της ασαφούς παλινδρόμησης, έγινε σαφές ότι είναι αναγκαία η αφαίρεση κάποιων ακραίων τιμών (outliers) από τα δεδομένα, προκειμένου να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό, στις ακόλουθες ενότητες, θα διεξαχθεί ξανά η στατιστική και η ασαφής παλινδρόμηση για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε και την παραγωγή υγρών αποβλήτων, χωρίς τις ακραίες τιμές.

5.1.4. Εφαρμογή της μεθόδου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή υγρών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers)

Προκειμένου να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη σχέση που συνδέει την ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε στη θάλασσα με την παραγωγή υγρών αποβλήτων (κυρίως με τη μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης), κρίθηκε αναγκαία η «απομάκρυνση» ορισμένων περιστατικών από την βάση δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να επαναληφθεί η ανάλυση με τις μεθόδους της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης, χωρίς να συμπεριληφθούν τα περιστατικά όπου η ποσότητα υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν ήταν μικρότερη από το 14% της ποσότητας πετρελαίου που διέφυγε.

Μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers), η ανάλυση βασίστηκε στα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο “Excel” όπου έγινε εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται στους πίνακες 5.7., 5.8., 5.9. και στο σχήμα 5.6..

Πίνακας 5.6.: Δεδομένα για την ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε και την παραγωγή υγρών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).

A/A	Όνομα Πλοίου	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	Υγρά απόβλητα (tons)
1	Amoco Cadiz	227000	100000
2	Athos 1	1000	500
3	Baltic Carrier	2700	2000
4	Boehlen	7000	1000
5	Hebei Spirit	10000	1500
6	Interceptor	10	6
7	Mara A	3	16
8	Prestige	64000	52000
9	Riga Sailor	180	220
10	Rose G	11	8
11	Sea Diamond	486	550
12	Θεόφιλος	1.5	1.1
13	Μυρτιδιώτισσα	60	100
14	Παναγιώτης Π.	34	22

Πίνακας 5.7.: Στατιστικά του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

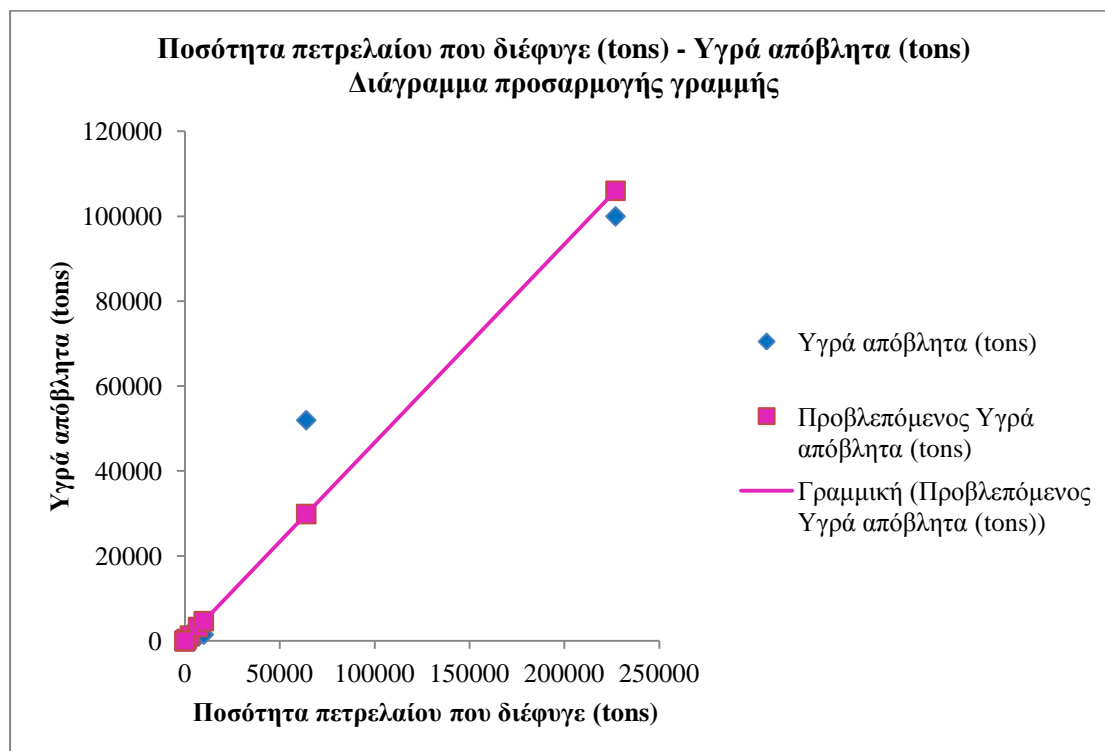
Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.978
R Τετράγωνο	0.957
Τυπικό σφάλμα	6450.527
Μέγεθος δείγματος	14

Πίνακας 5.8.: Ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	1.217E+10	1.217E+10	292.505	8.60E-10
Υπόλοιπο	13	5.409E+8	4.161E+7		
Σύνολο	14	1.271E+10			

Πίνακας 5.9.: Παράμετροι του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	0.467	0.027	17.103	2.71E-10



Σχήμα 5.6.: Διάγραμμα προσαρμογής γραμμής ποσότητας πετρελαίου που διέφυγε (tons) - υγρών αποβλήτων (tons) μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Συνεπώς, το μοντέλο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το:

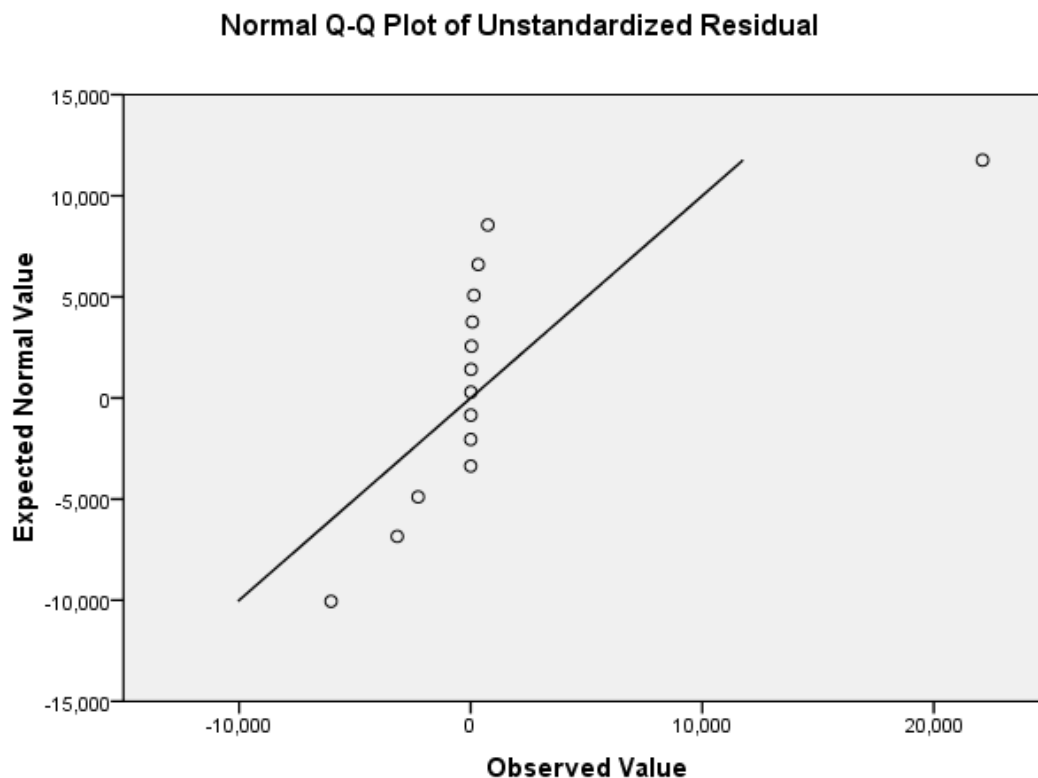
$$y = 0.467 \cdot x$$

όπου, y : η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons)
 x : η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)

Η ανάλυση απλής παλινδρόμησης για τα δεδομένα του πίνακα 5.6., δίνει $R^2 = 0.957 > 0.7$, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι μάλλον αξιόπιστο. Όμως, αυτή η παρατήρηση από μόνη της δεν αρκεί για την αποδοχή του μοντέλου χωρίς καμία επιφύλαξη.

Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου αποτελεί το χαμηλό μέσο τετράγωνο των καταλοίπων (σε σχέση με το μέσο τετράγωνο των δεδομένων). Πράγματι, το $4.161E+7$ είναι κατά πολύ μικρότερο από το $1.217E+10$, οπότε η απαίτηση αυτή καλύπτεται.

Σε αυτό το σημείο, θα ελεγχθεί η κανονικότητα των υπολοίπων με την βοήθεια του προγράμματος “SPSS 17.0”. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 5.7.), στο οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της κατανομής των καταλοίπων από την κανονική.



Σχήμα 5.7.: Διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Unstandardized residuals) της απλής γραμμικής στατιστικής ανάλυσης παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ ποσότητας πετρελαίου που διέφυγε και παραγωγής αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι τα κατάλοιπα του παραπάνω μοντέλου δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα παραβιάζεται μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου (κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή των υπόλοιπων ελέγχων). Επομένως, η παραπάνω μορφή του μοντέλου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Έτσι, κρίθηκε και πάλι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων με την μέθοδο της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.

5.1.5. Εφαρμογή της μεθόδου απλής ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης για την παραγωγή υγρών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers)

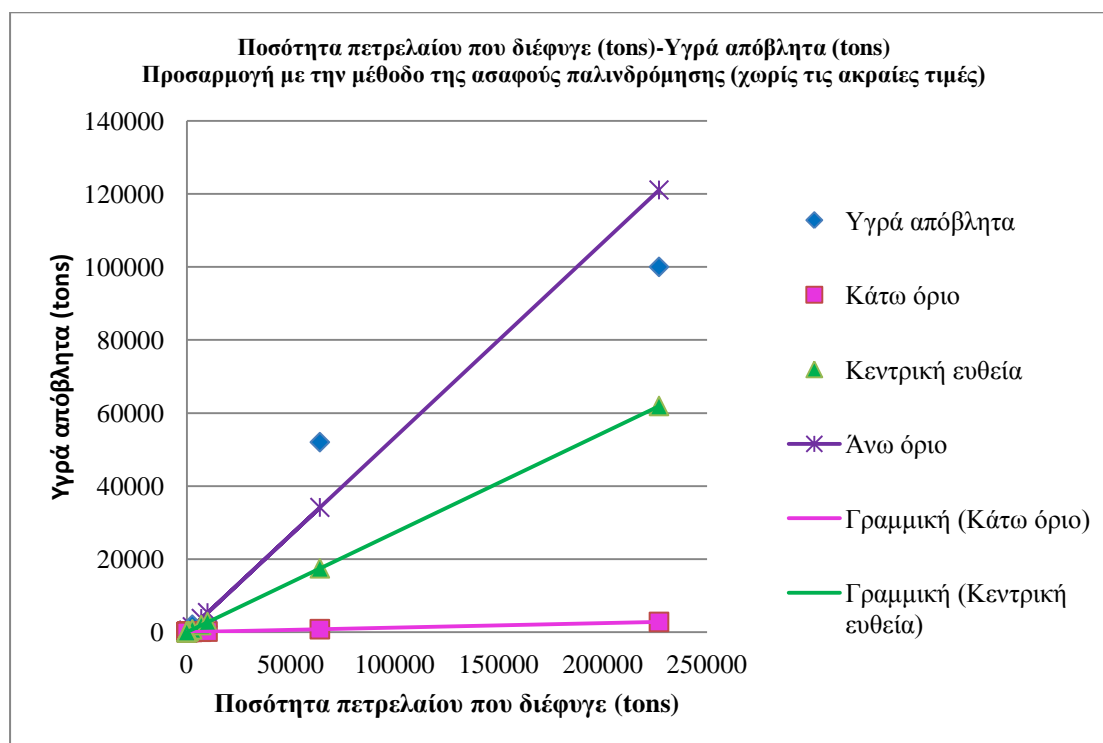
Θα χρησιμοποιηθεί και πάλι η ανάλυση διαστημάτων (Interval Regression). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10..

Για την επίλυση των σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού, όπου εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 5.10., έγινε χρήση της εφαρμογής «Επίλυση» (“Solver”) του “Excel”. Η σχέση που προέκυψε παρατίθεται παρακάτω:

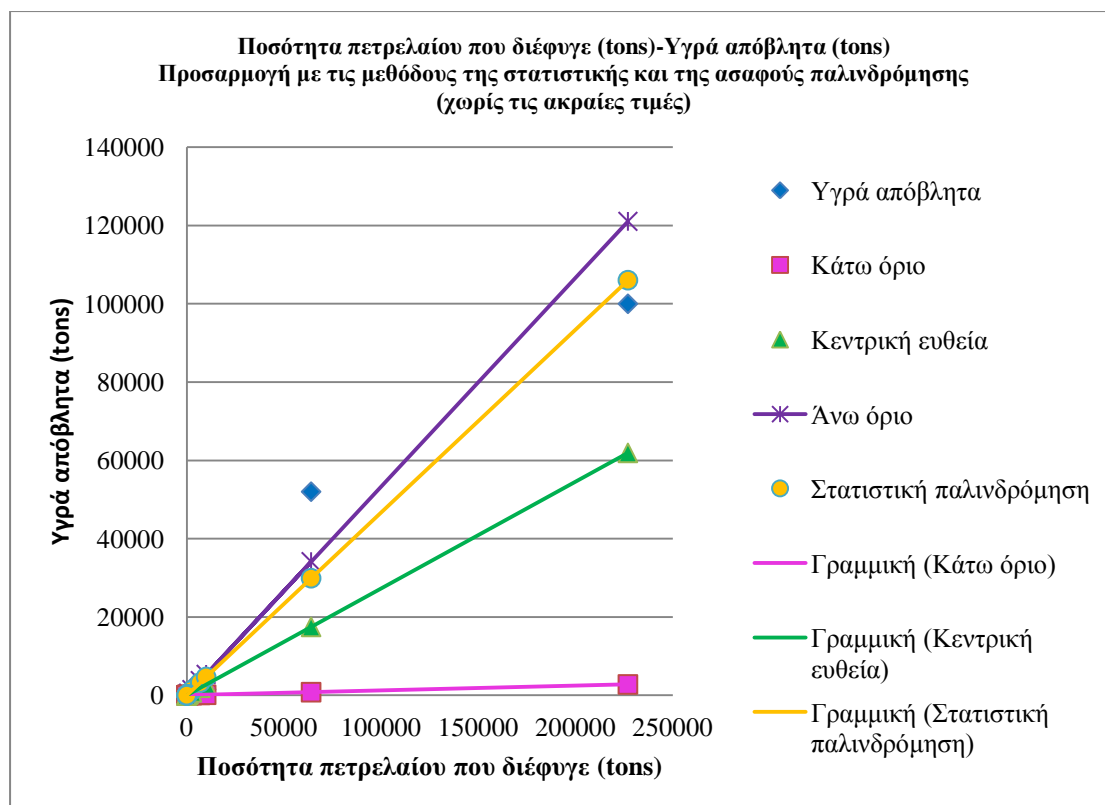
$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X \Rightarrow \hat{Y} = 0,0 + 0.273,0.261 X$$

Πίνακας 5.10.: Δεδομένα για την εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε στη θάλασσα και των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν χωρίς τις ακραίες τιμές.

