



MarinerMuse: Εξυπνη Διαχείριση Τιμολόγησης & Ναυτιλιακής Κίνησης στη Διώρυγα της Κορίνθου

Ερευνητική Μονάδα “ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ”, Ε.Κ. ΑΘΗΝΑ

Γιώργος Κοτζιάς* Χρήστος-Ιωάννης Μάλλιος† Μαρία Γιοντζή†
Γιάννης Χαιρέτης† Ανδρέας Τριτσαρώλης‡

August 7, 2023

1 Εισαγωγή

Η Διώρυγα της Κορίνθου ενώνει το Σαρωνικό με τον Κορινθιακό κόλπο, στη θέση του Ισθμού της Κορίνθου, λίγο ανατολικότερα από την πόλη της Κορίνθου. Η θαλάσσια διέλευση μέσω της διώρυγας παρέχει σημαντικά οφέλη στην διεθνή ναυτιλία συγκριτικά με τον περίπλου της Πελοποννήσου, καθώς η διαφορά στα ναυτικά μίλια, συνεπάγεται τόσο εξοικονόμηση χρόνου όσο και κατανάλωσης καυσίμου, με το τελευταίο να επιφέρει πολλαπλά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Για την διέλευση των πλοίων, το Κέντρο Ελέγχου Ακτής (Shore Control Center) διαχειρίζεται την ναυτιλιακή κίνηση από/προς τον ισθμό μέσω σταθερών χρονοδιαγραμμάτων. Παρότι ως σύστημα είναι λειτουργικό, εγείρονται ερωτήματα ως προς την αποδοτικότητα των εν λόγω συστημάτων, καθώς παρατηρούνται μεγάλες καθυστερήσεις στο χρονοδιάγραμμα οι οποίες συνεπάγονται με αύξηση της κίνησης γύρω από τη Διώρυγα, με συνέπειες τόσο οικονομικές, όσο και περιβαλλοντικές, λόγω της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου.

Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου συστήματος διαχείρισης κίνησης, με στόχο την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Παράλληλα, το εν λόγω σύστημα θα πρέπει να παρέχει και μια σειρά δυνατοτήτων στους πελάτες της διώρυγας με σκοπό την διασφάλιση ενός άνετου και ομαλού ταξιδιού, προσελκύοντας και μικρότερες επιχειρήσεις/σκάφη να χρησιμοποιήσουν τη Διώρυγα σε μελλοντικά τους δρομολόγια.

*Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, el16739@mail.ntua.gr

†Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, {sdi1900106, sdi1700022, sdi1800208}@di.uoa.gr

‡Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, andrewt@unipi.gr

Στο πλαίσιο αυτό, προτείνουμε το *MarinerMuse*, μια εφαρμογή έξυπνης τιμολόγησης και διαχείρισης κίνησης στη Διώρυγα της Κορίνθου με σκοπό τη μείωση καθυστερήσεων στη διέλευση των πλοίων, μεγιστοποιώντας την αξιοποίηση της Διώρυγας. Μέσω της εν λόγω εφαρμογής, επιτυγχάνεται ο παραπάνω διπλός στόχος, ελαχιστοποιώντας την συνολική αναμονή των πλοίων, παρέχοντας ταυτόχρονα ευέλικτα εκπρωτικά σχήματα και προσφορές στους πελάτες της Διώρυγας. Η πειραματική μας μελέτη σε δεδομένα πραγματικής κίνησης, δεικνύει ότι το *MarinerMuse* βελτιώνει σημαντικά τη ροή ναυτιλιακής κίνησης μειώνοντας τη μέση αναμονή από μισή ώρα στα 10 λεπτά ανά πλοίο.

Η τεχνική αναφορά μας διαρθρώνεται ως εξής: Η Ενότητα 2 παρουσιάζει τη βιβλιογραφία σχετικά με το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού πλοίων, με την Ενότητα 3 να περιγράφει την προσέγγιση που ακολουθήσαμε. Η Ενότητα 4 περιγράφει τη διεπαφή του αλγορίθμου μας, καθώς και τη λειτουργικότητά της ως προς τη διαχείριση δεδομένων, προσφορών, και εκπρωτικών σχημάτων, αντίστοιχα. Η Ενότητα 5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πειραματικής μας μελέτης χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων πραγματικής κίνησης. Τέλος, η Ενότητα 6 συνοψίζει την αναφορά μας, παρέχοντας κατευθύνσεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το πρόβλημα που μελετάμε ανάγεται στο χρονοπρογραμματισμό πλοίων. Στη βιβλιογραφία, το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει μελετηθεί από διαφορετικές σκοπιές, όπως η μείωση του χρόνου ελλιμενισμού (είσοδος και παραμονή σε λιμάνι) ή της αγκυροβόλησης, η αποδοτική χρήση καναλιού και προβλήτας, βελτιστοποίηση σχετικά με παραμέτρους ευστάθειας του πλοίου κ.ά. Προσεγγίσεις του προβλήματος, περιλαμβάνουν τη χρήση ευριστικών μεθόδων [1, 2], γενετικών αλγορίθμων [3, 4, 5] μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού και μηχανικής μάθησης [6], με την πλειοψηφία εξ αυτών να αφορούν τη δημιουργία χρονοδιαγράμματος βασισμένο στις στατικές πληροφορίες των πλοίων.

Η πλησιέστερη εργασία στη μεθοδολογία μας είναι αυτή των Liu et al. [5], όπου ελαχιστοποιούν τον μέσο χρόνο αναμονής των εν αναμονή πλοίων σε μονόδρομο κανάλι, χρησιμοποιώντας Γενετικούς Αλγορίθμους. Τα σημεία στα οποία η προσέγγισή μας διαφοροποιείται από την παραπάνω έγκειται στα δομικά στοιχεία του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε διασταύρωση δυο σημείων (two-point crossover), και επιλογή τουρνουά (tournament selection), για το “εξελικτικό” κομμάτι του αλγορίθμου, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούμε μια παραλλαγή του τελεστή μετάλλαξης (mutation), όπου αξιοποιούμε μεθόδους από τη μηχανική μάθηση (i.e., decay rate), προκειμένου να ενθαρρύνουμε την εξερεύνηση περισσότερο στην αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης, και λιγότερο στο τέλος, όπου ο αλγόριθμος μπαίνει στη φάση της σύγκλισης. Για ταχύτερη σύγκλιση, προσθέτουμε κατά την αρχικοποίηση του πληθυσμού δυο baseline λύσεις που ακολουθούν τη λογική FIFO (First In First Out) ως προς τον χρόνο ή/και τη κατεύθυνση (από/προς Κορινθιακό Κόλπο). Ο συνδυασμός τους με τις τυχαίες λύσεις που παράγει ο αλγόριθμος κατά την εξερεύνηση, ενδέχεται να τον οδηγήσει σε ένα τοπικό βέλτιστο, το οποίο θα αποτελεί μια προσαρμοσμένη (fine-tuned) εκδοχή των baseline λύσεων.