A/A	Όνομα Πλοίου	$X_i =$	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	$Y_i =$	Υγρά απόβλητα (tons)	e_i	
1	Amoco Cadiz	$X_1 =$	227000	$Y_1 =$	100000	$e_1 =$	5000
2	Athos 1	$X_2 =$	1000	$Y_2 =$	500	$e_2 =$	30
3	Baltic Carrier	$X_3 =$	2700	$Y_3 =$	2000	$e_3 =$	250
4	Boehlen	$X_4 =$	7000	$Y_4 =$	1000	$e_4 =$	150
5	Hebei Spirit	$X_5 =$	10000	$Y_5 =$	1500	$e_5 =$	100
6	Interceptor	$X_6 =$	10	$Y_6 =$	6	$e_6 =$	0
7	Mara A	$X_7 =$	3	$Y_7 =$	16	$e_7 =$	0
8	Prestige	$X_8 =$	64000	$Y_8 =$	52000	$e_8 =$	2800
9	Riga Sailor	$X_9 =$	180	$Y_9 =$	220	$e_9 =$	5
10	Rose G	$X_{10} =$	11	$Y_{10} =$	8	$e_{10} =$	0
11	Sea Diamond	$X_{11} =$	486	$Y_{11} =$	550	$e_{11} =$	30
12	Θεόφιλος	$X_{12} =$	1.5	$Y_{12} =$	1.1	$e_{12} =$	0
13	Μυρτιδιώτισσα	$X_{13} =$	60	$Y_{13} =$	100	$e_{13} =$	2
14	Παναγιώτης Π.	$X_{14} =$	34	$Y_{14} =$	22	$e_{14} =$	0



Σχήμα 5.8.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε και την παραγωγή υγρών αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.



Σχήμα 5.9.: Διάγραμμα προσαρμογής με τις μεθόδους της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ πετρελαίου που διέφυγε και την παραγωγή υγρών αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.

Παραπάνω, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ασαφούς παλινδρόμησης για τα υγρά απόβλητα χωρίς τις ακραίες τιμές. Επιπλέον, στο διάγραμμα του σχήματος 5.9. γίνεται και γραφική σύγκριση της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης.

Μετά την «απομάκρυνση» των ακραίων τιμών παρατηρείται μια μικρή μείωση του ασαφούς εύρους της παραμέτρου \tilde{A}_1 , αλλά και μια απομάκρυνση της ευθείας της στατιστικής παλινδρόμησης από την κεντρική ευθεία της ασαφούς παλινδρόμησης. Παρόλα αυτά, η παραμονή της ευθείας της στατιστικής παλινδρόμησης εντός του εύρους της ασαφούς παλινδρόμησης είναι ενθαρρυντική και αποδεικνύει ότι μπορεί να γίνει χρήση της μιας μεθόδου για τον έλεγχο της άλλης.

5.2. Επεξεργασία των δεδομένων για τα στερεά απόβλητα

5.2.1. Εφαρμογή της μεθόδου της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης στα δεδομένα για τα στερεά απόβλητα

Όπως έγινε στην περίπτωση των υγρών αποβλήτων, έτσι και στην περίπτωση των στερεών αποβλήτων, η ανάλυση των δεδομένων ξεκίνησε με την εφαρμογή της μεθόδου της πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης. Για τον λόγο αυτό, εισήχθησαν στο "Excel" τα δεδομένα του Πίνακα 4.9., όπου επεξεργάστηκαν με την βοήθεια της εφαρμογής της «Παλινδρόμησης». Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 5.11.: Στατιστικά του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα στερεά απόβλητα

Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.677
R Τετράγωνο	0.458
Τυπικό σφάλμα	47211.704
Μέγεθος δείγματος	30

Πίνακας 5.12.: Ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα στερεά απόβλητα

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	7	4.332E+10	6.189E+9	2.777	0.031
Υπόλοιπο	23	5.127E+10	2.229E+9		
Σύνολο	30	9.459E+10			

Πίνακας 5.13.: Παράμετροι του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τα στερεά απόβλητα

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	-0.368	0.306	-1.203	0.241
Υγρά απόβλητα που συλλέχθηκαν (tons)	1.566	0.701	2.233	0.036
Απόσταση από ακτή (km)	7.569	97.162	0.078	0.939
Μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km)	96.029	46.977	2.044	0.053
Είδος ακτής	-5576.872	9847.483	-0.566	0.577
Καιρικές συνθήκες	2749.477	13192.089	0.208	0.837
Ικανότητα αντιμετώπισης	9240.305	14544.319	0.635	0.531

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρατίθενται στον Πίνακα 5.13., ισχύει $p < 0.05$ μόνο για την ανεξάρτητη μεταβλητή «Υγρά απόβλητα που συλλέχθηκαν (tons)», γεγονός που υποδεικνύει ότι αυτή η μεταβλητή επηρεάζει ουσιαστικά την παραγωγή στερεών αποβλήτων. Η εξέλιξη αυτή ήταν αναμενόμενη, αφού σε περίπτωση που επιτευχθεί συλλογή όλης της ποσότητας των υγρών αποβλήτων, δεν θα παραχθούν στερεά απόβλητα. Επιπλέον, στον Πίνακα 5.13. παρατηρείται ότι η μεταβλητή «Μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km)» έχει $p = 0.053$,

τιμή η οποία είναι οριακά πάνω από το 0.05. Κατά συνέπεια, θα συμπεριληφθεί στην περαιτέρω ανάλυση που θα ακολουθήσει.

5.2.2. Εφαρμογή της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέγεται με την παραγωγή στερεών αποβλήτων.

Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, εισήχθησαν στο “Excel” τα δεδομένα για τις ποσότητες υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και τις ποσότητες στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης σε αυτά τα δεδομένα, φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες και στο Σχήμα 5.10..

Πίνακας 5.14.: Στατιστικά του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ της ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και της ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

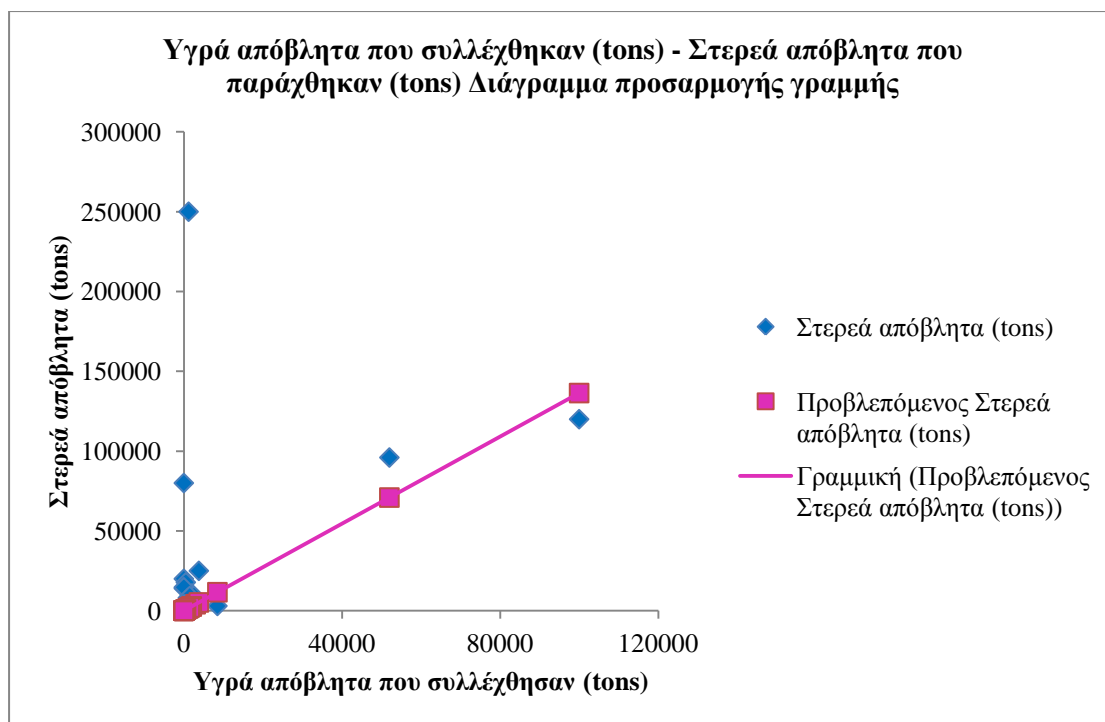
Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.502
R Τετράγωνο	0.252
Τυπικό σφάλμα	49396.405
Μέγεθος δείγματος	30

Πίνακας 5.15.: Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ της ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και της ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	2.383E+10	2.383E+10	9.766	0.004
Υπόλοιπο	29	7.076E+10	2.440E+9		
Σύνολο	30	9.459E+10			

Πίνακας 5.16.: Παράμετροι του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ της ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και της ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	1.364	0.436	3.125	0.004



Σχήμα 5.10.: Διάγραμμα προσαρμογής γραμμής ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons) - στερεών αποβλήτων (tons).

Συνεπώς, το μοντέλο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το:

$$y = 1.364 \cdot x$$

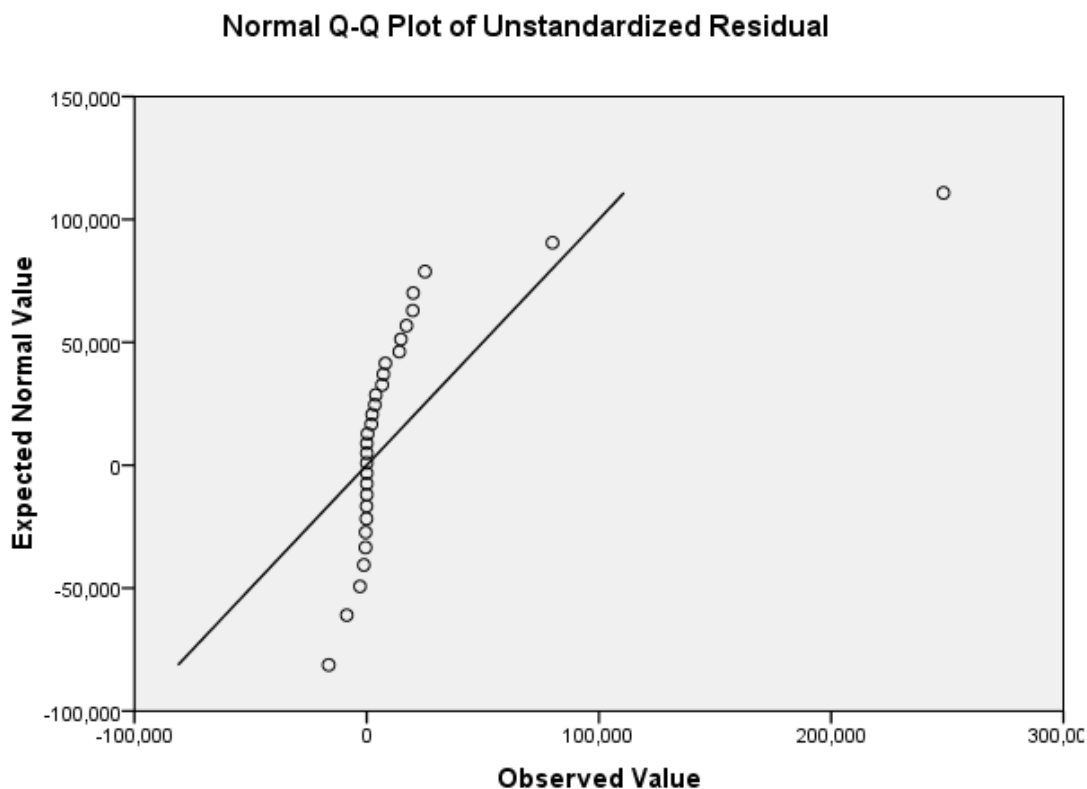
όπου, y : η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons)

x : η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)

Η παραπάνω ανάλυση με την μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης δίνει $R^2 = 0.25 < 0.7$ γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο δεν είναι αξιόπιστο. Παρόλα αυτά θα πραγματοποιηθούν και άλλοι έλεγχοι, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί ο έλεγχος του R^2 δεν αρκεί για την αποδοχή ή μη ενός μοντέλου.

Απαραίτητη προϋπόθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου αποτελεί το χαμηλό μέσο τετράγωνο των καταλοίπων (σε σχέση με το μέσο τετράγωνο των δεδομένων). Πράγματι, το $2.440E+9$ είναι κατά πολύ μικρότερο από το $2.383E+10$, οπότε η απαίτηση αυτή καλύπτεται.

Επιπλέον, με τη βοήθεια του προγράμματος “SPSS 17.0”, έγινε διαγραμματικός έλεγχος της κανονικότητας των καταλοίπων. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 5.11.), στο οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της κατανομής των καταλοίπων από την κανονική. Επομένως, συμπεραίνεται ότι τα κατάλοιπα του παραπάνω μοντέλου δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα παραβιάζεται μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου (κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή των υπόλοιπων ελέγχων). Κατά συνέπεια, η παραπάνω μορφή του μοντέλου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων με την μέθοδο της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.



Σχήμα 5.11.: Διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Unstandardized residuals)

5.2.3. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή στερεών αποβλήτων με την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέγεται

Θα χρησιμοποιηθεί και πάλι η ανάλυση διαστημάτων (Interval Regression). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.17..

Ο υπολογισμός του ασαφούς ημιπλάτους e_i για κάθε ασαφές κέντρο Y_i , έγινε με χρήση διαγράμματος διασποράς των δεδομένων, όπου εισήχθησαν γραμμές σφάλματος (Σχήμα 5.12.).

Για την επίλυση των σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού, όπου εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 5.17., έγινε χρήση της εφαρμογής «Επίλυση» (“Solver”) του “Excel”. Η σχέση που προέκυψε παρατίθεται παρακάτω:

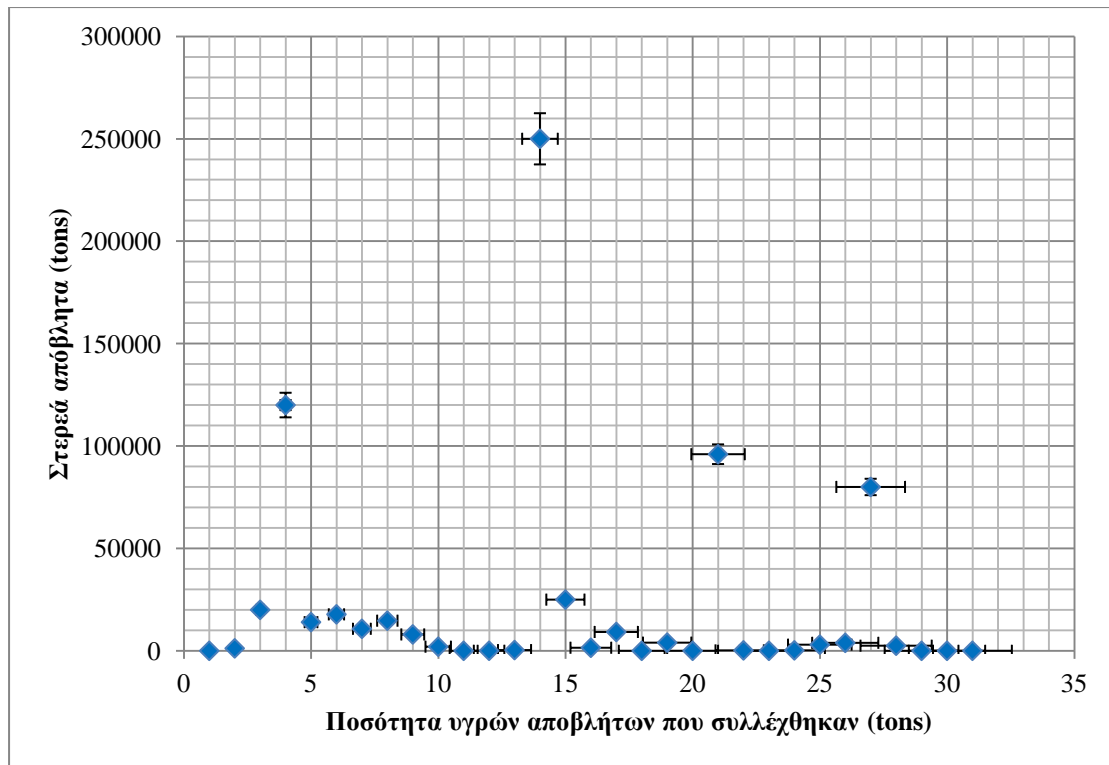
$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X \Rightarrow \hat{Y} = 0,0 + 1.745,0.786 X$$

Η παράμετρος \tilde{A}_0 , ορίστηκε ίση με το μηδέν (όπως και στην περίπτωση της στατιστικής παλινδρόμησης), αφού αν δεν υπάρξουν υγρά απόβλητα, δεν αναμένεται παραγωγή στερεών αποβλήτων.

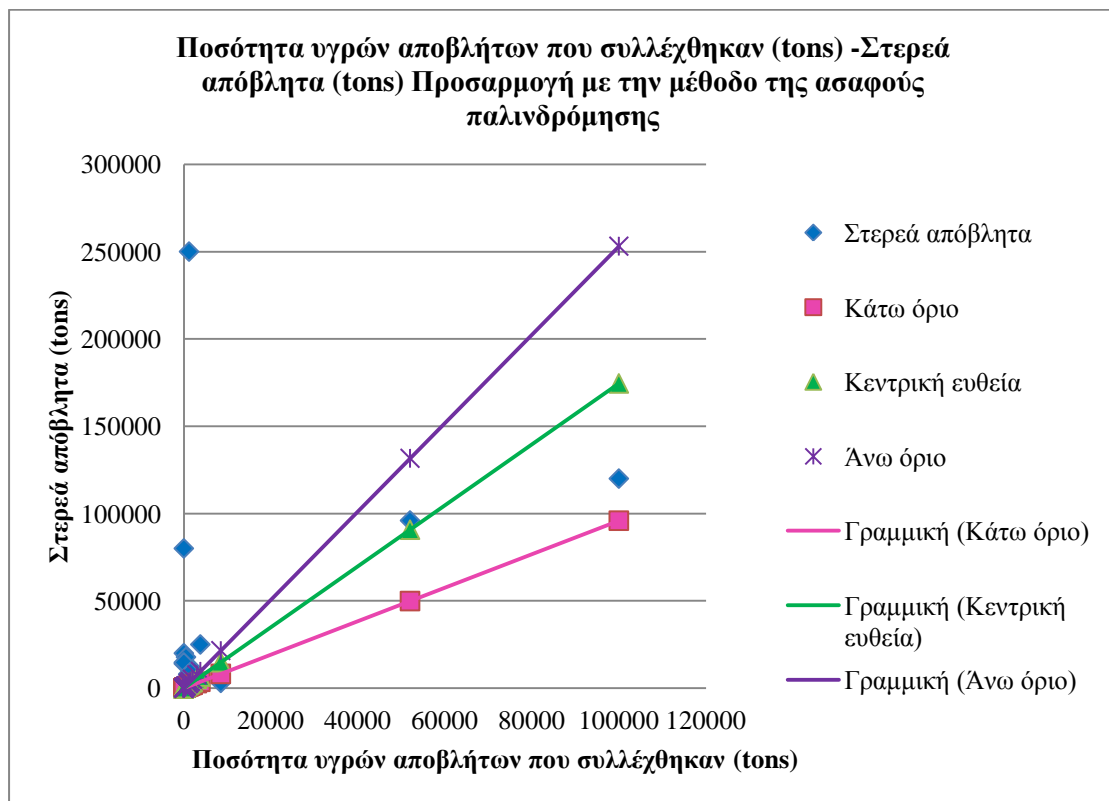
Πίνακας 5.17.: Δεδομένα για την εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons) και ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons).

A/A	Όνομα Πλοίου	$X_i =$	Υγρά απόβλητα που συλλέχθηκαν (tons)	$Y_i =$	Στερεά απόβλητα (tons)	e_i	
1	Aegean Sea	$X_1 =$	3000	$Y_1 =$	1200	$e_1 =$	60
2	Amazzone	$X_2 =$	5	$Y_2 =$	20000	$e_2 =$	1000
3	Amoco Cadiz	$X_3 =$	100000	$Y_3 =$	120000	$e_3 =$	6000
4	Aragon	$X_4 =$	0	$Y_4 =$	14000	$e_4 =$	700
5	Athos 1	$X_5 =$	500	$Y_5 =$	17800	$e_5 =$	900
6	Baltic Carrier	$X_6 =$	2000	$Y_6 =$	10750	$e_6 =$	500
7	Black Sea Storm	$X_7 =$	0	$Y_7 =$	14700	$e_7 =$	700
8	Boehlen	$X_8 =$	1000	$Y_8 =$	8000	$e_8 =$	400
9	Braer	$X_9 =$	0	$Y_9 =$	2000	$e_9 =$	100
10	Bright Artemis	$X_{10} =$	0	$Y_{10} =$	0	$e_{10} =$	0
11	Christos Bitas	$X_{11} =$	360	$Y_{11} =$	25	$e_{11} =$	1
12	Coral Bulker	$X_{12} =$	8	$Y_{12} =$	360	$e_{12} =$	20
13	Erika	$X_{13} =$	1200	$Y_{13} =$	250000	$e_{13} =$	12000
14	Exxon Valdez	$X_{14} =$	3800	$Y_{14} =$	25000	$e_{14} =$	1300
15	Haven	$X_{15} =$	2000	$Y_{15} =$	1500	$e_{15} =$	80
16	Hebei Spirit	$X_{16} =$	1500	$Y_{16} =$	9200	$e_{16} =$	450
17	Interceptor	$X_{17} =$	6	$Y_{17} =$	2	$e_{17} =$	0
18	Lebanon Conflict	$X_{18} =$	350	$Y_{18} =$	3980	$e_{18} =$	200
19	Mara A	$X_{19} =$	16	$Y_{19} =$	11	$e_{19} =$	1
20	Prestige	$X_{20} =$	52000	$Y_{20} =$	96000	$e_{20} =$	4800
21	Riga Sailor	$X_{21} =$	220	$Y_{21} =$	210	$e_{21} =$	11
22	Rose G	$X_{22} =$	8	$Y_{22} =$	3	$e_{22} =$	0
23	Sea Diamond	$X_{23} =$	550	$Y_{23} =$	225	$e_{23} =$	10
24	Sea Empress	$X_{24} =$	8500	$Y_{24} =$	3000	$e_{24} =$	150
25	Selendang Ayu	$X_{25} =$	0	$Y_{25} =$	3900	$e_{25} =$	200
26	Tanio	$X_{26} =$	0	$Y_{26} =$	80000	$e_{26} =$	4000
27	Tasman Spirit	$X_{27} =$	140	$Y_{27} =$	2500	$e_{27} =$	120
28	Θεόφιλος	$X_{28} =$	1.1	$Y_{28} =$	1.2	$e_{28} =$	0
29	Μυρτιδιώτισσα	$X_{29} =$	100	$Y_{29} =$	6	$e_{29} =$	0
30	Παναγιώτης Π.	$X_{30} =$	22	$Y_{30} =$	13	$e_{30} =$	1

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ασαφούς παλινδρόμησης.

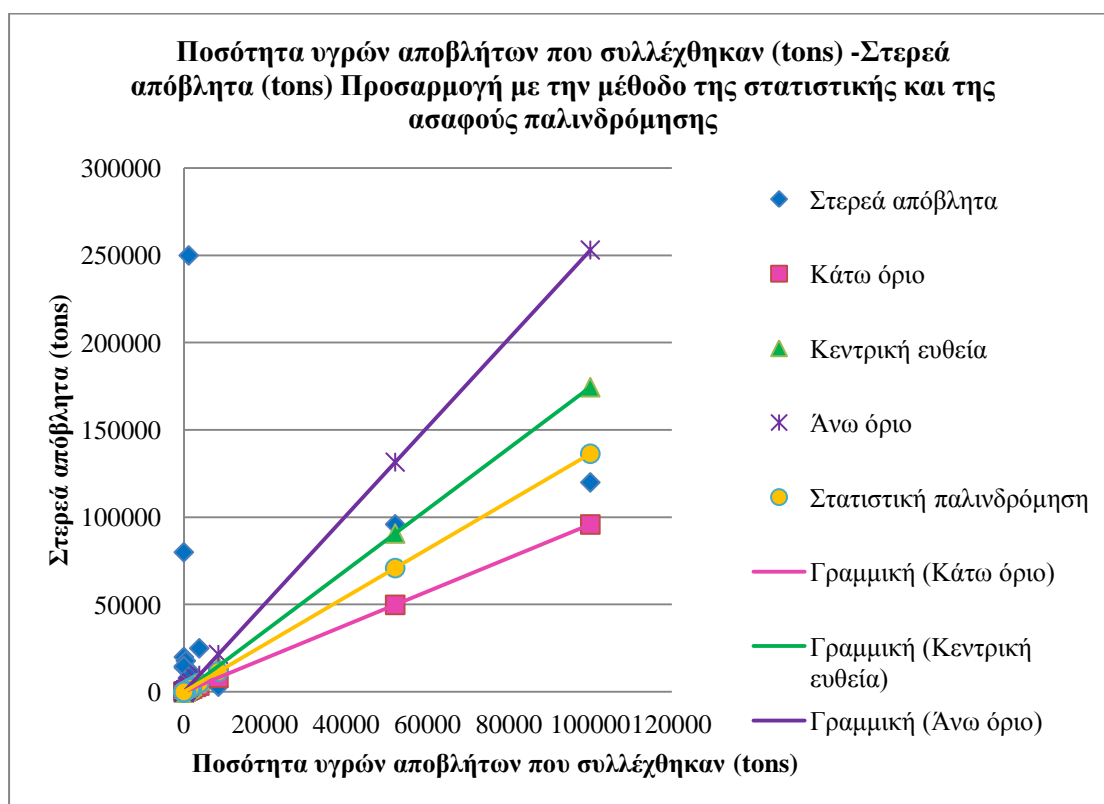


Σχήμα 5.12.: Διάγραμμα για τον υπολογισμό του ασαφούς ημιπλάτους e_i για κάθε ασαφές κέντρο Y_i .