3 Μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα διατυπώνουμε το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού των εν αναμονή πλοίων, και περιγράφουμε τη δομή του αλγορίθμου μας.

3.1 Διατύπωση Προβλήματος

Φορμαλιστικά, το πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε ανάγεται στην εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας των εν αναμονή πλοίων, τέτοια ώστε να ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο αναμονής. Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να βρεθεί με διάφορους τρόπους, π.χ., με εξαντλητική αναζήτηση (brute force). Ωστόσο, η εν λόγω προσέγγιση δεν είναι εφικτή σε ρεαλιστικά σενάρια, λόγω του εκθετικού χρόνου αναζήτησης της βέλτιστης λύσης.

Συνεπώς, θα πρέπει να βρούμε μια υποβέλτιστη λύση, η οποία θα ισορροπεί το trade-off μεταξύ ποιότητας (με την έννοια της συνολικής αναμονής) και χρόνου εύρεσης. Με αυτό τον περιορισμό κατά νου, αξιοποιούμε τεχνικές βελτιστοποίησης από την οικογένεια των γενετικών αλγορίθμων. Στην επιστήμη των υπολογιστών, ο γενετικός αλγόριθμος είναι μια μετα-ευρετική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων στοχαστικής βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής (natural selection) του Δαρβίνου και ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων, με εφαρμογές σε προβλήματα στοχαστικής βελτιστοποίησης.

Ένας γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, όπου σε κάθε γύρο (εφεξής γενιά – generation) επιλέγεται ένας αρχικός πληθυσμός, στη δική μας περίπτωση ένα σύνολο από N μεταθέσεις πλοίων (χρωμοσώματα – chromosomes). Για κάθε μετάθεση του πληθυσμού που προκύπτει ανά γενιά υπολογίζεται η καταλληλότητά του, μέσω μιας συνάρτησης καταλληλότητας. Έπειτα, εκτελείται οι τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης των χρωμοσωμάτων, με σκοπό να δημιουργηθεί ένας νέος πληθυσμός. Οι συγκεκριμένοι τελεστές, αποτελούν το “εξελικτικό” κομμάτι του αλγορίθμου, επιτρέποντας την εξερεύνηση νέων μεταθέσεων, που ενδεχομένως να εμφανίσουν πιο συμφέρουσες λύσεις. Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα της μεταφοράς ενός μέρους του πληθυσμού ως έχει απευθείας στην επόμενη γενιά (ελιτισμός – elitism), ούτως ώστε η ποιότητα που λαμβάνεται από τον γενετικό αλγόριθμο, δεν θα μειωθεί προϊόντος χρόνου.

3.2 Επισκόπηση MarinerMuse

Ο Αλγόριθμος 1 απεικονίζει τη ραχοκοκκαλιά του γενετικού αλγορίθμου μας. Το πρώτο βήμα (γραμμή 1), αποτελεί την αρχικοποίηση του πληθυσμού, η οποία απεικονίζεται από τον Αλγόριθμο 2. Πρόκειται για ένα σύνολο $N - 2$ τυχαίων μεταθέσεων των γονιδιωμάτων με κάθε γονιδίωμα να αντιπροσωπεύει ένα εν αναμονή πλοίο. Κατά την δημιουργία του πληθυσμού, προσθέτουμε 2 μεταθέσεις οι οποίες ακολουθούν την αρχή FIFO (First In First Out), όπου θεωρούμε ότι η είσοδος των πλοίων γίνεται κατά αύξουσα σειρά ως προς τον χρόνο άφιξης ή/και τη κατεύθυνσή τους (από/προς τον Κορινθιακό Κόλπο).

Έπειτα, σε κάθε γενιά, υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος αναμονής για κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού (γραμμή 3) μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας, η οποία περιγράφεται στον Αλγόριθμο 3. Εν ολίγοις, ένα πλοίο μπορεί να έχει είτε μηδενική καθυστέρηση, αν παραδείγματος χάρη, δεν υπάρχει κίνηση εντός της Διώρυγας, είτε ολιγόλεπτη καθυστέρηση, της οποίας η διάρκεια εξαρτάται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του πλοίου. Πιο

Algorithm 1: MARINERMUSE. Διαχείριση ναυτιλιακής ροής κίνησης σε μονόδρομο κανάλι.

Input: List of waiting vessels $ships$, Number of generations K , Population Size N , Tournament Size M , Elitism rate p_{elite} , Mutation rate p_{mutate} , Decay rate γ , Safety distance ratio $dist_r$, Max. Speed Limit $speed_{max}$

Output: Optimal transit delay $cost^*$, Optimal transit sequence $perm^*$

```

1  $population \leftarrow \text{MAKEPOPULATION}(ships, N)$ ;
2 for  $i \leftarrow 1$  to  $K$  do
3    $cost^*, perm^* \leftarrow \text{FITNESS}(population, dist_r, speed_{max})$ ;
4   if  $\text{CONVERGED}(population)$  then
5     return  $cost^*, perm^*$ ;
6    $population' \leftarrow \text{ELITISM}(population, p_{elite})$ ;
7   while  $|population'| \neq |population|$  do
8      $parent_1, parent_2 \leftarrow \text{SELECTION}(population, M)$ ;
9      $offspring \leftarrow \text{CROSSOVER}(parent_1, parent_2)$ ;
10     $offspring \leftarrow \text{MUTATION}(p_{mutate})$ ;
11     $p_{mutate} \leftarrow p_{mutate} \times \gamma$ ;
12     $population' \leftarrow population' \cup \{offspring\}$ ;
13  end
14   $population \leftarrow population'$ ;
15 end
16 return  $perm^*, cost^*$ ;

```

συγκεκριμένα, στην περίπτωση δύο αντίρροπων πλοίων, το ένα περιμένει το άλλο να διασχίσει τη Διώρυγα, ενώ σε ομόρροπα πλοία, υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε το ένα πλοίο να ακολουθήσει το άλλο τηρώντας τις αποστάσεις ασφαλείας.