Σχήμα 5.13.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons) και την παραγωγή στερεών αποβλήτων (tons).

Παρατηρείται ότι το ασαφές κέντρο της παραμέτρου \tilde{A}_1 είναι πολύ κοντά με το αποτέλεσμα που προέκυψε από την στατιστική παλινδρόμηση. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται και γραφικά στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 5.14.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons) και την παραγωγή στερεών αποβλήτων (tons).

Από την παρατήρηση του διαγράμματος του σχήματος 5.13., γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος που δίνει η ασαφής παλινδρόμηση είναι αρκετά μεγάλο. Επιπλέον, είναι αρκετά εμφανές ότι υπάρχουν ακραίες τιμές, οι οποίες αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Πιθανότατα, σε αυτές τις ακραίες τιμές να οφείλεται και η κακή προσαρμογή με την μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης.

Από την παραπάνω ανάλυση της ασαφούς παλινδρόμησης, έγινε σαφές ότι είναι αναγκαία η αφαίρεση κάποιων ακραίων τιμών (outliers) από τα δεδομένα, προκειμένου να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό, στις ακόλουθες ενότητες, θα διεξαχθεί ξανά η στατιστική και η ασαφής παλινδρόμηση για τη σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

5.2.4. Εφαρμογή της μεθόδου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει της ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers)

Προκειμένου να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη σχέση που συνδέει την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν με την παραγωγή στερεών αποβλήτων, κρίθηκε αναγκαία η «απομάκρυνση» ορισμένων περιστατικών από την βάση δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να επαναληφθεί η ανάλυση με τις μεθόδους της στατιστικής και

της ασαφούς παλινδρόμησης, χωρίς να συμπεριληφθούν τα περιστατικά όπου η ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν έχει απόκλιση μικρότερη του 10% από την ποσότητα στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

Μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers), η ανάλυση βασίστηκε στα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.18.. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο “Excel” όπου έγινε εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται στους πίνακες 5.19., 5.20., 5.21. και στο σχήμα 5.15..

Πίνακας 5.18.: Δεδομένα για την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και την παραγωγή στερεών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).

A/A	Όνομα Πλοίου	Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	Υγρά απόβλητα (tons)
1	Aegean Sea	3000	1200
2	Amoco Cadiz	100000	120000
3	Baltic Carrier	2000	10750
4	Boehlen	1000	8000
5	Christos Bitas	360	25
6	Coral Bulker	8	360
7	Exxon Valdez	3800	25000
8	Haven	2000	1500
9	Hebei Spirit	1500	9200
10	Interceptor	6	2
11	Mara A	16	11
12	Prestige	52000	96000
13	Riga Sailor	220	210
14	Rose G	8	3
15	Sea Diamond	550	225
16	Sea Empress	8500	3000
17	Θεόφιλος	1.1	1.2
18	Μυρτιδιώτισσα	100	6
19	Παναγιώτης Π.	22	13

Πίνακας 5.19.: Στατιστικά του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

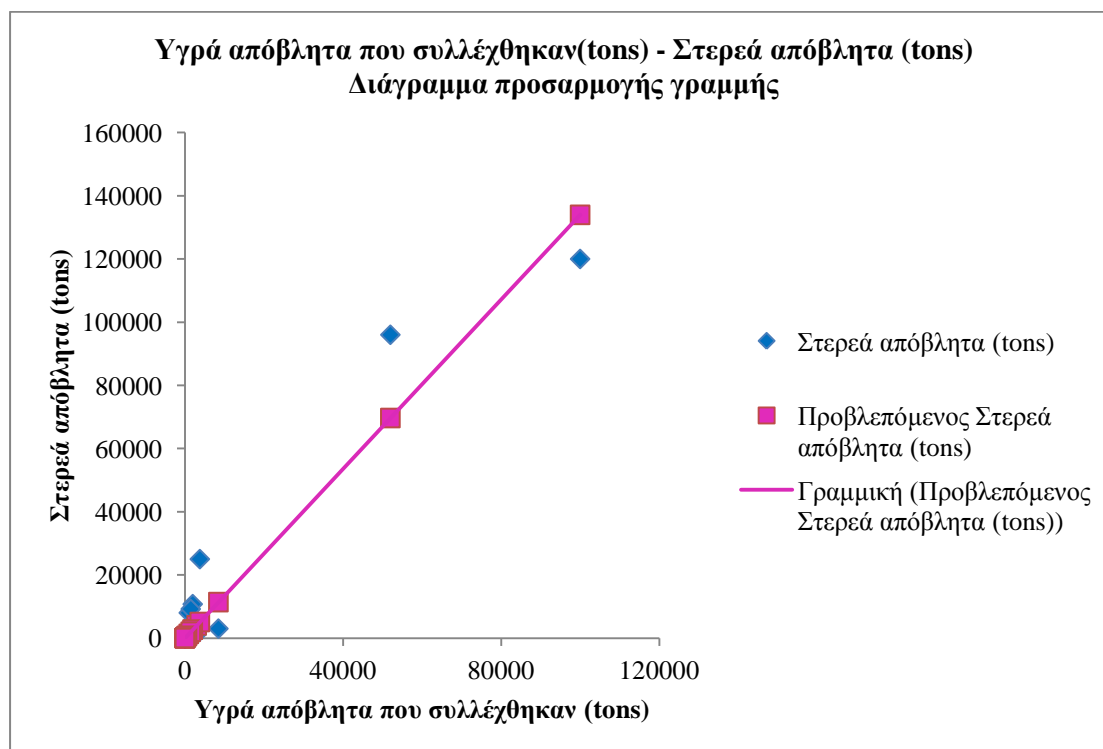
Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.968
R Τετράγωνο	0.938
Τυπικό σφάλμα	9209.295
Μέγεθος δείγματος	19

Πίνακας 5.20.: Ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	2.299E+10	2.299E+10	271.091	6.997E-12
Υπόλοιπο	18	1.527E+9	8.481E+7		
Σύνολο	19	2.452E+10			

Πίνακας 5.21.: Παράμετροι του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	1.340	0.081	16.465	2.685E-12



Σχήμα 5.15.: Διάγραμμα προσαρμογής γραμμής ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons) – στερεών αποβλήτων (tons) μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Συνεπώς, το μοντέλο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το:

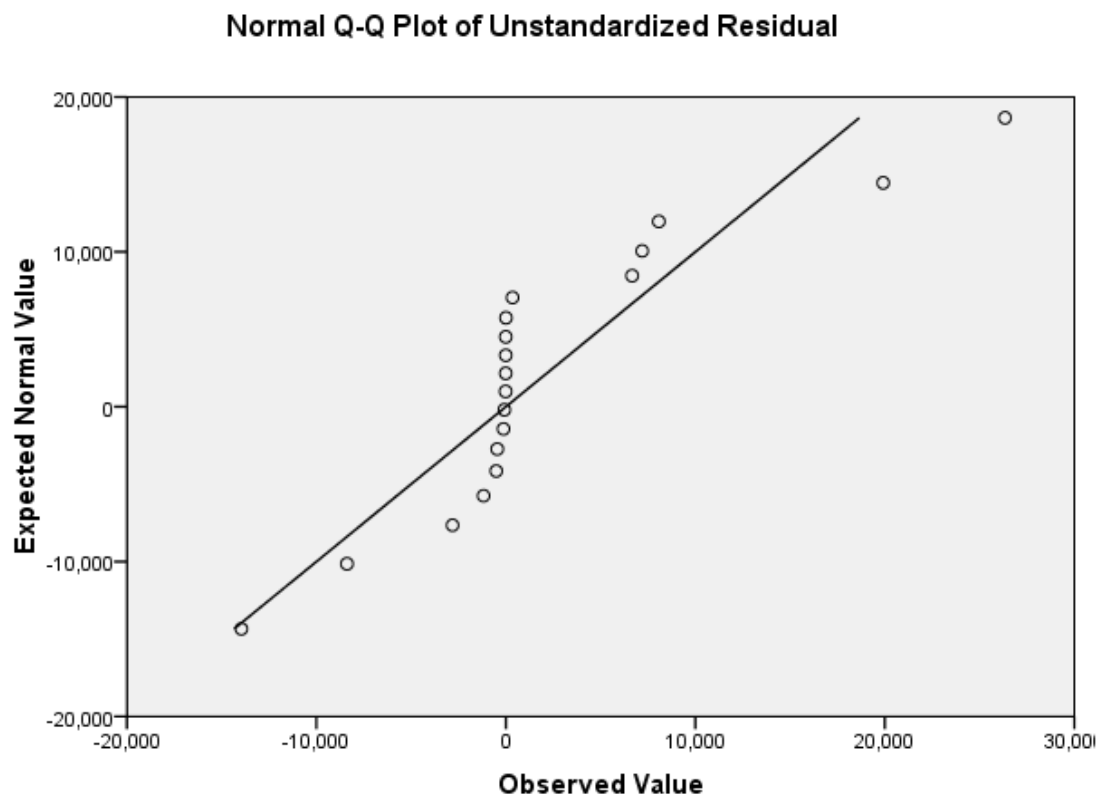
$$y = 1.34 \cdot x$$

όπου, y : η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons)
 x : η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)

Η ανάλυση απλής παλινδρόμησης για τα δεδομένα του πίνακα 5.18., δίνει $R^2 = 0.938 > 0.7$, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι μάλλον αξιόπιστο. Όμως, αυτή η παρατήρηση από μόνη της δεν αρκεί για την αποδοχή του μοντέλου χωρίς καμία επιφύλαξη.

Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου αποτελεί το χαμηλό μέσο τετράγωνο των καταλοίπων (σε σχέση με το μέσο τετράγωνο των δεδομένων). Πράγματι, το $8.481E+7$ είναι κατά πολύ μικρότερο από το $2.299E+10$, οπότε η απαίτηση αυτή καλύπτεται.

Σε αυτό το σημείο, θα ελεγχθεί η κανονικότητα των υπολοίπων με την βοήθεια του προγράμματος “SPSS 17.0”. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 5.16.), στο οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της κατανομής των καταλοίπων από την κανονική.



Σχήμα 5.16.: Διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Unstandardized residuals) της απλής γραμμικής στατιστικής ανάλυσης παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ παραγωγής στερεών αποβλήτων και της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν χωρίς τις ακραίες τιμές.

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι τα κατάλοιπα του παραπάνω μοντέλου δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα παραβιάζεται μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου (κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή των υπόλοιπων ελέγχων). Επομένως, η παραπάνω μορφή του μοντέλου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Έτσι,

κρίθηκε και πάλι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων με την μέθοδο της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.

5.2.5. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή στερεών αποβλήτων με την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέγεται μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών

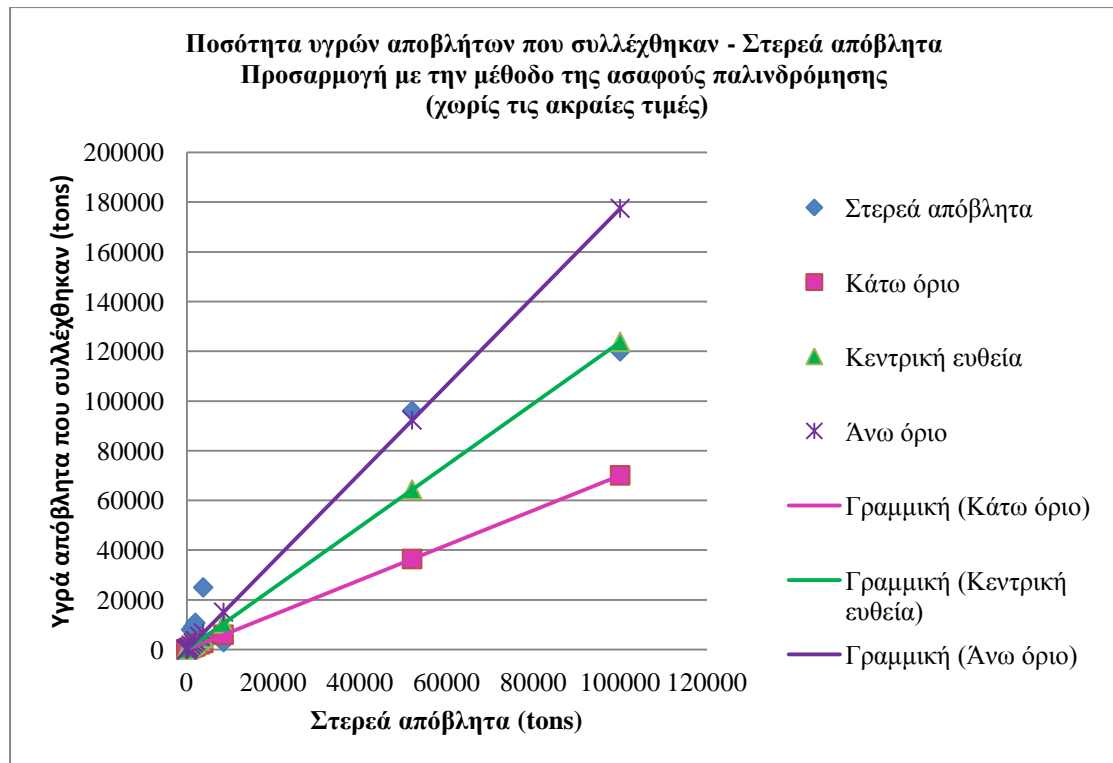
Θα χρησιμοποιηθεί και πάλι η ανάλυση διαστημάτων (Interval Regression). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.22..

Για την επίλυση των σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού, όπου εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 5.10., έγινε χρήση της εφαρμογής «Επίλυση» (“Solver”) του “Excel”. Η σχέση που προέκυψε παρατίθεται παρακάτω:

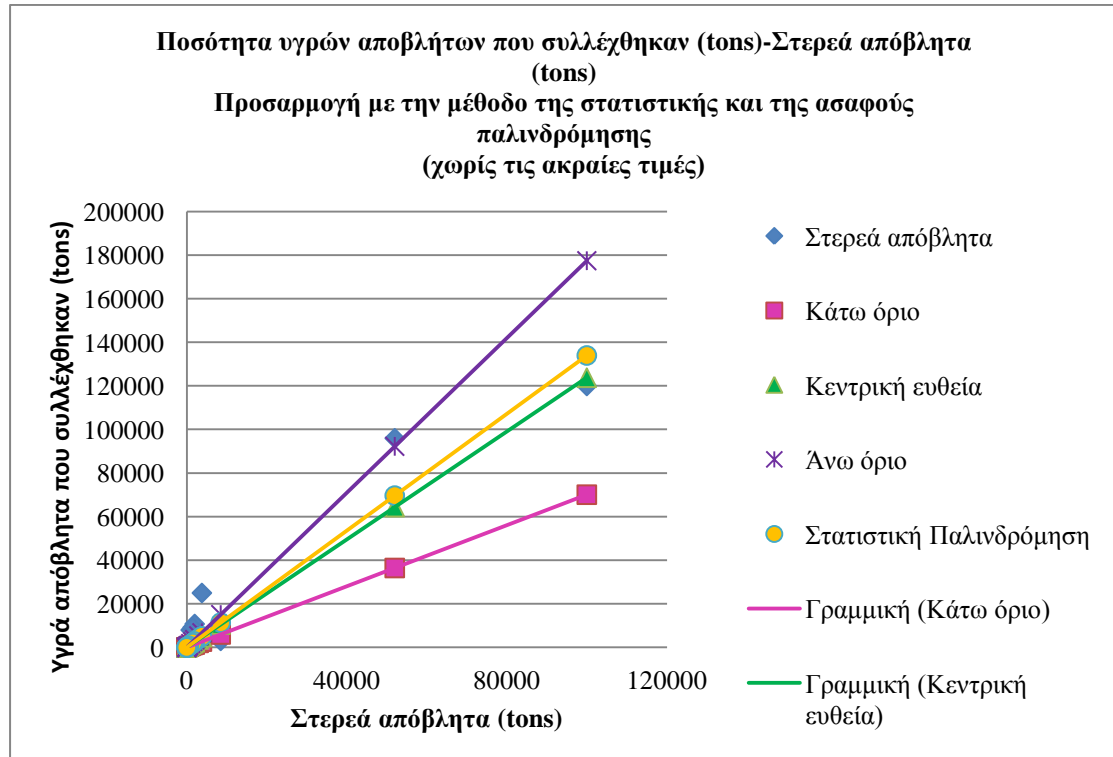
$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X \Rightarrow \hat{Y} = 0,0 + 1.238,0.537 X$$

Πίνακας 5.22.: Δεδομένα για την εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν χωρίς τις ακραίες τιμές.

A/A	Όνομα Πλοίου	X _i =	Υγρά απόβλητα που συλλέχθηκαν (tons)	Y _i =	Στερεά απόβλητα (tons)	e _i	
1	Aegean Sea	X ₁ =	3000	Y ₁ =	1200	e ₁	60
2	Amoco Cadiz	X ₂ =	100000	Y ₂ =	120000	e ₂	6000
3	Baltic Carrier	X ₃ =	2000	Y ₃ =	10750	e ₃	500
4	Boehlen	X ₄ =	1000	Y ₄ =	8000	e ₄	400
5	Christos Bitas	X ₅ =	360	Y ₅ =	25	e ₅	1
6	Coral Bulker	X ₆ =	8	Y ₆ =	360	e ₆	20
7	Exxon Valdez	X ₇ =	3800	Y ₇ =	25000	e ₇	1300
8	Haven	X ₈ =	2000	Y ₈ =	1500	e ₈	80
9	Hebei Spirit	X ₉ =	1500	Y ₉ =	9200	e ₉	450
10	Interceptor	X ₁₀ =	6	Y ₁₀ =	2	e ₁₀	0
11	Mara A	X ₁₁ =	16	Y ₁₁ =	11	e ₁₁	1
12	Prestige	X ₁₂ =	52000	Y ₁₂ =	96000	e ₁₂	4800
13	Riga Sailor	X ₁₃ =	220	Y ₁₃ =	210	e ₁₃	11
14	Rose G	X ₁₄ =	8	Y ₁₄ =	3	e ₁₄	0
15	Sea Diamond	X ₁₅ =	550	Y ₁₅ =	225	e ₁₅	10
16	Sea Empress	X ₁₆ =	8500	Y ₁₆ =	3000	e ₁₆	150
17	Θεόφιλος	X ₁₇ =	1.1	Y ₁₇ =	1.2	e ₁₇	0
18	Μυρτιδιώτισσα	X ₁₈ =	100	Y ₁₈ =	6	e ₁₈	0
19	Παναγιώτης Π.	X ₁₉ =	22	Y ₁₉ =	13	e ₁₉	1



Σχήμα 5.17.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και την παραγωγή στερεών αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.



Σχήμα 5.18.: Διάγραμμα προσαρμογής με τις μεθόδους της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ ποσότητας υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και την παραγωγή στερεών αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.

Παραπάνω, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ασαφούς παλινδρόμησης για τα στερεά απόβλητα χωρίς τις ακραίες τιμές. Επιπλέον, στο διάγραμμα του σχήματος 5.18. γίνεται και γραφική σύγκριση της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης.

Μετά την «απομάκρυνση» των ακραίων τιμών παρατηρείται μια μικρή μείωση του ασαφούς εύρους της παραμέτρου \tilde{A}_1 . Παρόλα αυτά, η παραμονή της ευθείας της στατιστικής παλινδρόμησης εντός του εύρους της ασαφούς παλινδρόμησης είναι ενθαρρυντική και αποδεικνύει ότι μπορεί να γίνει χρήση της μιας μεθόδου για τον έλεγχο της άλλης.

5.2.6. Εφαρμογή της μεθόδου της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο με την παραγωγή στερεών αποβλήτων.

Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, εισήχθησαν στο “Excel” τα δεδομένα για τα μήκη των ακτογραμμών που προσβλήθηκαν από το πετρέλαιο σε κάθε περιστατικό και τις ποσότητες στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης σε αυτά τα δεδομένα, φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες και στο Σχήμα 5.19..

Πίνακας 5.23.: Στατιστικά του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε και της ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

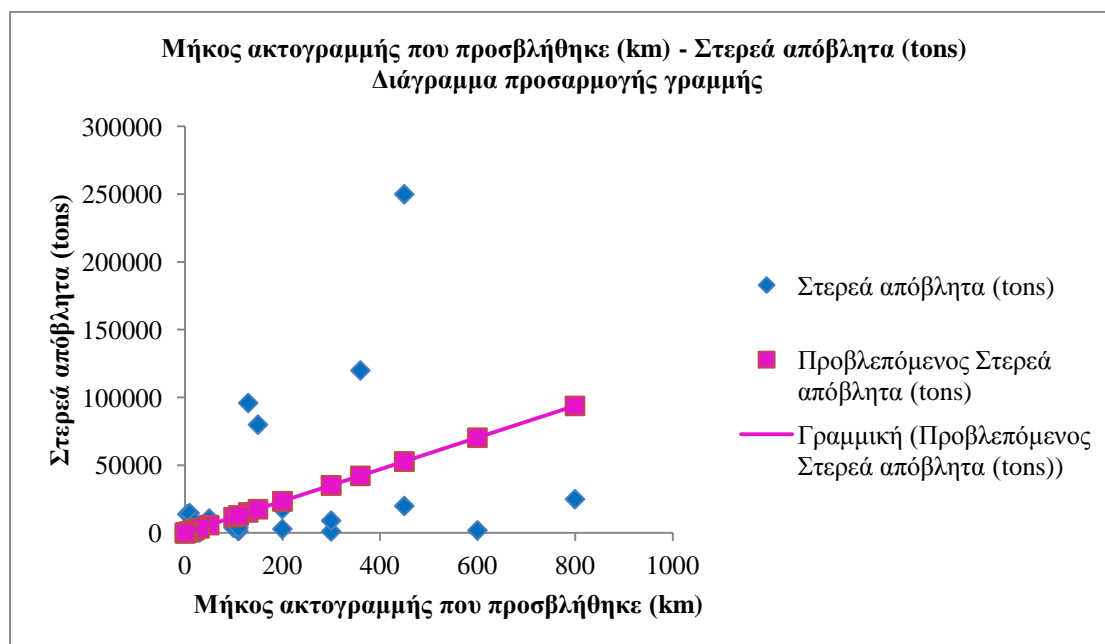
Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.522
R Τετράγωνο	0.272
Τυπικό σφάλμα	48719.828
Μέγεθος δείγματος	30

Πίνακας 5.24.: Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε και της ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	2.575E+10	2.575E+10	10.85	0.003
Υπόλοιπο	29	6.884E+10	2.374E+9		
Σύνολο	30	9.459E+10			

Πίνακας 5.25.: Παράμετροι του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε και της ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	117.277	35.604	3.294	0.003



Σχήμα 5.19.: Διάγραμμα προσαρμογής γραμμής μήκους ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km) - στερεών αποβλήτων (tons).

Συνεπώς, το μοντέλο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το:

$$y = 117.277 \cdot x$$

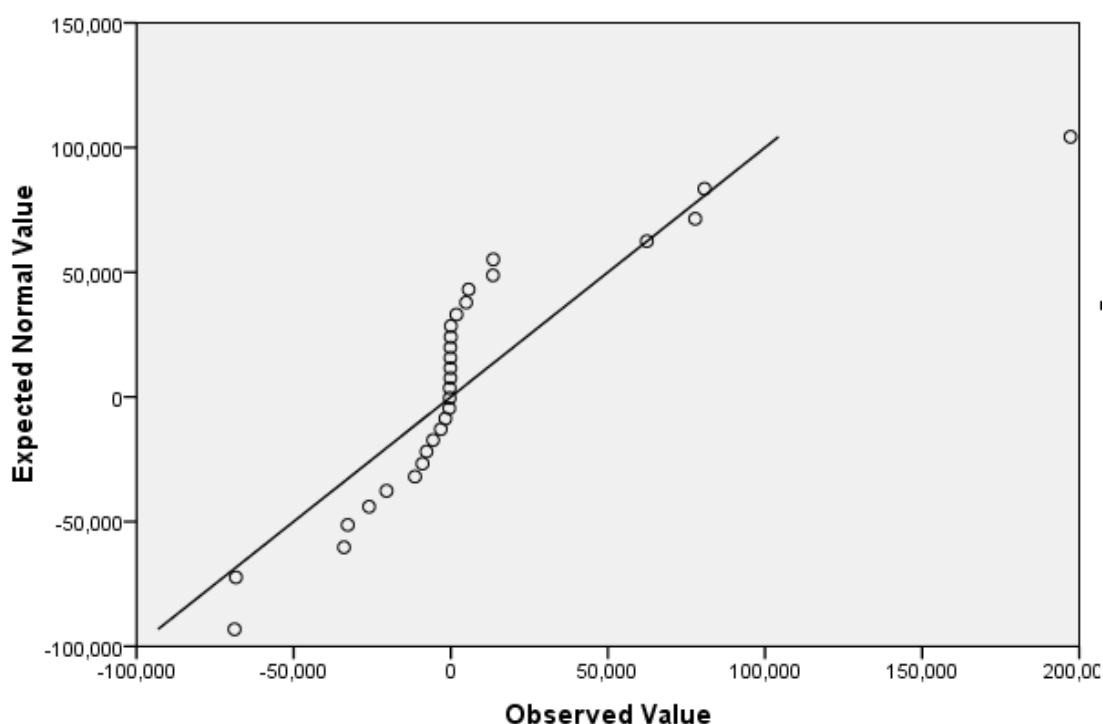
όπου, y: η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons)
x: η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)

Η παραπάνω ανάλυση με την μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης δίνει $R^2 = 0.27 < 0.7$, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο δεν είναι αξιόπιστο. Παρόλα αυτά θα πραγματοποιηθούν και άλλοι έλεγχοι, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί ο έλεγχος του R^2 δεν αρκεί για την αποδοχή, ή μη, ενός μοντέλου.

Απαραίτητη προϋπόθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου αποτελεί το χαμηλό μέσο τετράγωνο των καταλοίπων (σε σχέση με το μέσο τετράγωνο των δεδομένων). Πράγματι, το $2.374E+9$ είναι κατά πολύ μικρότερο από το $2.575E+10$, οπότε η απαίτηση αυτή καλύπτεται.

Επιπλέον, με τη βοήθεια του προγράμματος “SPSS 17.0”, έγινε διαγραμματικός έλεγχος της κανονικότητας των καταλοίπων. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 5.20.), στο οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της κατανομής των καταλοίπων από την κανονική. Επομένως, συμπεραίνεται ότι τα κατάλοιπα του παραπάνω μοντέλου δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα παραβιάζεται μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου (κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή των υπόλοιπων ελέγχων). Κατά συνέπεια, η παραπάνω μορφή του μοντέλου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων με την μέθοδο της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.

Normal Q-Q Plot of Unstandardized Residual



Σχήμα 5.20.: Διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Unstandardized residuals)

5.2.7. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει το μήκος της ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km) με την ποσότητα στερεών αποβλήτων που παράχθηκε

Θα χρησιμοποιηθεί και πάλι η ανάλυση διαστημάτων (Interval Regression). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.26.. Τα ασαφή ημιπλάτη για τα στερεά απόβλητα έχουν ήδη υπολογιστεί σε προηγούμενη ενότητα.