Algorithm 2: MAKEPOPULATION. Αρχικοποίηση πληθυσμού χρωμοσωμάτων.

Input: List of waiting vessels $ships$, Population Size N

Output: Initial chromosomes' population $population$

```

1  $eta\_order \leftarrow \{ship_1, \dots, ship_N \in ships : ship_i.eta \leq ship_j.eta, i \neq j\}$ ;
2  $eta\_direction\_order \leftarrow \{ship_1, \dots, ship_N \in ships : ship_i.eta \leq ship_j.eta \wedge ship_i.direction \leq ship_j.direction, i \neq j\}$ ;
3  $population \leftarrow \{eta\_order, eta\_direction\_order\}$ ;
4  $population \leftarrow population \cup \text{RANDOM\_UNIQUE\_PERMUTATIONS}(ships, N - 2)$ ;
5 return  $population$ ;

```

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη σύγκλιση του Αλγορίθμου 1 σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, χρησιμοποιούμε τον τελεστή του Ελιτισμού (Elitism – γραμμή 6). Ο εν λόγω τελεστής επιλέγει σε κάθε γενιά, πλην της αρχικής, ένα υποσύνολο των προηγούμενων – μέχρι στιγμής – βέλτιστων χρωμοσωμάτων (δηλ. ακολουθία διέλευσης εν αναμονή πλοίων), και το μεταφέρει αυτούσιο στην επόμενη γενιά, θυμίζοντας τη διαδικασία της φυσικής επιλογής. Ως προς το “εξελικτικό” κομμάτι του αλγορίθμου (δηλ., τη δημιουργία νέου πληθυσμού), χρησιμοποιούμε τους τελεστές της Επιλογής (Selection – γραμμή 8), της Διασταύρωσης (Crossover – γραμμή 9), και της Μετάλλαξης (Mutation – γραμμή 10), αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, για την επιλογή δυο χρωμοσωμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος του

Algorithm 3: FITNESS. Υπολογισμός συνολικού χρόνου αναμονής για κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού.

Input: Chromosomes' population $population$, Safety distance ratio $dist_r$, Max. Speed Limit $speed_{max}$

Output: Best transit delay $cost_{best}$, Best transit sequence $perm_{best}$

```

1  $costs_{total} \leftarrow \emptyset$ ;
2 for chromosome  $perm \in population$  do
3    $cost_{total} \leftarrow 0$ ;
4    $perm_{departure}^0 \leftarrow perm_{eta}^0 + perm_{delta}^0$ ;
5   for  $i \leftarrow 1$  to  $|perm|$  do
6      $delay \leftarrow 0$ ;
7      $time_{cross} \leftarrow perm_{eta}^i + perm_{delta}^i$ ;
8     if  $perm_{direction}^{i-1} \neq perm_{direction}^i$  then
9       if  $perm_{departure}^{i-1} > perm_{eta}^i$  then
10         $delay \leftarrow perm_{departure}^{i-1} - perm_{eta}^i$ ;
11         $cost_{total} \leftarrow cost_{total} + delay$ ;
12     else
13        $dist_{safe} \leftarrow perm_{length}^i \times dist_r$ ;
14        $time_{safe} \leftarrow \frac{dist_{safe}}{perm_{speed}^i \times speed_{max}}$ ;
15       if  $perm_{eta}^{i-1} \leq perm_{eta}^i$  then
16          $\Delta t \leftarrow perm_{eta}^i - (perm_{departure}^{i-1} - perm_{delta}^{i-1})$ ;
17          $\Delta x \leftarrow (perm_{speed}^{i-1} \times speed_{max}) \times \Delta t - perm_{length}^{i-1}$ ;
18         if  $\Delta x \leq dist_{safe}$  then
19           if  $perm_{departure}^{i-1} > perm_{eta}^i$  then
20              $delay \leftarrow \frac{dist_{safe} - \Delta x}{perm_{speed}^i \times speed_{max}}$ ;
21              $cost_{total} \leftarrow cost_{total} + delay$ ;
22         else
23            $\Delta eta \leftarrow perm_{eta}^{i-1} - perm_{eta}^i$ ;
24            $delay \leftarrow \Delta eta + time_{safe}$ ;
25            $cost_{total} \leftarrow cost_{total} + \Delta eta + time_{safe}$ ;
26        $perm_{departure}^i \leftarrow time_{cross} + delay$ ;
27        $costs_{total} \leftarrow costs_{total} \cup \{cost_{total}\}$ ;
28   end
29   return  $\min(costs_{total}), population^{\arg \min(cost_{total})}$ ;
30 end

```

τουρνουά (Tournament Selection), με την Εικόνα 1 να απεικονίζει ένα παράδειγμα χρήσης. Από τον πληθυσμό των χρωμοσωμάτων (δηλ., μεταθέσεων) της προηγούμενης γενιάς επιλέγεται ένα υποσύνολο M στο πλήθος χρωμοσωμάτων, και από αυτό η καταλληλότερη μετάθεση, με άλλα λόγια, εκείνη με τον μικρότερο χρόνο αναμονής για το σύνολο των πλοίων. Έχοντας επιλέξει δύο χρωμοσώματα μέσω του τελεστή της επιλογής, σειρά έχει ο τελεστής της Διασταύρωσης, με την Εικόνα 2 να απεικονίζει τον τρόπο λειτουργίας του. Σε αυτό το στάδιο, από το ένα χρωμόσωμα-γονέα επιλέγεται ένα υποσύνολο, το οποίο μεταφέρεται



Figure 1: Παράδειγμα επιλογής με μέθοδο τουρνουά (tournament selection) [7].

αυτούσιο στο χρωμόσωμα-παιδί, με τα υπόλοιπα γονιδιώματα να συμπληρώνονται από το δεύτερο χρωμόσωμα-γονέα με τη σειρά που εκείνα εμφανίζονται (two-point crossover).