Για την επίλυση των σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού, όπου εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 5.26., έγινε χρήση της εφαρμογής «Επίλυση» (“Solver”) του “Excel”. Η σχέση που προέκυψε παρατίθεται παρακάτω:

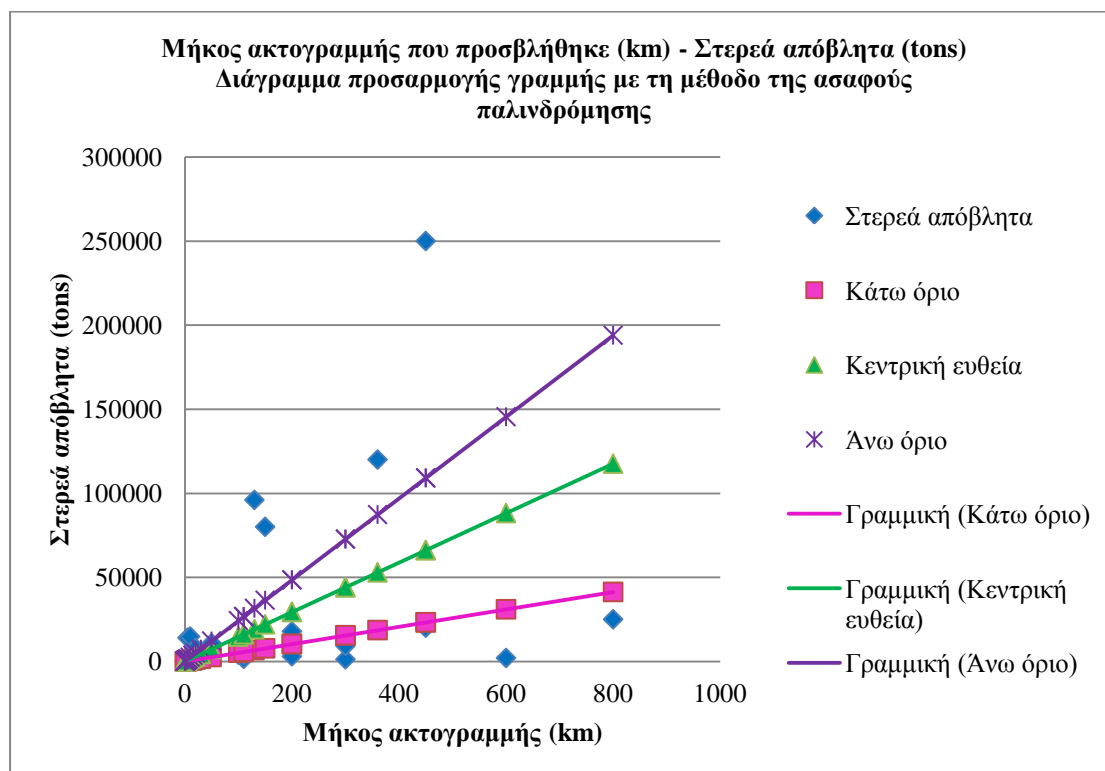
$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X \Rightarrow \hat{Y} = 0,0 + 147.015,95.432 X$$

Η παράμετρος \tilde{A}_0 , ορίστηκε ίση με το μηδέν (όπως και στην περίπτωση της στατιστικής παλινδρόμησης), αφού αν δεν πηγαούν ακτές από το πετρέλαιο, δεν αναμένεται παραγωγή στερεών αποβλήτων.

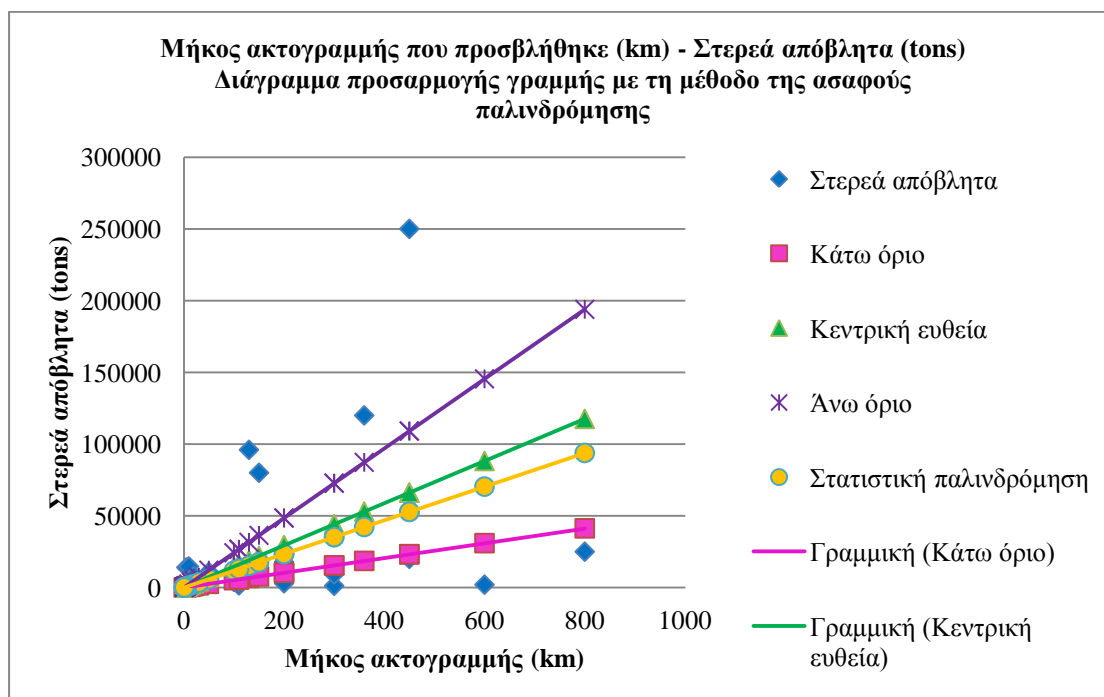
Πίνακας 5.26.: Δεδομένα για την εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ μήκους ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km) και ποσότητας στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons).

A/A	Όνομα Πλοίου	$X_i =$	Μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε	$Y_i =$	Στερεά απόβλητα (tons)	e_i	
1	Aegean Sea	$X_1 =$	300	$Y_1 =$	1200	$e_1 =$	60
2	Amazzone	$X_2 =$	450	$Y_2 =$	20000	$e_2 =$	1000
3	Amoco Cadiz	$X_3 =$	360	$Y_3 =$	120000	$e_3 =$	6000
4	Aragon	$X_4 =$	5	$Y_4 =$	14000	$e_4 =$	700
5	Athos 1	$X_5 =$	200	$Y_5 =$	17800	$e_5 =$	900
6	Baltic Carrier	$X_6 =$	50	$Y_6 =$	10750	$e_6 =$	500
7	Black Sea Storm	$X_7 =$	10	$Y_7 =$	14700	$e_7 =$	700
8	Boehlen	$X_8 =$	20	$Y_8 =$	8000	$e_8 =$	400
9	Braer	$X_9 =$	600	$Y_9 =$	2000	$e_9 =$	100
10	Bright Artemis	$X_{10} =$	0	$Y_{10} =$	0	$e_{10} =$	0
11	Christos Bitas	$X_{11} =$	15	$Y_{11} =$	25	$e_{11} =$	1
12	Coral Bulker	$X_{12} =$	30	$Y_{12} =$	360	$e_{12} =$	20
13	Erika	$X_{13} =$	450	$Y_{13} =$	250000	$e_{13} =$	12000
14	Exxon Valdez	$X_{14} =$	800	$Y_{14} =$	25000	$e_{14} =$	1300
15	Haven	$X_{15} =$	110	$Y_{15} =$	1500	$e_{15} =$	80
16	Hebei Spirit	$X_{16} =$	300	$Y_{16} =$	9200	$e_{16} =$	450
17	Interceptor	$X_{17} =$	1	$Y_{17} =$	2	$e_{17} =$	0
18	Lebanon Conflict	$X_{18} =$	100	$Y_{18} =$	3980	$e_{18} =$	200
19	Mara A	$X_{19} =$	3	$Y_{19} =$	11	$e_{19} =$	1
20	Prestige	$X_{20} =$	130	$Y_{20} =$	96000	$e_{20} =$	4800
21	Riga Sailor	$X_{21} =$	2	$Y_{21} =$	210	$e_{21} =$	11
22	Rose G	$X_{22} =$	1	$Y_{22} =$	3	$e_{22} =$	0
23	Sea Diamond	$X_{23} =$	5	$Y_{23} =$	225	$e_{23} =$	10
24	Sea Empress	$X_{24} =$	200	$Y_{24} =$	3000	$e_{24} =$	150
25	Selendang Ayu	$X_{25} =$	110	$Y_{25} =$	3900	$e_{25} =$	200
26	Tanio	$X_{26} =$	150	$Y_{26} =$	80000	$e_{26} =$	4000
27	Tasman Spirit	$X_{27} =$	6	$Y_{27} =$	2500	$e_{27} =$	120
28	Θεόφιλος	$X_{28} =$	4	$Y_{28} =$	1.2	$e_{28} =$	0
29	Μυρτιδιώτισσα	$X_{29} =$	1	$Y_{29} =$	6	$e_{29} =$	0
30	Παναγιώτης Π.	$X_{30} =$	1	$Y_{30} =$	13	$e_{30} =$	1

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ασαφούς παλινδρόμησης



Σχήμα 5.21.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons) και την παραγωγή στερεών αποβλήτων (tons).



Σχήμα 5.22.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν (tons) και την παραγωγή στερεών αποβλήτων (tons).

Από την παρατήρηση του διαγράμματος του σχήματος 5.13., γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος που δίνει η ασαφής παλινδρόμηση είναι αρκετά μεγάλο. Επιπλέον, είναι αρκετά εμφανές ότι υπάρχουν ακραίες τιμές, οι οποίες αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Πιθανότατα, σε αυτές τις ακραίες τιμές να οφείλεται και η κακή προσαρμογή με την μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης.

Από την παραπάνω ανάλυση της ασαφούς παλινδρόμησης, έγινε σαφές ότι είναι αναγκαία η αφαίρεση κάποιων ακραίων τιμών (outliers) από τα δεδομένα, προκειμένου να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό, στις ακόλουθες ενότητες, θα διεξαχθεί ξανά η στατιστική και η ασαφής παλινδρόμηση για τη σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν και στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

5.2.8. Εφαρμογή της μεθόδου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει του μήκους ακτογραμμής που προσβλήθηκε (km) μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers)

Προκειμένου να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη σχέση που συνδέει το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο με την παραγωγή στερεών αποβλήτων, κρίθηκε αναγκαία η «απομάκρυνση» ορισμένων περιστατικών από την βάση δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να επαναληφθεί η ανάλυση με τις μεθόδους της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης, χωρίς να συμπεριληφθούν τα περιστατικά όπου το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε έχει απόκλιση μικρότερη του 1% από την ποσότητα στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν.

Πίνακας 5.27.: Δεδομένα για το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε και την παραγωγή στερεών αποβλήτων μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers).

A/A	Όνομα Πλοίου	Μήκος ακτογραμμής (km)	Στερεά απόβλητα (tons)
1	Aegean Sea	300	1200
2	Amazzone	450	20000
3	Athos 1	200	17800
4	Braer	600	2000
5	Christos Bitas	15	25
6	Coral Bulker	30	360
7	Exxon Valdez	800	25000
8	Haven	110	1500
9	Hebei Spirit	300	9200
10	Interceptor	1	2
11	Lebanon Conflict	100	3980
12	Mara A	3	11
13	Rose G	1	3
14	Sea Diamond	5	225
15	Sea Empress	200	3000
16	Selendang Ayu	110	3900
17	Θεόφιλος	4	1.2
18	Μυρτιδιώτισσα	1	6
19	Παναγιώτης Π.	1	13

Μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών (outliers), η ανάλυση βασίστηκε στα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.27.. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο “Excel” όπου έγινε εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται στους πίνακες 5.28., 5.29., 5.30. και στο σχήμα 5.23..

Πίνακας 5.28.: Στατιστικά του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

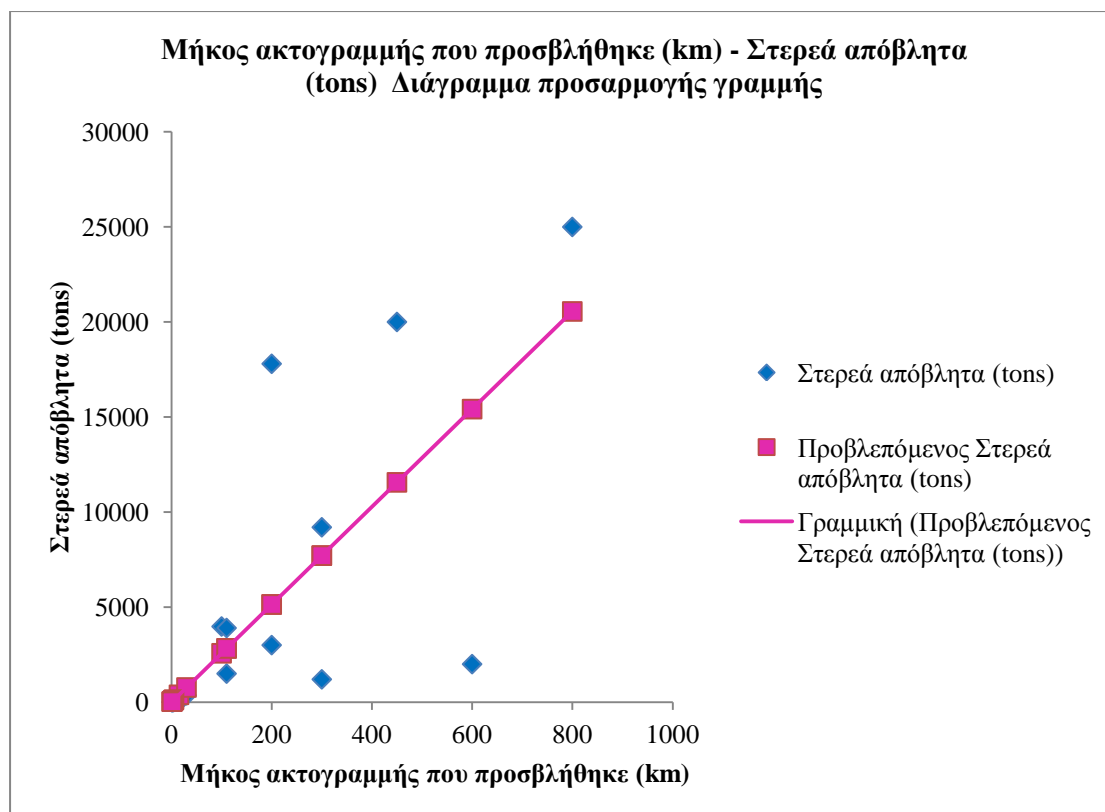
Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.819
R Τετράγωνο	0.671
Τυπικό σφάλμα	5194.224
Μέγεθος δείγματος	19

Πίνακας 5.29.: Ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Ανάλυση διακύμανσης					
	Βαθμοί ελευθερίας	Άθροισμα τετραγώνων	Μέσο άθροισμα τετραγώνων	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	9.888E+8	9.888E+8	36.648	1.29E-05
Υπόλοιπο	18	4.856E+8	2.698E+7		
Σύνολο	19	1.474E+9			

Πίνακας 5.30.: Παράμετροι του μοντέλου απλής γραμμικής στατιστικής παλινδρόμησης για την παραγωγή στερεών αποβλήτων βάσει της ποσότητας του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Παράμετροι του μοντέλου				
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	0	-	-	-
Ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)	25.693	4.244	6.054	1.01 ^E -05



Σχήμα 5.23.: Διάγραμμα προσαρμογής γραμμής μήκους ακτογραμμής που προσβλήθηκε - στερεών αποβλήτων (tons) μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών.

Συνεπώς, το μοντέλο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι το:

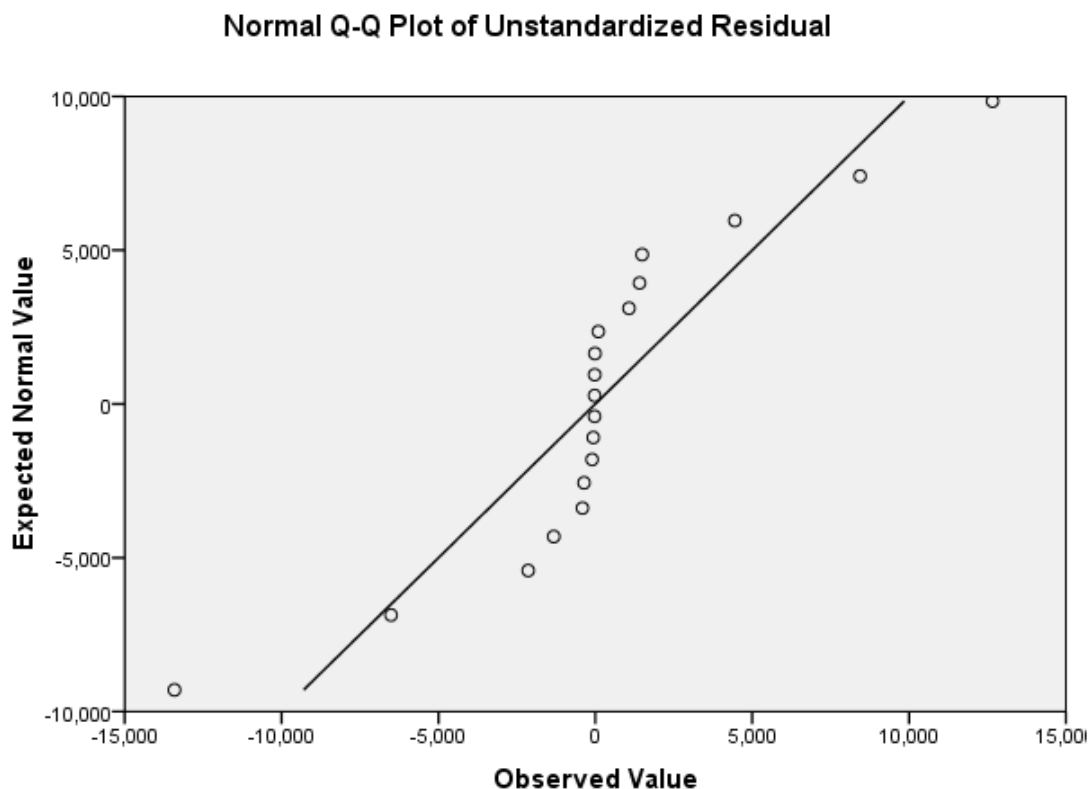
$$y = 25.693 \cdot x$$

όπου, y : η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που παράχθηκαν (tons)
 x : η ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε (tons)

Η ανάλυση απλής παλινδρόμησης για τα δεδομένα του πίνακα 5.27., δίνει $R^2 = 0.67$, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι μάλλον αξιόπιστο. Όμως, αυτή η παρατήρηση από μόνη της δεν αρκεί για την αποδοχή του μοντέλου χωρίς καμία επιφύλαξη.

Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου αποτελεί το χαμηλό μέσο τετράγωνο των καταλοίπων (σε σχέση με το μέσο τετράγωνο των δεδομένων). Πράγματι, το $2.698E+7$ είναι κατά πολύ μικρότερο από το $9.888E+8$, οπότε η απαίτηση αυτή καλύπτεται.

Σε αυτό το σημείο, θα ελεγχθεί η κανονικότητα των υπολοίπων με την βοήθεια του προγράμματος “SPSS 17.0”. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 5.24.), στο οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της κατανομής των καταλοίπων από την κανονική.



Σχήμα 5.24.: Διάγραμμα “Q-Q Plot” των μη τυποποιημένων καταλοίπων (Unstandardized residuals) της απλής γραμμικής στατιστικής ανάλυσης παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ του μήκους της ακτογραμμής που προσβλήθηκε και της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν χωρίς τις ακραίες τιμές.

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι τα κατάλοιπα του παραπάνω μοντέλου δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και άρα παραβιάζεται μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου (κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή των υπόλοιπων ελέγχων). Επομένως, η παραπάνω μορφή του μοντέλου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Έτσι, κρίθηκε και πάλι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων με την μέθοδο της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης.

5.2.9. Εφαρμογή της μεθόδου της ασαφούς απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση που συνδέει την παραγωγή στερεών αποβλήτων με το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε μετά την απομάκρυνση των ακραίων τιμών

Θα χρησιμοποιηθεί και πάλι η ανάλυση διαστημάτων (Interval Regression). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.31..

Για την επίλυση των σχέσεων γραμμικού προγραμματισμού, όπου εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα 5.31., έγινε χρήση της εφαρμογής «Επίλυση» (“Solver”) του “Excel”. Η σχέση που προέκυψε παρατίθεται παρακάτω:

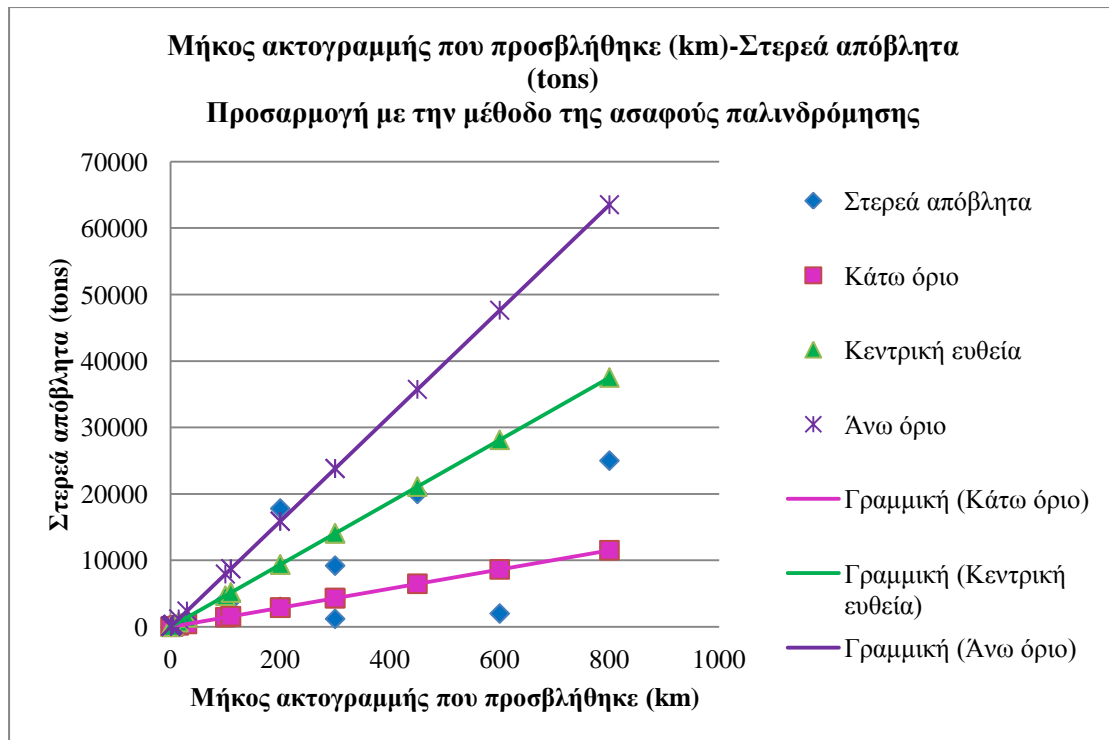
$$\hat{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X \Rightarrow \hat{Y} = 0,0 + 46,9,32.5 X$$

Πίνακας 5.31.: Δεδομένα για την εφαρμογή της ασαφούς γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ μήκους ακτογραμμής που προσβλήθηκε και στερεών αποβλήτων που παράχθηκαν χωρίς τις ακραίες τιμές.

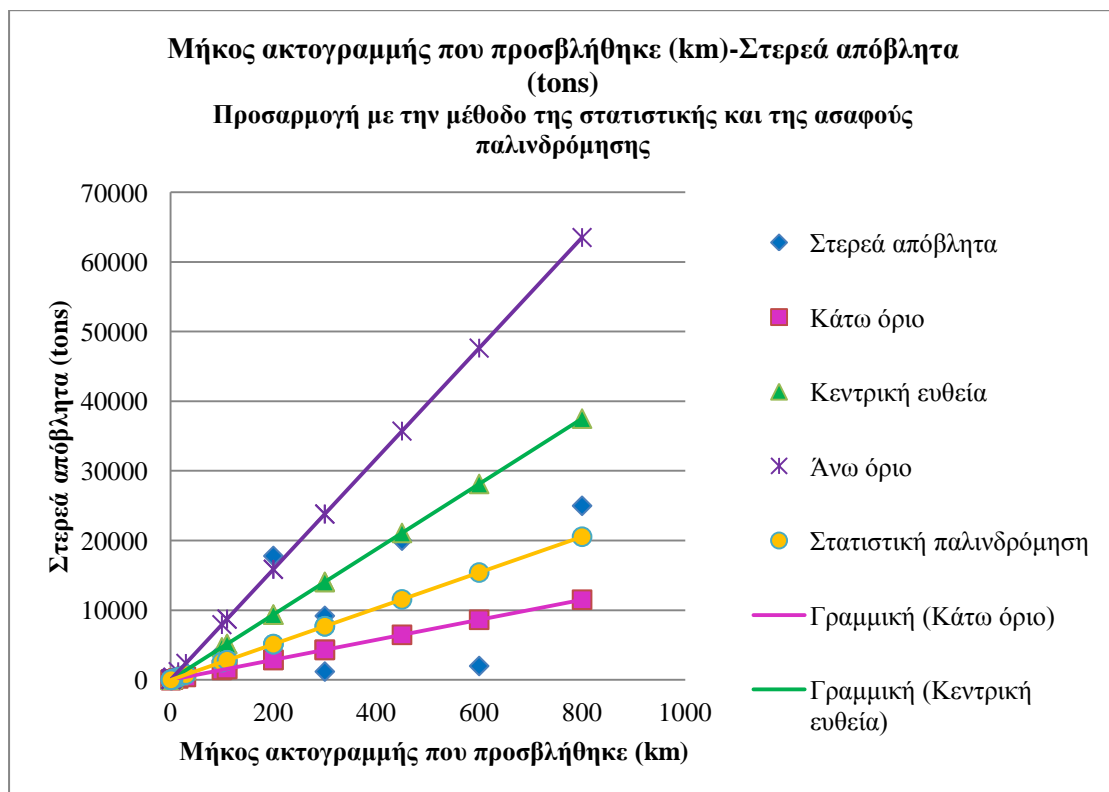
A/A	Όνομα Πλοίου	$X_i =$	Μήκος ακτογραμμής (km)	$Y_i =$	Στερεά απόβλητα (tons)	e_i	
1	Aegean Sea	$X_1 =$	300	$Y_1 =$	1200	e_1	60
2	Amazzone	$X_2 =$	450	$Y_2 =$	20000	e_2	1000
3	Athos 1	$X_3 =$	200	$Y_3 =$	17800	e_3	900
4	Braer	$X_4 =$	600	$Y_4 =$	2000	e_4	100
5	Christos Bitas	$X_5 =$	15	$Y_5 =$	25	e_5	1
6	Coral Bulker	$X_6 =$	30	$Y_6 =$	360	e_6	20
7	Exxon Valdez	$X_7 =$	800	$Y_7 =$	25000	e_7	1300
8	Haven	$X_8 =$	110	$Y_8 =$	1500	e_8	80
9	Hebei Spirit	$X_9 =$	300	$Y_9 =$	9200	e_9	450
10	Interceptor	$X_{10} =$	1	$Y_{10} =$	2	e_{10}	0
11	Lebanon Conflict	$X_{11} =$	100	$Y_{11} =$	3980	e_{11}	200
12	Mara A	$X_{12} =$	3	$Y_{12} =$	11	e_{12}	1
13	Rose G	$X_{13} =$	1	$Y_{13} =$	3	e_{13}	0
14	Sea Diamond	$X_{14} =$	5	$Y_{14} =$	225	e_{14}	10
15	Sea Empress	$X_{15} =$	200	$Y_{15} =$	3000	e_{15}	150
16	Selendang Ayu	$X_{16} =$	110	$Y_{16} =$	3900	e_{16}	200
17	Θεόφιλος	$X_{17} =$	4	$Y_{17} =$	1.2	e_{17}	0
18	Μυρτιδιώτισσα	$X_{18} =$	1	$Y_{18} =$	6	e_{18}	0
19	Παναγιώτης Π.	$X_{19} =$	1	$Y_{19} =$	13	e_{19}	1

Παρακάτω, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ασαφούς παλινδρόμησης για τα στερεά απόβλητα χωρίς τις ακραίες τιμές. Επιπλέον, στο διάγραμμα του σχήματος 5.26. γίνεται και γραφική σύγκριση της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης.