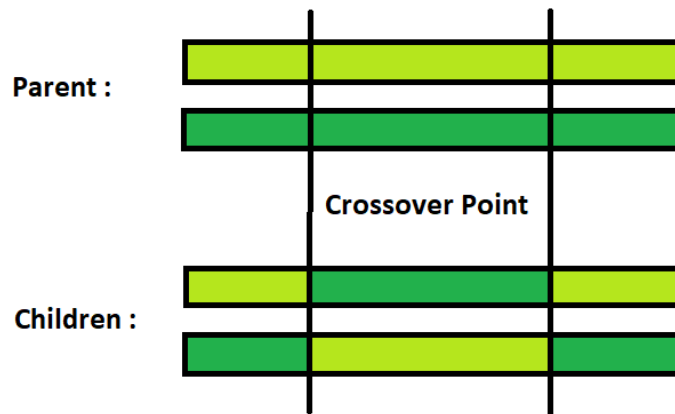
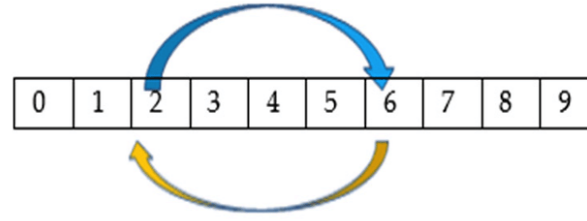
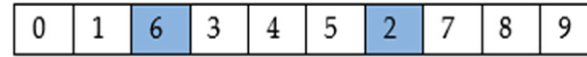


Figure 2: Παράδειγμα αντιστοίχισης δυο σημείων (two-point crossover) [7].

Έπειτα, για το χρωμόσωμα-παιδί που έχει προκύψει από τη διαδικασία της αντιστοίχισης, ακολουθεί η διαδικασία της Μετάλλαξης (Mutation). Συγκεκριμένα, επιλέγονται δύο τυχαία γονιδιώματα του χρωμοσώματος και εναλλάσσονται οι θέσεις τους. Η μετάλλαξη δεν συμβαίνει πάντοτε, αλλά με πιθανότητα, η οποία αρχικοποιείται με υψηλή τιμή, και εν συνεχεία μειώνεται σταδιακά, ανάλογα με την τιμή του decay rate (γ). Το παραπάνω ενθαρρύνει τη διεύρυνση του μετώπου αναζήτησης στις πρώτες γενιές, και την αποθαρρύνει στις τελευταίες, με σκοπό την ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου. Μόλις ολοκληρωθεί η δημιουργία του νέου πληθυσμού, ελέγχεται το κριτήριο σύγκλισης, το οποίο ικανοποιείται αν έχουμε, (i) επανάληψη της βέλτιστης λύσης για συγκεκριμένο αριθμό γενιών, (ii) πληθυσμό που έχει εκφυλιστεί σε επανάληψη ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος, (iii) μηδενικό χρόνο αναμονής στο βέλτιστο (μέχρι στιγμής) χρωμόσωμα. Μόλις ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης, επιστρέφεται ως αποτέλεσμα η (τοπικά) βέλτιστη ακολουθία των εν αναμονή πλοίων, καθώς και ο αντίστοιχος – συνολικός – χρόνος αναμονής (γραμμή 16).



(a) Before applying the swap mutation operator



(b) After applying the swap mutation operator

Figure 3: Παράδειγμα μετάλλαξης (mutation) ενός χρωμοσώματος – προσαρμοσμένο από το [8].

4 Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη

Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε το Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη (Graphical User Interface – GUI) του MarinerMuse, καθώς και τη λειτουργικότητά του ως προς τη διαχείριση δεδομένων, προσφορών, και εκπαιδευτικών σχημάτων, αντίστοιχα.

4.1 Έξυπνη Τιμολόγηση

Ο υπολογισμός του κόστους διέλευσης των πλοίων από τη Διώρυγα αποτελείται από ένα σύνολο συναρτήσεων, το οποίο κατατάσσει τα εν αναμονή πλοία σε ένα σύνολο κατηγοριών τιμολόγησης. Συγκεκριμένα, η τιμολόγηση αποτελείται από το άθροισμα τριών συνιστωσών, με τον υπολογισμό τους να βασίζεται στη Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage) των πλοίων. Ειδική περίπτωση αποτελούν τα σκάφη αναψυχής, όπου ο υπολογισμός του κόστους διέλευσης γίνεται με βάση το μήκος του σκάφους.

Σχετικά με την πρώτη συνιστώσα, ο Πίνακας 1 απεικονίζει ενδεικτικά τη συνάρτηση υπολογισμού κόστους των Διοδίων για ένα πλοίο κατηγορίας τιμολόγησης A (δηλ., με Ελληνικό λιμένα απόπλου/κατάπλου). Για τη δεύτερη και τη τρίτη συνιστώσα, οι Πίνακες 2 και 3 απεικονίζουν τη συνάρτηση υπολογισμού κόστους των τελών ρυμούλκησης και πλοήγησης, αντίστοιχα. Ειδικότερα για την τρίτη συνιστώσα (δηλ., πλοήγηση), το κόστος είναι σταθερό και ίσο με 220€ ανεξάρτητα από την κατηγορία τιμολόγησης.

Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage; Tonnes)	Διόδια (Toll Fees; €)
0-100	170
> 100	$170 + (100 - \text{Net Tonnage}) \cdot 0.66$

Table 1: Υπολογισμός κόστους διοδίων (Κατηγορία A)

Συνδυαστικά με τον υπολογισμό της διέλευσης, προτείνονται τιμολογιακές αναπροσαρμογές με βάση συγκεκριμένων εκπαιδευτικών σχημάτων. Συγκεκριμένα, πλοία που έχουν τη δυνατότητα διέλευσης από τη Διώρυγα, ενδέχεται να πραγματοποιήσουν το γύρο της Πελοποννήσου, σε περιπτώσεις που αυτή η επιλογή κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα ως προς

Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage; Tonnes)	Ρυμούλκηση (Towage Fees; €)
0-100	220
> 100	$220 + (100 - \text{Net Tonnage}) \cdot 0.25$

Table 2: Υπολογισμός κόστους ρυμούλκησης

Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage; Tonnes)	Πλοήγηση (Pilotage; €)
0-100	220
> 100	220

Table 3: Υπολογισμός κόστους πλοήγησης για κάθε κατηγορία διέλευσης/πλοίου

την κατανάλωση καυσίμου. Με βάση τις στατικές πληροφορίες (δηλ., κατανάλωση μηχανής) των πλοίων, τις ιδιότητες του ταξιδιού και την τρέχουσα τιμή του ναυτιλιακού δείκτη MGO¹, η εφαρμογή μας υπολογίζει το κόστος που θα απαιτούσε η διέλευση μέσω του γύρου της Πελοποννήσου για τα αντίστοιχα πλοία. Στην περίπτωση που ο γύρος της Πελοποννήσου αποτελεί συμφέρουσα επιλογή, προτείνεται η εφαρμογή εκπρωτικού πακέτου με σκοπό τη μείωση της διαφοράς κόστους. Σε περίπτωση που η απόκλιση είναι μεγάλη, εφαρμόζεται άνω όριο (πλαφόν) βάσει καθορισμένου ποσοστού από τον χειριστή της εφαρμογής.

4.2 Διεπαφή Κέντρου Ελέγχου Ακτής

Η Εικόνα 4 απεικονίζει ένα στιγμιότυπο της διεπαφής χρήστη. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή αναλαμβάνει την απεικόνιση των εν αναμονή πλοίων της τρέχουσας ημέρας, την εξέλιξη της τιμής του δείκτη ναυτιλιακού καυσίμου (MGO – Marine GasOil), της συνολικής καθυστέρησης ανά τύπο πλοίου, καθώς και των υπερπαραμέτρων τόσο του Αλγορίθμου 1, όσο και του μηχανισμού έξυπνης τιμολόγησης (βλ. Ενότητα 4.1).

Ειδικότερα, για τα εν αναμονή πλοία της τρέχουσας ημέρας, δίνονται αναγνωριστικές πληροφορίες όπως το IMO, το όνομα, η ημερομηνία άφιξης, η κατεύθυνση διέλευσης (από/προς Κορινθιακό Κόλπο) και ο αριθμός διάπλου. Επιπλέον, παρέχεται η αντίστοιχη πληροφορία για την τιμολόγηση των ταξιδιών, με τα επιμέρους κομμάτια της καθώς και η σύγκριση με το κόστος του γύρου της Πελοποννήσου, όπως επίσης και η δυνατότητα ανανέωσης των τιμών με βάση το άνω όριο της έκπτωσης που ο χρήστης μπορεί να επιλέξει. Ο εν λόγω πίνακας ανανεώνεται περιοδικά σε ημερήσια βάση, μιας και οι καταχωρήσεις εισόδου στην Διώρυγα παρέχονται αθροιστικά σε δέσμες (batches) μιας ημέρας.

Παράλληλα, μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, υπολογίζονται και οπτικοποιούνται οι πληροφορίες για την άφιξη των πλοίων, την προβλεπόμενη καθυστέρηση ένταξης τους, καθώς και την προβλεπόμενη αποχώρησή τους. Ως προς τους βαθμούς ελευθερίας, ο χρήστης της εφαρμογής μπορεί να αποκρύψει/εμφανίσει πληροφορίες που αφορούν πιο τεχνικά κομμάτια, παραδείγματος χάρι τις συνιστώσες τιμολόγησης (“Tolls”, “Towage” και “Pilotage Fees”).

Στην διαχείριση της κοστολόγησης των ναύλων, σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή του ναυτιλιακού καυσίμου, που διαφέρει ανάλογα με το λιμάνι άφιξης των πλοίων. Έτσι, η γραφική

¹Mediterranean and Black Sea Bunker Prices, <https://shipandbunker.com/prices/emea/medabs> [Accessed 01-Mar-2023].

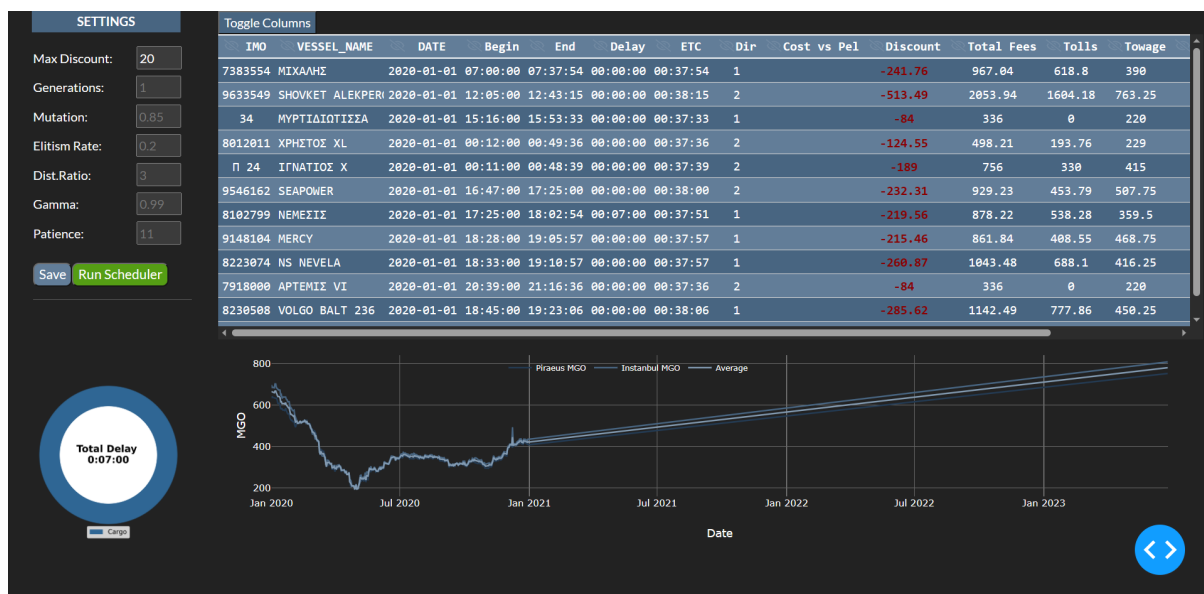


Figure 4: Γραφικό Περιβάλλον MarinerMuse – Χρονοπογραμματισμός εν αναμονή πλοίων στις 01/01/2020.

μας απεικονίζει την εξέλιξη του δείκτη MGO για τα λιμάνια της Κωνσταντινούπολης και του Πειραιά, καθώς κρίνονται ως τα λιμάνια άφιξης/προορισμού που αφορούν περισσότερο τα δρομολόγια που θα εκτελεστούν με πέρασμα την Διώρυγα. Για τον ακριβή υπολογισμό των ναύλων και των αντίστοιχων προσφορών, η γραφική μας ανανεώνεται περιοδικά μέσω web scraping.

Αναφορικά με τον πίνακα των υπερπαραμέτρων (“Settings”), ο χειριστής μπορεί να αλλάξει τις ελεύθερες παραμέτρους του Αλγορίθμου 1, καθώς και την επιλογή της μέγιστης δυνατής έκπτωσης που θα εφαρμόζεται μέσω του πίνακα, με τις προκαθορισμένες τιμές να αναγράφονται επισκιασμένες. Τέλος, το πλήκτρο “Save” αποθηκεύει τις παραμέτρους που έθεσε ο χρήστης, ανανεώνοντας παράλληλα το ποσό της – μέγιστης – έκπτωσης που θα εφαρμοστεί, με το πλήκτρο “Run Scheduler” να εκτελεί εκ νέου τον Αλγόριθμο 1 βάσει των παραπάνω παραμέτρων.

5 Πειραματική Μελέτη

Η εν λόγω ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πειραματικής μας μελέτης χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων πραγματικής κίνησης. Ο πηγαίος κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματά μας είναι διαθέσιμος στη διεύθυνση: <https://github.com/Data4SocialGood/MarinerMuse>.

5.1 Δεδομένα και Προεπεξεργασία

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε² αποτελούνται από ιστορική πληροφορία ναυτιλιακής κίνησης (δηλ. διελεύσεις πλοίων) στη Διώρυγα της Κορίνθου κατά το χρονικό διάστημα 2019–2020 (2 έτη).

Πιο συγκεκριμένα, κάθε εγγραφή από το παραπάνω σύνολο δεδομένων, συνοδεύεται από

²Παρέχεται ευγενικά από την Ανώνυμο Εταιρία Διώρυγος Κορίνθου (ΑΕΔΙΚ)

το όνομα και τον τύπο του πλοίου, τον λιμένα απόπλου/κατάπλου, την κατεύθυνσή του (από/προς Κορινθιακό Κόλπο), καθώς και άλλες πληροφορίες (π.χ., καθαρή χωρητικότητα) που βοηθούν στον υπολογισμό των ναύλων. Ως προς τη διαδικασία χρονοδρομολόγησης, βασιστήκαμε στην ώρα άφιξης (ETA), εισόδου, εξόδου και την αναμονή, η οποία ορίζεται ως η διαφορά ώρας εισόδου και άφιξης στη Διώρυγα.

Σχετικά με την προεπεξεργασία των δεδομένων, οι στήλες που περιέχουν χρονική πληροφορία, μετατρέπονται στη μορφή “HH:MM”, όπου “HH” και “MM” η ώρα και τα λεπτά, αντίστοιχα. Επιπλέον, η στήλη με το χρόνο αναμονής συμπληρώνεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$Delay = (Departure - Arrival) \cdot 1440 + 1440 \pmod{1440} \quad [5.1]$$

Η Εικόνα 5 απεικονίζει την κατανομή του συνολικού πλήθους αφίξεων ως προς τον χρόνο. Παρατηρούμε ότι ακολουθούν όμοια κατανομή, με ελαφρές διακυμάνσεις ως προς τον όγκο των πλοίων, με την κρίσιμη μάζα τους να διασχίζει τη διώρυγα στο χρονικό διάστημα 12:00 – 17:00, ενώ στις πρωινές και τις βραδινές ώρες, η κίνηση είναι εμφανώς μειωμένη.

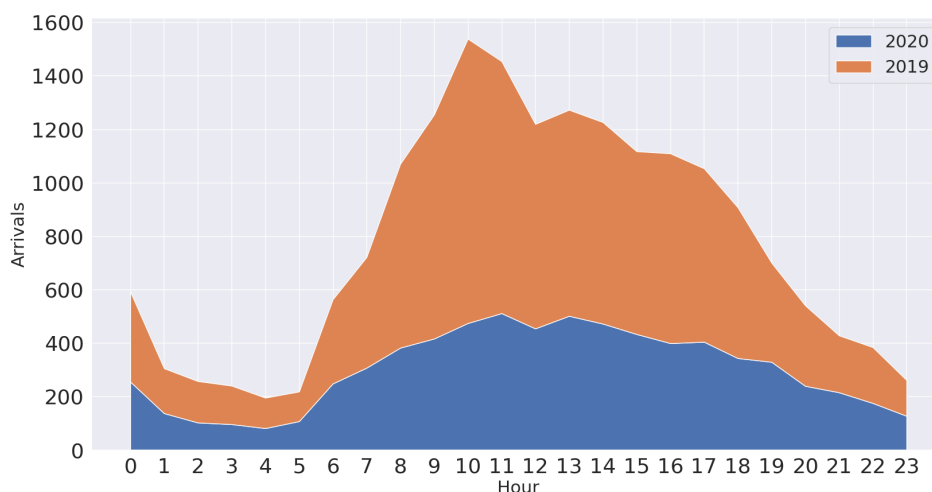


Figure 5: Κατανομή χρόνου άφιξης για τα έτη 2019 (πορτοκαλί) και 2020 (μπλε), αντίστοιχα.

Επιπλέον, προκειμένου να εξασφαλιστεί ομοιομορφία τις τιμές του τύπου πλοίων, μετατρέπονται σε πεζά, και συγχωνεύονται μέσω κανονικών εκφράσεων, συγχωνεύονται οι υποκατηγορίες σε μια ενιαία. Επί παραδείγματι, οι κατηγορίες “Daily Passenger Vessel” και “Passenger Vessel”, συμψηφίζονται στην ενιαία κατηγορία “passenger”. Η Εικόνα 6 απεικονίζει την κατανομή των πλοίων ως προς τον τύπο τους για τα έτη 2019 και 2020, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι ο κυρίαρχος τύπος πλοίου και στα δύο αυτά έτη, είναι τα yacht, ενώ ακολουθούν τα ferry και τα cargo.

5.2 Πειραματικά Αποτελέσματα

Η Εικόνα 7 απεικονίζει την αθροιστική – συνολική – καθυστέρηση ανά μήνα για τα έτη 2019 και 2020, αντίστοιχα. Συγκριτικά με την ιστορική δρομολόγηση, παρατηρούμε, δίχως βλάβη της γενικότητας, ότι ο συνολικός χρόνος αναμονής μειώνεται τουλάχιστον κατά 1/3 στη

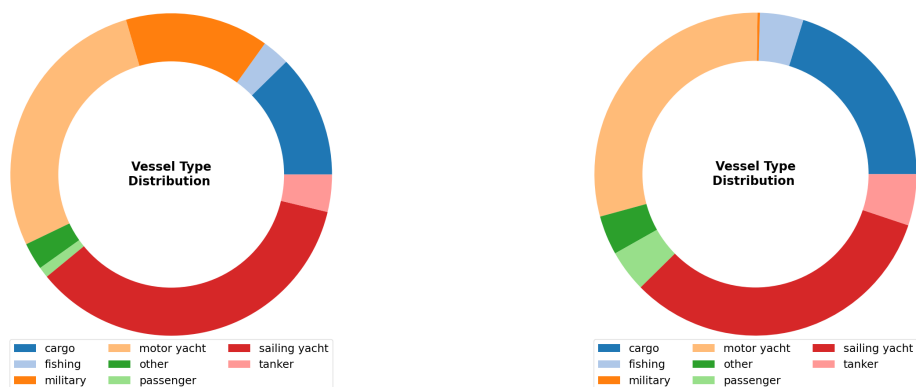


Figure 6: Κατανομή τύπου πλοίων για τα έτη 2019 (αριστερά), και 2020 (δεξιά), αντίστοιχα.

θερινή περίοδο, και κατά 1/6 στους μήνες της χειμερινής περιόδου, αντίστοιχα, με τον Πίνακα 4, να απεικονίζει τη συνολική καθυστέρηση (σε ώρες) για το τρίμηνο με τη μεγαλύτερη κίνηση κατά το έτος 2020.

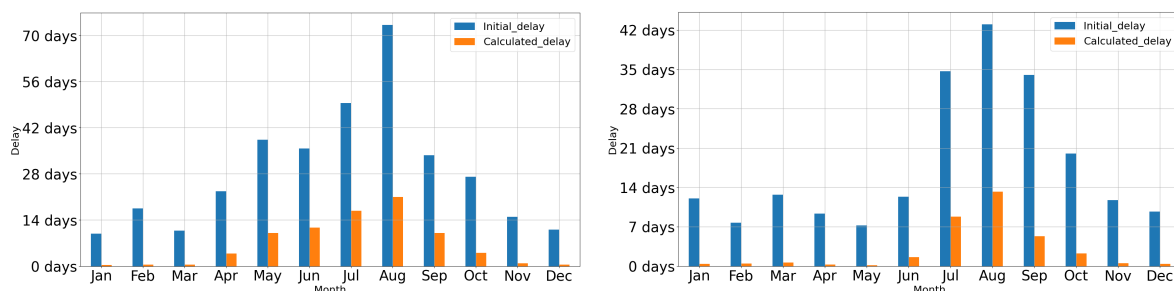


Figure 7: Συνολική καθυστέρηση ανά μήνα για τα έτη 2019 (αριστερά), και 2020 (δεξιά), αντίστοιχα.

	MarinerMuse	ΑΕΔΙΚ
Ιούλιος	209	826
Αύγουστος	315	1024
Σεπτέμβριος	126	810

Table 4: Συνολική καθυστέρηση (σε ώρες) για τους 3 μήνες (Ιούλιος – Σεπτέμβριος) με την μεγαλύτερη κίνηση για το έτος 2020

Εστιάζοντας στα αποτελέσματα του MarinerMuse, οι Εικόνες 8 και 9 απεικονίζουν τη κατανομή του χρόνου αναμονής ανά μήνα και ανά τύπο πλοίου για τα έτη 2019 και 2020, αντίστοιχα. Συγκριτικά με τα αποτελέσματα του χρονοπρογραμματισμού της ΑΕΔΙΚ, παρατηρούμε δίχως βλάβη της γενικότητας, ότι ο μέσος χρόνος αναμονής του MarinerMuse είναι σημαντικά μικρότερος, πετυχαίνοντας μέσο χρόνο αναμονής ≈ 10 λεπτά ανά πλοίο.

Σε ό,τι αφορά τη μορφή της κατανομής, ο λόγος για τον οποίο έχουμε μεγαλύτερο ενδοτεταρτημοριακό εύρος (interquartile range – IQR), οφείλεται στο ότι έχουμε αρκετές παρατηρήσεις έξω από το αναμενόμενο interval, οι οποίες ως outliers σπρώχνουν τη μέση τιμή πιο πάνω από τη μεσαία. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η ιστορική χρονοδρομολόγηση δεν έχει πουθενά μηδενική μεσαία τιμή, ούτε ανά τύπο πλοίου, ούτε ανά μήνα. Η εν λόγω συμπεριφορά είναι

αναμενόμενη καθώς στην περίπτωση όπου έχουμε δυο πλοία σε αντίρροπη κατεύθυνση, η αναμονή είναι της τάξεως των 35 έως 40 λεπτών, ίση με τον εκτιμώμενο χρόνο διέλευσης του πλοίου με τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα (5.5 κόμβοι). Με άλλα λόγια, οι όποιες καθυστερήσεις δημιουργηθούν, αφορούν – στον κύριο όγκο τους – την παραπάνω περίπτωση, η οποία και δεν μπορεί να αποφευχθεί σε διώρυγες μονής διέλευσης, όπως η Διώρυγα της Κορίνθου.

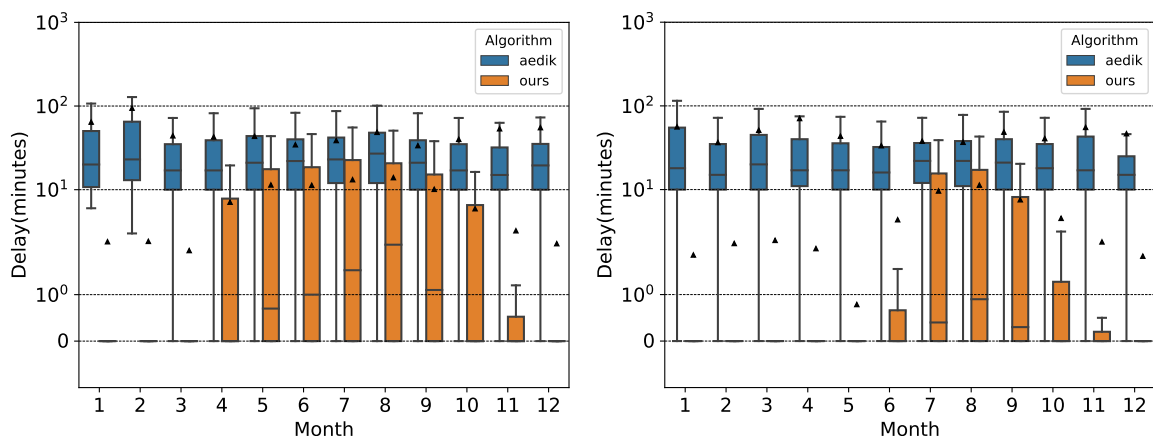


Figure 8: Κατανομή καθυστέρησης πλοίων ανά μήνα κατά το 2019 (αριστερά), και το 2020 (δεξιά), αντίστοιχα.

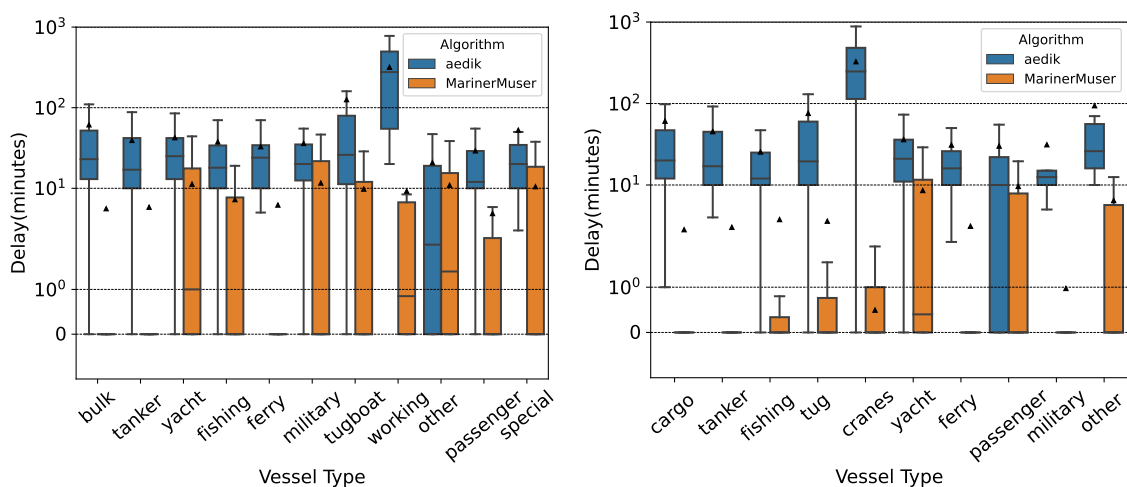


Figure 9: Κατανομή καθυστέρησης ανά τύπο πλοίου κατά το 2019 (αριστερά), και το 2020 (δεξιά), αντίστοιχα.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Ανακεφαλαιώνοντας, στην παρούσα τεχνική αναφορά προτείνουμε το *MarinerMuse*, ένα εργαλείο για έξυπνη διαχείριση τιμολόγησης και ναυτιλιακής κίνησης στη Διώρυγα της Κορίνθου. Η πειραματική μας μελέτη, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων πραγματικής κίνησης, αναδεικνύει την ποιότητα του αλγορίθμου επιτυγχάνοντας χρόνο αναμονής ≈ 10 λεπτά ανά πλοίο. Ειδικότερα, ο χαμηλός χρόνος απόκρισης του αλγορίθμου, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που παρέχει το γραφικό περιβάλλον χρήστη, καθιστούν τη Διώρυγα της Κορίνθου εφικτή και βιώσιμη επιλογή.

Αναφορικά με τους μελλοντικούς μας στόχους για το *MarinerMuse* σκοπεύουμε, πέραν της ενοποίησης του αλγορίθμου με τη βάση δεδομένων της ΑΕΔΙΚ, να βελτιώσουμε περαιτέρω την απόδοση του αλγορίθμου, δοκιμάζοντας προχωρημένα σχήματα βελτιστοποίησης. Επιπλέον, σκοπεύουμε να ενισχύσουμε την ευελιξία του *MarinerMuse* χρησιμοποιώντας δυναμικές τιμές για την απόσταση ασφαλείας και το όριο ταχύτητας, αντίστοιχα, βάσει των καιρικών συνθηκών, ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση της Διώρυγας, λαμβάνοντας υπόψη παράλληλα την ασφάλεια των διελεύσεων.

Συνεισφορά

Ο Γιώργος Κοτζιάς και ο Χρήστος-Ιωάννης Μάλλιος εστίασαν στην ανάπτυξη και δημιουργία του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, ενώ η Μαρία Γιοντζή και ο Γιάννης Χαιρέτης εστίασαν στην ανάπτυξη και τον σχεδιασμό του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη, με τον καθένα να συνεισφέρει εξίσου στη συγγραφή των αντίστοιχων ενοτήτων της τεχνικής αναφοράς. Ο Ανδρέας Τριτσαρώλης, ως συντονιστής του εν λόγω έργου, ανέλαβε την επίβλεψη των παραπάνω εργασιών, παρέχοντας συμβουλές σχετικά με την υλοποίηση και χρήση των αλγορίθμων και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τη σύνταξη/διόρθωση της τεχνικής αναφοράς.

References

- [1] Elisabeth Lübbecke, Marco E. Lübbecke, and Rolf H. Möhring. Ship traffic optimization for the kiel canal. *Operational Research*, 67(3):791–812, 2019.
- [2] S. Campbell, Wasif Naeem, and George W. Irwin. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*, 36(2):267–283, 2012.
- [3] Junjie Li, Xinyu Zhang, Bingdong Yang, and Nannan Wang. Vessel traffic scheduling optimization for restricted channel in ports. *Computers and Industrial Engineering*, 152:107014, 2021.
- [4] Xinyu Zhang, Xiang Chen, Changbin Xu, and Ruijie Li. Vessel scheduling optimization in different types of waterway. In *Proceedings of Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS)*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 57–69. Springer, 2017.
- [5] Dongdong Liu, Guoyou Shi, and Katsutoshi Hirayama. Vessel scheduling optimization model based on variable speed in a seaport with one-way navigation channel. *Sensors*, 21(16):5478, 2021.
- [6] K. Jairam Naik, Mounish Pedagandam, and Amrita Mishra. Workflow scheduling optimisation for distributed environment using artificial neural networks and reinforcement learning. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 24(6):653–670, 2021.
- [7] Genetically solving the age old Knapsack Problem - arpitbhayani.me. <https://arpitbhayani.me/blogs/genetic-knapsack/>. [Accessed 01-Mar-2023].

- [8] Mohamed Abdel-Basset, Reda Mohamed, Mohamed Abouhawwash, Victor Chang, and S. S. Askar. A local search-based generalized normal distribution algorithm for permutation flow shop scheduling. *Applied Sciences*, 11(11), 2021.