Μετά την «απομάκρυνση» των ακραίων τιμών παρατηρείται μια σημαντική μείωση του ασαφούς εύρους της παραμέτρου \tilde{A}_1 . Επιπλέον, η παραμονή της ευθείας της στατιστικής παλινδρόμησης εντός του εύρους της ασαφούς παλινδρόμησης είναι ενθαρρυντική και αποδεικνύει ότι μπορεί να γίνει χρήση της μιας μεθόδου για τον έλεγχο της άλλης.



Σχήμα 5.25.: Διάγραμμα προσαρμογής με την μέθοδο της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ ακτογραμμής που προσβλήθηκε και την παραγωγή στερεών αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.



Σχήμα 5.26.: Διάγραμμα προσαρμογής με τις μεθόδους της στατιστικής και της ασαφούς παλινδρόμησης για τη σχέση μεταξύ της ακτογραμμής που προσβλήθηκε και της παραγωγής στερεών αποβλήτων χωρίς τις ακραίες τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

6.1. Συμπεράσματα

Από την επεξεργασία των δεδομένων που διεξήχθη στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν κατ' αρχήν να εξαχθούν πολύ σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τις παραμέτρους που επηρεάζουν ουσιαστικά την παραγωγή αποβλήτων. Επιπλέον, οι μαθηματικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν βάσει των μεθόδων στατιστικής και ασαφούς παλινδρόμησης μπορούν να προσφέρουν μια καλή εκτίμηση των αποβλήτων που αναμένεται να παραχθούν.

Όσον αφορά τα υγρά απόβλητα, παρατηρήθηκε, ότι η παραγωγή τους εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα πετρελαίου που διαφεύγει στη θάλασσα. Αυτή η εξέλιξη ήταν αναμενόμενη βάσει και της μελέτης των ιστορικών των ατυχημάτων που ήταν διαθέσιμα, αλλά επιβεβαιώθηκε και μέσω της πολλαπλής στατιστικής παλινδρόμησης. Η παρατήρηση αυτή σχετικά με τα υγρά απόβλητα δε συνεπάγεται ότι οι υπόλοιπες παράμετροι που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη, είναι αμέτοχες στην παραγωγή αποβλήτων. Είναι αρκετά πιθανό ότι η μη ανάδειξη ισχυρής σχέσης της παραγωγής αποβλήτων με κάποια από τις άλλες μεταβλητές, οφείλεται στην κακή «έκφραση» αυτών των παραμέτρων. Για παράδειγμα, αν για μεταβλητές όπως είναι το είδος πετρελαίου και οι καιρικές συνθήκες υπήρχαν τιμές για τα μεγέθη που τις περιγράφουν (π.χ. ιξώδες για το είδος πετρελαίου, ύψος κύματος και ένταση ανέμων για τις καιρικές συνθήκες), αντί για κλιμακωτές μεταβλητές, τότε η ανάλυση θα ήταν ακόμα πιο ακριβής.

Για την περίπτωση των στερεών αποβλήτων, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η παραγωγή τους εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα υγρών αποβλήτων που συλλέχθηκαν κατά τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης της πετρελαιοκηλίδας και από το μήκος ακτογραμμής που προσβλήθηκε από το πετρέλαιο. Το γεγονός ότι δεν προέκυψε ισχυρή σχέση με την ποσότητα πετρελαίου που διέφυγε στη θάλασσα, ενδεχομένως να φαντάζει παράδοξο εκ πρώτης όψεως. Αντιθέτως, αποδεικνύεται αρκετά λογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι σε περίπτωση που επιτευχθεί η συλλογή όλης της ποσότητας των υγρών αποβλήτων, δε θα παραχθούν στερεά απόβλητα. Αντίστοιχα με την περίπτωση των υγρών αποβλήτων, δεν προκύπτει ισχυρή σχέση για παραμέτρους που είναι βέβαιο ότι επηρεάζουν την παραγωγή αποβλήτων. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται αναφορά στο είδος ακτής, το οποίο επηρεάζει άμεσα την παραγωγή στερεών αποβλήτων, αλλά στο μοντέλο αντιπροσωπεύεται από κλιμακωτές μεταβλητές ελλείπει πιο αναλυτικών πληροφοριών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η ασαφής παλινδρόμηση επιλέχθηκε ως μέθοδος επεξεργασίας εξαιτίας του μικρού αριθμού δεδομένων που ήταν διαθέσιμα και της ασάφειας που διέπει τον συσχετισμό των υπό μελέτη μεταβλητών. Η ασαφής παλινδρόμηση παρέχει ένα εύρος στα αποτελέσματα, γεγονός το οποίο καθιστά πιο ρεαλιστικό το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό ότι σε κάθε εφαρμογή των μεθόδων για τις διάφορες μεταβλητές, η προσαρμογή με τη στατιστική παλινδρόμηση βρισκόταν εντός των ορίων της ασαφούς παλινδρόμησης. Οπότε, γίνεται αντιληπτό ότι εφαρμογή της μιας μεθόδου μπορεί να έχει και ελεγκτική μορφή ως προς την εφαρμογή της άλλης μεθόδου.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η έλλειψη δεδομένων σχετικά με την παραγωγή αποβλήτων κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων προκάλεσε αρκετές δυσκολίες κατά το σχεδιασμό του μοντέλου και τελικά καθόρισε την μορφή του. Από τις αναφορές στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε έγινε αντιληπτό ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν ανάλυση σαν αυτή που διεξάγεται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Κατά συνέπεια, τα δεδομένα που χρειάζονταν για την ανάπτυξη του μοντέλου δεν ήταν καταχωρημένα σε κάποια βάση δεδομένων. Η εξεύρεση δεδομένων επιτεύχθηκε μέσω της μελέτης ιστορικών ατυχημάτων πλοίων. Όμως, εξαιτίας του παραγκωνισμού του ζητήματος της παραγωγής αποβλήτων στο πλαίσιο μιας πετρελαιοκηλίδας, σπάνια καταγράφονται σχετικά στοιχεία. Αυτός ήταν και ο λόγος που το αποτέλεσμα της αναζήτησης που διεξήχθη στο πλαίσιο της εργασίας, ήταν δεδομένα για τριάντα περιστατικά.

Είναι γνωστό ότι όσο περισσότερα είναι τα δεδομένα που έχει στη διάθεση του ένας ερευνητής, τόσο πιο αξιόπιστο είναι το μοντέλο που σχεδιάζει. Κατά συνέπεια, προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση αντίστοιχη με αυτή της παρούσας εργασίας και να προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα, θα πρέπει να βασιστεί σε περισσότερα δεδομένα. Κατά συνέπεια, θα ήταν απαραίτητος ο εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων, η οποία παρουσιάζεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, με περισσότερα περιστατικά. Για το σκοπό αυτό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλες πηγές πληροφοριών, στις οποίες δεν υπήρχε πρόσβαση στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι αν τα δεδομένα ήταν διαφορετικά (π.χ. περισσότερα σε αριθμό), τότε η ανάλυση θα μπορούσε να είχε στηριχτεί σε εντελώς διαφορετικές μεθόδους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βιβλία

1. Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. “Introduction to linear regression analysis”, fourth edition. Wiley Series in Probability and Statistics, 2006.
2. M.A. Golberg, H.A. Cho. “Introduction to regression analysis”. WITpress, 2004.
3. Sanford Weisberg. “Applied linear regression”. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 1980.
4. Ronald R. Hocking. “Methods and applications of linear models regression and the analysis of variance”. Wiley interscience, Wiley Series in Probability and Statistics.
5. John O. Rawlings, Sastry G. Pantula, David A. Dickey. “Applied regression analysis – A research tool”, second edition. Springer tests in statistics, 2001.
6. Χρυσούλα Ζαχαροπούλου. «Παλινδρόμηση – συσχέτιση: θεωρία και πράξη». Θεσσαλονίκη 1995.
7. Richard Woodhouse. “Statistical regression line-fitting in the oil and gas industry : a descriptive guide with Microsoft Excel Examples”. Tulsa, OK: Pennwell Corporation, 2003.
8. Hung T. Nguyen, Elbert A. Walker. “A first course in fuzzy logic”, second edition. Chapman & Hall/CRC.
9. Roman Stowinski, Didier Dubois, Henri Prade. “Fuzzy sets in decision analysis, operation research and statistics”. The handbooks of fuzzy sets series.
10. Hans J. Zimmermann. “Fuzzy sets, decision making and expert systems”. Kluwer academic publishers, Boston, 1987.
11. Hans J. Zimmermann. “Fuzzy set theory and its application”, third edition. Kluwer academic publishers, Boston, 1996.
12. Kazuo Tanaka. “An introduction to fuzzy logic for practical applications”. Springer, New York, 1997.
13. William Mendenhall, Terry Sincich. “Statistics for engineering and the sciences”. Upper Saddle River, NJ. : Prentice Hall, 1995.
14. Γιάννης Α. Θεοδώρου. «Εισαγωγή στην ασαφή λογική (fuzzy logic)». Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
15. Παντελής Υψηλάντης. «Επιχειρησιακή έρευνα, εφαρμογές στη σημερινή επιχείρηση», β' έκδοση. Εκδόσεις Προπομπός, 2008.

2. Άρθρα (papers)

16. Ειρήνη Γρηγορίου, Νικόλαος Π. Βεντικός, Νικόλαος Π. Κακαλής. «Η διαχείριση αποβλήτων που προκύπτουν από τις επιχειρήσεις καταπολέμησης πετρελαιοκηλίδων». Περιβάλλον και Δίκαιο, 1/2009 (Έτος 13^ο), 52-58.
17. Ioanna D. Genikomsidou, Eirini D. Grigoriou, Nikolaos P. Ventikos. “Oil Pollution in Greek Seas: Critical Review of Confrontation and Waste Management”. NTUA submission to REMPEC Focal Points meeting, 21-24 April 2009.
18. L.A. Zadeh. “Fuzzy Sets”. Information and Control 8 (1965), 338-353.
19. Hideo Tanaka, Satoru Uejima, Kiyoji Asai. “Linear Regression Analysis with Fuzzy Model”. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-12, NO.6, November/December 1982.
20. Yun-Hsi O. Chang, Bilal M. Ayyub. “Fuzzy regression methods – a comparative assessment”. Fuzzy Sets and Systems 119 (2001), 187-203.
21. Kwang Jae Kim, Herbert Moskowitz, Murat Koksalan. “Fuzzy versus statistical linear regression”. European Journal of Operational Research 92 (1996), 417-434.
22. A. Celmins. “Least squares model fitting to fuzzy vector data”. Fuzzy Sets and Systems 22 (1987), 245-269.
23. A. Celmins. “Multidimensional least-squares model fitting of fuzzy models”. Math. Modeling 9 (1987), 669-690.
24. D. Savic, W. Pedrycz. “Evaluation of fuzzy regression models”. Fuzzy Sets and Systems 39 (1991), 51-63.
25. Andras Bardossy. “Note on fuzzy regression”. Fuzzy Sets and Systems 37 (1990), 65-75.
26. Hsiao-Fan Wang, Ruey-Chyn Tsaur. “Insight of a fuzzy regression model”. Fuzzy Sets and Systems 112 (2000), 335-369.
27. H. Tanaka. “Fuzzy data analysis by possibilistic linear models”. Fuzzy Sets and Systems 24 (1987), 363-375.
28. H. Tanaka, H. Ishibuchi. “Identification of possibilistic linear systems by quadratic membership functions of fuzzy parameters”. Fuzzy Sets and Systems 41 (1991), 145-160.
29. Ching-Gung Wen, Chih-Sheng Lee. “Development of a cost function for wastewater treatment systems with fuzzy regression”. Fuzzy Sets and Systems 106 (1999), 143-153.

3. Εγχειρίδια (Manuals)

30. “Manual on Oil Pollution, Section IV: Combating Oil Spills”. IMO publications, London, 2001.
31. “Manual on Oil Pollution, Section II: Contingency Planning”. IMO publications, London, 1995.
32. “Manual on Oil Pollution, Section V: Administrative Aspects of Oil Pollution Response”. IMO publications, London, 1998.
33. “Oil Spill Waste Management – Operational Guide”. Cedre, Brest, France 2007.
34. “A Guide to Contingency Planning for Oil Spills on Water – 2nd Edition”. IPIECA Report Series, Vol. 2, 2000.
35. “Guidelines for Oil Spill Waste Minimization and Management”. IPIECA Report Series, Vol. 12, 2000.
36. Brian Dicks, Hugh Parker, Karen Purnell and Richard Santner. “Termination of Shoreline Cleanup – A Technical Perspective”, ITOPF.
37. Mediterranean Technical Working Group (MTWG). “Mediterranean Oil Spill Waste Management Decision Support Tool”, REMPEC, 2009.
38. «Εθνικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση περιστατικών ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες (National Contingency Plan)». Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας – Διεύθυνση Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος, Πειραιάς 2001.
39. «Εγχειρίδιο καταπολέμησης ρύπανσης». Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας – Διεύθυνση Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος.