



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΟΥΡΩΝ ΣΕ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ:  
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΛΙΜΑΝΙ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ**

Διπλωματική Εργασία

Μαστραφτής Νικόλαος

Επιβλέπουσα: Δασκαλοπούλου Ασπασία

Βόλος 2021





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΟΥΡΩΝ ΣΕ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ:  
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΛΙΜΑΝΙ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ**

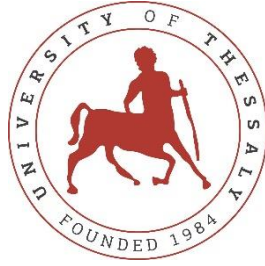
Διπλωματική Εργασία

Μαστραφτής Νικόλαος

Επιβλέπουσα: Δασκαλοπούλου Ασπασία

Βόλος 2021





**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**QUEUEING THEORY APPLICATION IN SERVICES: CASE  
STUDY AT THE PORT OF PIRAEUS**

Diploma Thesis

Mastrafsis Nikolaos

Supervisor: Daskalopulu Aspasia

Volos 2021



Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπουσα	<b>Δασκαλοπούλου Ασπασία</b> Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	<b>Μπαργιώτας Δημήτριος</b> Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	<b>Αργυρίου Αντώνιος</b> Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξή της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Ασπασία Δασκαλοπούλου για τη θετική της ανταπόκριση και την καλοσύνη της που οδήγησαν στη συνεργασία μας σε ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, αλλά και για τη βοήθειά της κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς επίσης και τους καθηγητές κ. Δημήτριο Μπαργιώτα και κ. Αντώνιο Αργυρίου που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, τις ευχαριστίες μου εκφράζω στην κα. Αλεξάνδρα Μπούσια για την πολύτιμη καθοδήγησή της ώστε να διεκπεραιωθεί η εργασία μου επιτυχώς, αλλά και για το κίνητρο που μου έδωσε μέσω της διδασκαλίας της για να εμβαθύνω στη μελέτη του πεδίου της μοντελοποίησης και απόδοσης συστημάτων.



## **ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Μαστραφτοής Νικόλαος  
Ιούλιος 2021



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο της συμφόρησης και της αναμονής σε κάποια ουρά με σκοπό την παροχή υπηρεσιών συναντάται καθημερινά σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες. Η μελέτη και βελτίωση τέτοιων φαινομένων επιτυγχάνεται με εφαρμογή της θεωρίας ουρών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται το φαινόμενο της λιμενικής συμφόρησης στο Σταθμό Εμπορευματοκιβωτίων του εμπορικού λιμένα του Πειραιά, ο οποίος αποτελεί αναπτυξιακό μοχλό για το διεθνές εμπόριο αλλά και για την τοπική και εθνική οικονομία, χάρη στην κομβική γεωγραφική του θέση. Για την μοντελοποίηση και τη μελέτη απόδοσης του συστήματος, οι μόνες απαιτούμενες παράμετροι είναι: (1) ο ρυθμός αφίξεων των πλοίων και (2) ο ρυθμός εξυπηρέτησής τους. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται για τη μελέτη καλύπτει το χρονικό διάστημα ενός έτους (Απρίλιος 2020-Μάρτιος 2021), ενώ τα ευρήματα υποδεικνύουν ένα σύστημα αρκετά αποδοτικό, με δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλών πελατών ταυτόχρονα αλλά και περιθώρια εξυπηρέτησης περισσότερων πλοίων ετησίως. Παράλληλα, το σύστημα προσομοιώνεται μέσω ενός κώδικα Python, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματά του με τα ευρήματα της ανάλυσης. Τέλος, παρατίθενται ορισμένες συστάσεις για μελλοντική χρήση, δεδομένου πως υπάρχουν επενδυτικά πλάνα για την ανάπτυξη του εμπορικού λιμένα γενικότερα.



## **ABSTRACT**

The phenomenon of congestion and waiting in a queue for the purpose of being provided with service is encountered daily in various human activities. The study and improvement of such phenomena is achieved by applying queuing theory. In the present thesis, the phenomenon of port congestion at the Container Station of the commercial port of Piraeus is studied, which is a growth lever for international trade but also for the local and national economy, thanks to its key geographical location. For the modeling and performance study of the system, the only required parameters are: (1) the rate of arrival of ships and (2) the rate of their service. The database used for the study covers the period of one year (April 2020-March 2021), while the findings indicate quite an efficient system, with the ability to serve multiple customers at once and room to service more ships per year. At the same time, the system is simulated through a Python code, in order to compare its results with the findings of the analysis. Finally, some recommendations for future use are given, as there are investment plans for the development of the commercial port in general.





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>1</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>3</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ</b> .....	<b>3</b>
2.1 Θεωρητικό πλαίσιο .....	3
2.2 Παραδείγματα θεωρίας ουρών .....	4
2.3 Επισκόπηση προηγούμενων μελετών σε λιμένες.....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>9</b>
<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΥΡΩΝ</b> .....	<b>9</b>
3.1 Χαρακτηριστικά ουρών αναμονής .....	9
3.1.1 Διαδικασία άφιξης .....	10
3.1.2 Διαδικασία εξυπηρέτησης .....	10
3.1.3 Πειθαρχία ουράς .....	11
3.1.4 Αριθμός σημείων εξυπηρέτησης .....	11
3.1.5 Δυνατότητα συστήματος .....	12
3.1.6 Φάσεις εξυπηρέτησης .....	12
3.2 Γενικό μοντέλο ουράς .....	13
3.3 Θεώρημα του Little .....	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	<b>16</b>
<b>ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΛΙΜΑΝΙ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ</b> .....	<b>16</b>
4.1 Το λιμάνι του Πειραιά.....	16
4.2 Μοντελοποίηση του συστήματος του εμπορικού λιμένα .....	19
4.3 Η ένταση κίνησης στο σύστημα .....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> .....	<b>23</b>
<b>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ</b> .....	<b>23</b>
5.1 Παρουσίαση στατιστικών στοιχείων .....	23
5.2 Υπολογισμός της έντασης κίνησης.....	27
5.3 Ο μέσος αριθμός πελατών στην ουρά και στο σύστημα.....	28

<b>5.4 Διακριτές πιθανότητες .....</b>	<b>29</b>
5.4.1 Πιθανότητα αναμονής .....	29
5.4.2 Πιθανότητα ύπαρξης n πλοίων.....	30
<b>5.5 Προσομοίωση του συστήματος .....</b>	<b>34</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>38</b>
<b>ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ .....</b>	<b>38</b>
6.1 Σύνοψη των ευρημάτων .....	38
6.2 Συμπεράσματα .....	40
6.3 Συστάσεις για μελλοντική χρήση .....	41
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>42</b>

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1:</b> Ουρά αναμονής στο νυχτερινό κέντρο διασκέδασης “Berghain” στο Βερολίνο ( <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berghain_Berlin_Waiting_Queue.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berghain_Berlin_Waiting_Queue.jpg</a> ) .....	<b>2</b>
<b>Εικόνα 2 :</b> Κώδικας προσομοίωσης του συστήματος (Lines 1-57) .....	<b>35</b>
<b>Εικόνα 3:</b> Κώδικας προσομοίωσης του συστήματος (Lines 58-112) .....	<b>35</b>

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Φόρμουλες του Little.....	14
Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Σ.ΕΜΠΟ. Πειραιά.....	23
Πίνακας 3: Μηνιαίες αφίξεις και μέσοι χρόνοι παραμονής.....	24
Πίνακας 4: Ένταση κίνησης ανά μήνα (erl).....	27
Πίνακας 5: Μέσοι χρόνοι και αριθμοί πελατών ανά μήνα.....	28
Πίνακας 6: $P_w$ ανά μήνα.....	29
Πίνακας 7: $P_n$ ανά μήνα.....	30
Πίνακας 8: $P_n$ ανά μήνα (συνέχεια) .....	31
Πίνακας 9: Simulation output (Columns A-F) .....	36
Πίνακας 10: Simulation output (Columns G-R) .....	36
Πίνακας 11: Τα μεγαλύτερα ευρωπαϊκά εμπορικά λιμάνια για το 2020 (portecconomics.eu) .....	39

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1:</b> Σχηματική απεικόνιση της βασικής δομής ενός συστήματος ουράς (ELL-785 Computer Communication Networks).....	<b>9</b>
<b>Σχήμα 2:</b> Τύποι μοντέλων ουρών.....	<b>12</b>
<b>Σχήμα 3:</b> Σύστημα πολλών φάσεων.....	<b>12</b>
<b>Σχήμα 4:</b> Το σύστημα ως μαύρο κουτί.....	<b>15</b>
<b>Σχήμα 5:</b> Χάρτης του λιμένα του Πειραιά (olp.gr).....	<b>17</b>
<b>Σχήμα 6:</b> Μέσος αριθμός αφίξεων και αναχωρήσεων ανά ώρα για μια τυχαία εβδομάδα (Πηγή: marinetraffic.com) .....	<b>25</b>
<b>Σχήμα 7:</b> Αφίξεις στο Αγκυροβόλιο Φεβρουάριος 2021 (marinetraffic.com) .....	<b>25</b>
<b>Σχήμα 8:</b> Αφίξεις στο Λιμάνι Φεβρουάριος 2021 (marinetraffic.com).....	<b>26</b>
<b>Σχήμα 9:</b> Απρίλιος-Μάιος 2020.....	<b>32</b>
<b>Σχήμα 10:</b> Ιούνιος-Ιούλιος 2020.....	<b>32</b>
<b>Σχήμα 11:</b> Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2020.....	<b>32</b>
<b>Σχήμα 12:</b> Οκτώβριος-Νοέμβριος 2020.....	<b>33</b>
<b>Σχήμα 13:</b> Δεκέμβριος 2020-Ιανουάριος 2021.....	<b>33</b>
<b>Σχήμα 14:</b> Φεβρουάριος-Μάρτιος 2021.....	<b>33</b>
<b>Σχήμα 15</b> Ετήσια διακίνηση Ε/Κ του PPA και PCT σε TEUs (olp.gr) .....	<b>39</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναμονή σε μία ουρά με σκοπό την παροχή υπηρεσιών για κάποιο πιθανό ζήτημα είναι ένα καθημερινό φαινόμενο, που όχι μόνο είναι αναπόφευκτο, αλλά γίνεται προοδευτικά χειρότερο, ειδικότερα σε αναπτυγμένες χώρες. Ο χρόνος κάθε ατόμου είναι πολύτιμος και το γεγονός ότι πρέπει να περιμένει καθημερινά να εξυπηρετηθεί περιμένοντας σε πολυάριθμες ουρές όπως σε τράπεζες, φανάρια, υπηρεσίες κλπ., καθώς επίσης και σε εντελώς διαφορετικά πλαίσια του σύγχρονου τρόπου ζωής, π.χ. η νυχτερινή διασκέδαση (Εικόνα 1), οδήγησε στην ανάγκη μελέτης του φαινομένου, με σκοπό τη βελτίωση του μέσα από μοντέλα πρόβλεψης της συμπεριφοράς συστημάτων εξυπηρέτησης για τυχαία αυξανόμενες απαιτήσεις.

Η διακίνηση αγαθών μέσω της ναυτιλίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το διεθνές εμπόριο. Όταν σχεδόν το 95% των προϊόντων παγκοσμίως διακινείται μέσω θαλάσσης από εμπορικά πλοία και μάλιστα λόγω παγκοσμιοποίησης το θαλάσσιο εμπόριο τείνει να εντείνεται, δίκαια κρίνεται αναγκαία η βελτίωση της λιμενικής συμμόρφωσης που γενικά επιφέρει μεγάλες οικονομικές ζημιές, ιδιαίτερα για αρκετά δραστήρια εμπορικά λιμάνια στα οποία παρατηρείται σχηματισμός μεγάλων ουρών αναμονής. Τέτοια λιμάνια βρίσκονται συνήθως σε πλεονεκτική γεωγραφική θέση και έτσι τείνουν να είναι όλο και πιο πολυάσχολα.

Η θεωρία ουρών (queuing theory) είναι ένας κλάδος των πιθανοτήτων και της επιχειρησιακής έρευνας, που χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα για τη μελέτη του φαινομένου της συμμόρφωσης που προκύπτουν από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες. Αναπτύχθηκε στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα για την επίλυση προβλημάτων τηλεφωνίας, ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιείται ευρέως και σε άλλους κλάδους, χάρη στον ακριβή υπολογισμό των μετρικών απόδοσης των συστημάτων, αλλά και στις ακριβείς λύσεις στα προβλήματα ουρών που προσφέρει.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθείται η εξής δομή: στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της θεωρίας ουρών μαζί με παραδείγματα εφαρμογών της καθημερινότητας αλλά και μελέτες περιπτώσεων εμπορικών λιμένων σε όλο τον κόσμο. Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται μια αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών και του γενικού μοντέλου μιας ουράς αναμονής, ενώ παρουσιάζονται ορισμένες χρήσιμες φόρμουλες προερχόμενες από το Θεώρημα του Little. Στο Κεφάλαιο 4 μοντελοποιείται το σύστημα του Container Terminal του Πειραιά και δίνεται το τυπολόγιο που ισχύει με βάση το μοντέλο που επιλέγεται, κατόπιν παρουσίασης στοιχείων για τον εμπορικό λιμένα γενικότερα. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των δεδομένων, υπολογίζονται από το τυπολόγιο του Κεφαλαίου 4 οι μετρικές απόδοσης του συστήματος και συγκρίνονται τα ευρήματα με τα αποτελέσματα ενός κώδικα Python που προσομοιώνει το σύστημα αναφοράς. Τέλος το Κεφάλαιο 6 κλείνει την εργασία με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των ευρημάτων και με συστάσεις για μελλοντικές έρευνες στο λιμένα αναφοράς.



Εικόνα 1: Ουρά αναμονής στο νυχτερινό κέντρο διασκέδασης “Berghain” στο Βερολίνο (Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berghain\\_Berlin\\_Waiting\\_Queue.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berghain_Berlin_Waiting_Queue.jpg))

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ

#### 2.1 Θεωρητικό πλαίσιο

Η θεωρία ουρών αναπτύχθηκε αρχικά από τον Δανό μαθηματικό A.K. Erlang το 1909, όπου στη δημοσίευσή του “The Theory of Probabilities and Telephone Conversations” απέδειξε ότι σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο εφαρμόζεται είσοδος Poisson, για σταθερούς ή εκθετικούς χρόνους αναμονής και εξυπηρέτησης και ένα ή πολλαπλά κανάλια [1]. Η διαδικασία Poisson, το όνομα της οποίας προέρχεται από το Γάλλο μαθηματικό S.D Poisson, περιγράφει πειράματα τύχης όπου κάποιο γεγονός συμβαίνει κατά διαστήματα και εκφράζεται από τον τύπο:

$$P[N(t)] = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}, n = 0,1,2, \dots \text{ και } \lambda > 0 \quad (1)$$

Με άλλα λόγια, αν σε ένα χρονικό διάστημα  $t > 0$  γίνουν  $n$  ανεξάρτητες δοκιμές με πιθανότητα επιτυχίας  $P$  τότε το πλήθος των επιτυχιών που εμφανίζονται είναι κατά προσέγγιση μία τυχαία μεταβλητή Poisson με παράμετρο  $\lambda t = nP$ . Η θετική παράμετρος  $\lambda$  ονομάζεται **ρυθμός αφίξεων** ή **ένταση** της διαδικασίας.

Ο Erlang επέκτεινε την έρευνά του με δύο επιπλέον επιστημονικά άρθρα, το “Solution of some Problems in the Theory of Probabilities of Significance in Automatic Telephone Exchanges” και το “Telephone waiting times”, που δημοσιεύτηκαν το 1917 και 1920 αντίστοιχα. Επέκταση της δουλειάς του πραγματοποίησαν με δικά τους δημοσιεύματα τα επόμενα χρόνια αρκετοί επιστήμονες, όπως ο E.C. Molina (1927), ο F. Thornton (1928) και το 1930 οι Pollaczek, Kolmogorov, Khintchine, Crommelin και Palm εξέλιξαν σημαντικά τη θεωρία ουρών, προτείνοντας συστήματα με είσοδο Poisson, αυθαίρετη έξοδο και με ένα ή πολλαπλά κανάλια εξυπηρέτησης. Κατά το 1960, η θεωρία ουρών εντάθηκε στην επιστήμη των υπολογιστών και των δικτύων επικοινωνίας και από το 1980 και μετά έχει βρει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Πλέον, χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, η θεωρία ουρών προσφέρει ακριβείς λύσεις σε προβλήματα συμφόρησης συστημάτων και δίνει γρήγορες λύσεις σε ζητήματα της καθημερινότητας.



## 2.2 Παραδείγματα θεωρίας ουρών

Το φαινόμενο συμφόρησης και αναμονής σε ουρές τείνει να γίνεται όλο και πιο σύνηθες, καθώς αναπτύσσεται μία χώρα, χωρίς να υπάρχουν σημάδια ελάττωσής του. Τα παραδείγματα είναι άφθονα και σε αυτήν την υποενότητα γίνεται τυχαία αναφορά σε ορισμένα.

Στο πρώτο παράδειγμα σε ένα αεροδρόμιο, ένας διάδρομος διατίθεται για την προσγείωση των αεροπλάνων. Αυτά με τη σειρά τους δεν μπορούν να προσδιορίσουν στον πύργο ελέγχου του αεροδρομίου το πότε ακριβώς θα φτάσουν, καθώς η συγκεκριμένη ώρα άφιξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οπότε θεωρείται τυχαία. Κατά την άφιξή του, ένα αεροπλάνο είτε θα προσγειωθεί αμέσως ή θα χρειαστεί να περιμένει. Η αναμονή ενός αεροπλάνου όμως πρακτικά συνεπάγεται την κατανάλωση καυσίμου, που έχει πεπερασμένο όριο και ο συνολικός χρόνος αναμονής επηρεάζει την εξυπηρέτηση των πελατών.

Στο δεύτερο παράδειγμα μία τράπεζα παρέχει για το κοινό διαφόρων τύπων εξυπηρετήσεις, τον οποίων η εκάστοτε ζήτηση διαφέρει ανάλογα τη μέρα. Στο χώρο μπορεί να υπάρχουν ένα ή παραπάνω γκισέ που παρέχουν υπηρεσίες, ανάλογα με την πολιτική της κάθε τράπεζας. Η αίθουσα αναμονής έχει πεπερασμένη χωρητικότητα, γι' αυτό ενδέχεται κάποιος πελάτης που φτάνει στο κατάστημα, εν τέλει να αποχωρεί δίχως να έχει εξυπηρετηθεί.

Στο τρίτο παράδειγμα σε ένα νοσοκομείο υπάρχουν πάρα πολλές λειτουργίες που περιγράφονται από ένα σύστημα ουρών. Ασθενείς εισάγονται στο σύστημα χωρισμένοι σε δύο κατηγορίες, τα επείγοντα περιστατικά που εισέρχονται κατά τις εφημερίες και τα τακτικά περιστατικά που εισέρχονται όλες τις καθημερινές. Και για τις δύο περιπτώσεις υπάρχει η ανάγκη παροχής κάποιου είδους εξυπηρέτησης, από περιορισμένους όμως πόρους, που εξαρτώνται από τον αριθμό των διαθέσιμων κλινών και του νοσοκομειακού προσωπικού, ικανού να αντιμετωπίσει τη ζήτηση υπηρεσιών από τους υπάρχοντες ασθενείς. Επιτακτική είναι η ανάγκη λήψης βέλτιστων αποφάσεων για το σχεδιασμό ενός αποδοτικού συστήματος ουράς.

Το τελευταίο παράδειγμα προέρχεται από το πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών και συγκεκριμένα από τους κλάδους των δικτύων υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών. Σε τέτοια συστήματα δίνεται μεγάλη έμφαση στην ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), τη διασφάλιση με άλλα λόγια χαρακτηριστικών της σύνδεσης όπως τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την απαιτούμενη καθυστέρηση, μεταβολή της καθυστέρησης, πιθανότητα απώλειας πακέτων κλπ. Ο έλεγχος της συμμόρφωσης πραγματοποιείται με εφαρμογή της θεωρίας ουρών μέσω πεπερασμένων δομών προσωρινής μνήμης (buffers) με πειθαρχία ουράς first-come-first-served (FCFS), η διαχείριση των οποίων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια πολύπλοκων αλγορίθμων.

Όλα τα παραπάνω παραδείγματα έχουν ένα κοινό στοιχείο: αποτελούν ένα σύστημα εισροών – εκροών, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει ένα φράγμα ή όριο, που συνήθως προσδιορίζεται από τους διαθέσιμους πόρους, στη διαδικασία εξυπηρέτησης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας ουράς αναμονής.

Πρακτικός στόχος κατά τη μελέτη περιπτώσεων σε υπηρεσίες είναι η βελτίωση της απόδοσης λειτουργίας τους, επιλέγοντας συνήθως αλλαγές που επιφέρουν οικονομικό όφελος και μεγαλύτερη ικανοποίηση για τον πελάτη.

### **2.3 Επισκόπηση προηγούμενων μελετών σε λιμένες**

Για την καλύτερη αντίληψη και προσέγγιση της μελέτης στην παρούσα διπλωματική, είναι χρήσιμη μία ανασκόπηση σε σχετικές μελέτες που έχουν γίνει για παρόμοιες περιπτώσεις. Διάφοροι ερευνητές έχουν εφαρμόσει τη θεωρία ουρών για να αναλύσουν προβλήματα συμμόρφωσης που δημιουργούνται σε λιμάνια, συμβάλλοντας σημαντικά στην ανάπτυξη της λιμενικής βιομηχανίας, η οποία παίζει πρωταρχικό ρόλο σε οποιαδήποτε εθνική οικονομία, δεδομένου ότι τα κόστη μεταφοράς και διακίνησης αγαθών από το θαλάσσιο εμπόριο καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων [2].

Αρχικά, η τυχαία άφιξη πλοίων έκανε την διοικητική λήψη αποφάσεων για το σύστημα δύσκολη. Ένα μοντέλο ουράς παρέχει στη διοίκηση του λιμένα πληθώρα αλγορίθμων για

το σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος [3]. Παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή του κλασικού τύπου που διατυπώθηκε από τον Erlang το 1917 για την πιθανότητα αναμονής. Δεδομένου του αριθμού θέσεων πλευρίσης ή berths, το μοντέλο ουράς παρέχει στους αρμόδιους διευθυντές την απαραίτητη βοήθεια για να αποφασίσουν το ιδανικό μήκος προβλήτας για να εξυπηρετούνται αποτελεσματικά οι πελάτες. Τα μόνα στοιχεία που χρειάζονται για τον προσδιορισμό ενός τέτοιου μοντέλου είναι ο ρυθμός αφίξεων και ο ρυθμός εξυπηρέτησης.

Το 1980 διατυπώθηκε η ανάγκη εφαρμογής ενός συστήματος εξυπηρέτησης που βασίζεται σε μια πειθαρχία ουράς με προτεραιότητα, ή αλλιώς μια πολιτική διαχείρισης ουράς, καθώς αν εφαρμοζόταν πειθαρχία first-come-first-served (FCFS) θα αγνοούνταν η ευαισθησία του πελάτη σε καθυστέρηση, παράγοντας πολύ σημαντικός καθώς διαφέρει από πελάτη σε πελάτη [4]. Για παράδειγμα, ένα άτομο που μεταφέρεται στο νοσοκομείο βαριά τραυματισμένο από ένα τροχαίο ατύχημα δε γίνεται να έχει την ίδια ευαισθησία σε καθυστέρηση με κάποιο άλλο άτομο που βρίσκεται στο νοσοκομείο για να εξεταστεί το εξάνθημα που έχει, καθώς στην πρώτη περίπτωση κινδυνεύει μια ανθρώπινη ζωή. Η απόδοση προτεραιότητας στοχεύει στην ελαχιστοποίηση το μέσου κόστους αναμονής που υποβαθμίζει την απόδοση του συστήματος. Η μελέτη έγινε για μονοκάναλο σύστημα με είσοδο Poisson, αν και η ανάλυση θα μπορούσε να επεκταθεί και σε πιο γενικά μοντέλα.

Δύο χρόνια νωρίτερα, είχε εφαρμοστεί η μεθοδολογία ουρών σε διάφορα λιμάνια του Ηνωμένου Βασιλείου, όπως τα αγγλικά λιμάνια Φέλιξστοου, Λίβερπουλ, Σαουθάμπτον και Τίλμπουρι και το Γκρέιντζμαουθ της Σκωτίας. Για τις ανάγκες της μελέτης, αξιολογήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Container Terminals με σκοπό να συνταχθεί ένα πλάνο μελλοντικών επενδύσεων για την κατασκευή επιπλέον θέσεων πλευρίσης και την αναβάθμιση του εξοπλισμού για τη μεταφορά και αποθήκευση εμπορευματοκιβωτίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μια τέτοια επένδυση δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη μείωση των χρόνων παραμονής στην ουρά με την ίδια αναλογία. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη μία λεπτομερής ανάλυση για το συνολικό κόστος του εκάστοτε πλάνου για να συγκρίνονται οι δυνατές επιλογές μεταξύ τους [5].

Σε άλλη σχετική μελέτη για τον καθορισμό της απόδοσης του εμπορικού λιμένα του Μπουσάν στη Ν. Κορέα, έγινε εφαρμογή δύο μοντέλων ουρών [6]. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν ως παράμετροι της ανάλυσης: η χρησιμοποίηση των θέσεων πλευρίσης, ο μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά αναμονής (anchorage), ο μέσος χρόνος που ξοδεύει ένα πλοίο στην ουρά, ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης, ο μέσος χρόνος παραμονής ενός πλοίου στο λιμάνι, η μέση παραγωγικότητα ενός γερανού αποβάθρας (quay crane) και ο μέσος αριθμός γερανών αποβάθρας ανά πλοίο.

Διαφορετική έρευνα έδειξε πως ο ρυθμός άφιξης πλοίων στο λιμάνι της Τσιταγκόνγκ του Μπαγκλαντές τείνει να αυξηθεί κατά 1.22 φορές στα επόμενα 10 χρόνια και 1.77 φορές τα επόμενα 30 χρόνια, πράγμα που σημαίνει πως για να μην δημιουργηθεί οξύ πρόβλημα συμφόρησης, χρειάζεται να κατασκευαστούν τουλάχιστον 2 νέα berths για κάθε 5-7 χρόνια λειτουργίας του λιμένα, ενώ χρειάζονται επιπλέον 5 berths για να ανταποκρίνεται στις διεθνείς απαιτήσεις μέχρι το έτος 2030 [7].

Σε αντίστοιχη μελέτη με χρήση της μεθοδολογίας ουρών σε ανάλυση που έγινε για το λιμάνι της Αλεξάνδρειας στην Αίγυπτο με διαδικασία αφίξεων Poisson, καθορίστηκε ο βέλτιστος αριθμός θέσεων πρόσδεσης ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα συνολικά έξοδα. Η ανάλυση βασίστηκε στην παραδοχή ότι είναι εφικτό να αυξηθεί ο αριθμός των θέσεων ελλιμενισμού, εφόσον τα έξοδα κατασκευής και συντήρησης είναι μικρότερα από το κόστος αναμονής των πλοίων [8].

Σε δημοσίευμα του 2014 σχετικό με τη μείωση των χρόνων αναμονής των φορτηγών πλοίων, το συμπέρασμα της έρευνας ήταν πως η βελτίωση ενός σταθμού εμπορευματοκιβωτίων (Σ.ΕΜΠΟ.) εξαρτάται από δύο παράγοντες-κλειδιά: τον προσδιορισμό του σωστού βάθους καναλιού πρόσβασης (βύθισμα) και οι επιπλέον εξυπηρετητές (berths) [9]. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν έδειξαν αισθητή μείωση του χρόνου αναμονής.

Τέλος, σε μελέτη περίπτωσης στο λιμάνι του Tin Can Island της Νιγηρίας το 2011, διαπιστώθηκε ότι πρόβλημα συμφόρησης δεν προκαλείται από έλλειψη θέσεων ελλιμενισμού, καθώς ο αριθμός τους επαρκεί. Αντιθέτως, οι λόγοι αφορούν τις σύνθετες

διαδικασίες εκτελωνισμού που ακολουθούνται, τις κακές υποδομές μεταφορών, την έλλειψη εξειδικευμένου και έμπειρου προσωπικού και τη μη-διαθεσιμότητα συνεχούς λειτουργίας [10].

Τα συμπεράσματα από τα προβλήματα που περιεγράφηκαν πάνω στις προαναφερθείσες βιβλιογραφικές πηγές προκύπτουν από εφαρμογή ενός κοινού μοντέλου ουράς, με όμοια δηλαδή χαρακτηριστικά, το οποίο θα υιοθετηθεί και στην παρούσα διπλωματική. Οι διαφοροποιήσεις που πιθανώς να συναντώνται αφορούν την αξιολόγηση στις μετρικές απόδοσης του εκάστοτε συστήματος, παραδοχή απόλυτα δικαιολογημένη καθώς κάθε οργανισμός που διαχειρίζεται κάποιο Σταθμό Εμπορευματοκιβωτίων έχει ξεχωριστό όραμα άρα θέτει ξεχωριστούς όρους ως προς την αποδοτικότητά του και τη βελτίωση αυτής μέσω λήψης αποφάσεων στρατηγικού χαρακτήρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

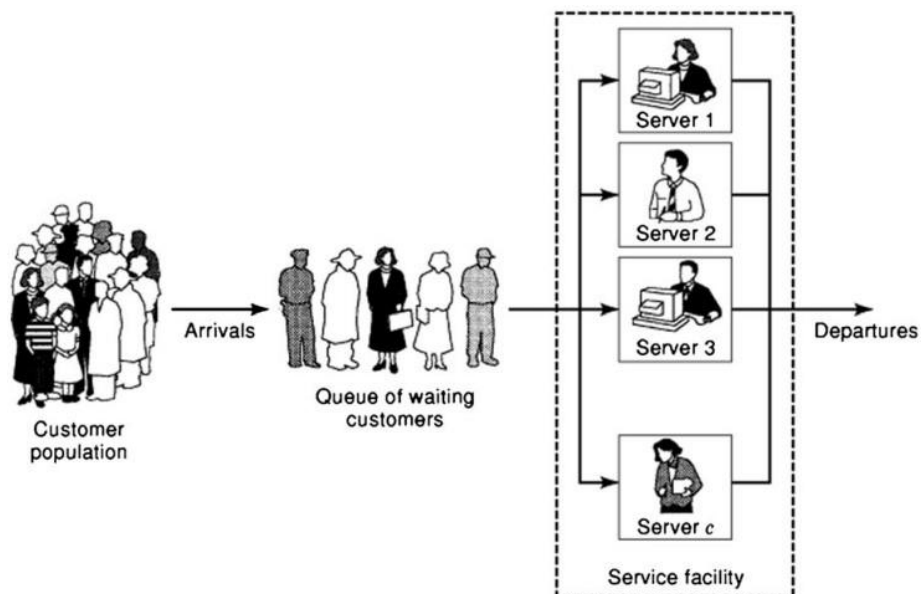
### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΥΡΩΝ

#### 3.1 Χαρακτηριστικά ουρών αναμονής

Κάθε ουρά αναμονής, προσδιορίζεται από έξι βασικά χαρακτηριστικά:

1. Τη διαδικασία άφιξης των πελατών στο σύστημα
2. Τη διαδικασία εξυπηρέτησης των πελατών
3. Την πειθαρχία της ουράς
4. Τον αριθμό των σημείων εξυπηρέτησης
5. Τη δυνατότητα του συστήματος της ουράς
6. Τις φάσεις εξυπηρέτησης

Μια δομή με τα παραπάνω χαρακτηριστικά ονομάζεται **σύστημα ουράς** και παριστάνεται σχηματικά παρακάτω, στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της βασικής δομής ενός συστήματος ουράς (ELL-785 Computer Communication Networks)

### 3.1.1 Διαδικασία άφιξης

Η διαδικασία άφιξης ορίζεται ως ο τρόπος με τον οποίο φθάνουν οι πελάτες στο σύστημα. Οι αφίξεις διακρίνονται σε:

- **Κανονικές**, όταν οι πελάτες εισέρχονται στο σύστημα ένας-ένας σε ίσα χρονικά διαστήματα, π.χ. πακετάρισμα βιομηχανικών προϊόντων
- **Τυχαίες**, σε περιπτώσεις όπου οι πελάτες δεν εισέρχονται στο σύστημα σε ίσα χρονικά διαστήματα, αλλά ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατανομή, φτάνουν με καθυστέρηση και κατά ομάδες. Η διαδικασία άφιξης μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου και εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος και η εισερχόμενη ροή είναι συνεχής
- **Στοχαστικές**, όταν οι πελάτες εισέρχονται στο σύστημα ταυτόχρονα, σε παρτίδες ή χονδρικές παρτίδες. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να είναι γνωστή η κατανομή πιθανότητας που περιγράφει τους χρόνους μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων.

Στη διαδικασία άφιξης λαμβάνεται επιπλέον υπόψη η αντίδραση του πελάτη καθώς εισέρχεται στο σύστημα, αν δηλαδή αποφασίζει να περιμένει να εξυπηρετηθεί, ασχέτως με το μέγεθος της ουράς, ή αν το μέγεθος είναι πολύ μεγάλο, αποφασίζει τελικά να μην εισέλθει. Το πλήθος των πελατών μπορεί να είναι πεπερασμένο ή άπειρο.

### 3.1.2 Διαδικασία εξυπηρέτησης

Η διαδικασία εξυπηρέτησης περιγράφεται μέσω της κατανομής πιθανότητας και εκφράζει την ακολουθία των χρόνων εξυπηρέτησης των πελατών. Μπορεί σαν διαδικασία να είναι μονή ή σε παρτίδες και εξαρτάται από τον αριθμό των πελατών που περιμένουν να εξυπηρετηθούν. Επιπλέον, ένας εξυπηρετητής μπορεί να αντιστοιχεί σε έναν ή περισσότερους πελάτες προς εξυπηρέτηση τη φορά και η διαδικασία να είναι σταθερή ή μη σταθερή, συναρτήσει του χρόνου. Τα βασικά της χαρακτηριστικά είναι:

- Ο χρόνος εξυπηρέτησης
- Η δυνατότητα εξυπηρέτησης, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός των πελατών που το σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει σε μια χρονική στιγμή
- Η διαθεσιμότητα εξυπηρέτησης, δηλαδή το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η διαδικασία είναι δυνατή.

### 3.1.3 Πειθαρχία ουράς

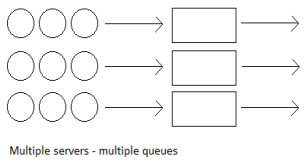
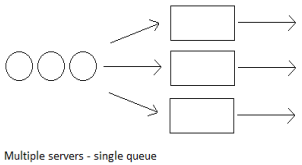
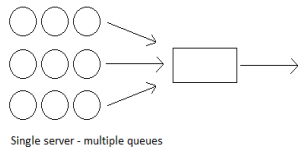
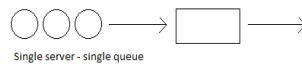
Με τον όρο πειθαρχία ουράς εκφράζεται ο τρόπος εξυπηρέτησης που επιλέγεται. Η συνηθέστερη είναι η FIFO (first in - first out), όπου το πρώτο αντικείμενο που εισέρχεται στο σύστημα εξυπηρετείται και πρώτο, π.χ. το αριθμημένο χαρτάκι σε μια δημόσια υπηρεσία. Άλλες συνηθισμένες πειθαρχίες είναι η LIFO (last in – first out), στην οποία το τελευταίο αντικείμενο εξυπηρετείται πρώτο, π.χ. ο αποθηκευτικός χώρος ενός λεωφορείου και η SIRO (service in random order), όπου η εξυπηρέτηση γίνεται τυχαία. Τέλος, ο πελάτης που πρόκειται να εξυπηρετηθεί μπορεί να επιλεγθεί σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια που του αποδίδουν μία **προτεραιότητα**, π.χ. ο χρόνος που χρειάζεται για να εξυπηρετηθεί (shortest job first).

### 3.1.4 Αριθμός σημείων εξυπηρέτησης

Ο αριθμός αυτός υποδηλώνει τα παράλληλα σημεία εξυπηρέτησης (servers) και διαφέρει ανάλογα με τον τύπο υπηρεσίας αναφοράς. Από το Σχήμα 2 φαίνεται πως ένα σύστημα μπορεί να έχει τις εξής τοπολογίες:

- Ένας εξυπηρετητής – Μία ουρά
- Ένας εξυπηρετητής – Πολλαπλές ουρές
- Πολλαπλοί (παράλληλοι) εξυπηρετητές – Μία ουρά
- Πολλαπλοί εξυπηρετητές – Πολλαπλές ουρές





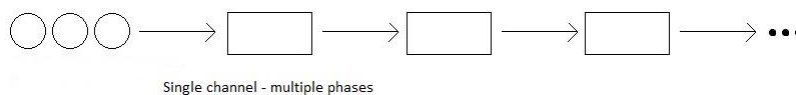
Σχήμα 2: Τύποι μοντέλων ουρών

### 3.1.5 Δυνατότητα συστήματος

Η δυνατότητα του συστήματος της ουράς αναφέρεται στο μέγιστο αριθμό πελατών που μπορεί να δεχθεί το σύστημα. Η διάκριση σε άπειρη και πεπερασμένη ουρά γίνεται συνήθως από φυσικούς περιορισμούς, π.χ. η αίθουσα αναμονής μιας τράπεζας που αν γεμίσει τότε δεν γίνονται δεκτοί άλλοι πελάτες, μέχρι να αδειάσει χώρος.

### 3.1.6 Φάσεις εξυπηρέτησης

Ένα σύστημα ουράς μπορεί να έχει περισσότερες από μία φάσεις εξυπηρέτησης (Σχήμα 3). Σε ένα τέτοιο σύστημα, ο πελάτης εισέρχεται στην πρώτη φάση, λαμβάνει μερική υπηρεσία και στη συνέχεια προχωράει στην επόμενη φάση κ.ο.κ., μέχρι που εξέρχεται από το σύστημα, έχοντας λάβει πλήρη εξυπηρέτηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γραμμή επεξεργασίας και τυποποίησης του γάλακτος, που προκειμένου να διατεθεί προς πώληση, περνάει από πολλά στάδια (βρασμός, παστερίωση, ψύξη, εμφιάλωση).



Σχήμα 3: Σύστημα πολλών φάσεων

### 3.2 Γενικό μοντέλο ουράς

Το Σεπτέμβριο του 1953, ο Άγγλος μαθηματικός και στατιστικολόγος David George Kendall, σε σχετικό δημοσίευσμά του ανέπτυξε μία μαθηματική αναπαράσταση που περιγράφει κάθε γενικό μοντέλο ουράς, η οποία καθιερώθηκε από τότε και χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία μέχρι και σήμερα [11]. Το μοντέλο περιγράφεται από την παρακάτω ακολουθία:

#### **A/B/X/K/Z**

Με **A** συμβολίζουμε την κατανομή χρόνων μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων, ενώ με **B** την κατανομή των χρόνων εξυπηρέτησης. Το **X** συμβολίζει τον αριθμό των παράλληλων servers, το **K** τη μέγιστη δυνατότητα του συστήματος και τέλος το **Z** αναφέρεται στην πειθαρχία ουράς. Συνήθως, όταν δεν υπάρχουν περιορισμοί στη χωρητικότητα του συστήματος και η πειθαρχία ουράς ακολουθεί τη δομή FIFO, οι τελευταίοι δύο όροι αγνοούνται. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται διάφοροι συμβολισμοί για να περιγράψουν συγκεκριμένες κατανομές χρόνου, τόσο άφιξης όσο και εξυπηρέτησης. Οι συνηθέστεροι είναι:

- **M**, για εκθετική κατανομή
- **D**, για ντετερμινιστική κατανομή
- **E<sub>k</sub>**, για κατανομή Erlang τύπου-k ( $k=1,2,\dots$ )
- **G**, γενικός

Έτσι, για παράδειγμα, τα στοιχεία ενός συστήματος M/M/3/κ/FIFO περιγράφουν μία ουρά με διαδικασία αφίξεων Poisson, εκθετική κατανομή χρόνου εξυπηρέτησης, 3 παράλληλα σημεία εξυπηρέτησης, μέγιστη χωρητικότητα κ και στην οποία εξυπηρετείται πρώτος ο πελάτης που φθάνει πρώτος στο σύστημα.

### 3.3 Θεώρημα του Little

Στις αρχές τις δεκαετίας του '60, ο John D.C. Little διατύπωσε το θεώρημά του, με το οποίο συσχέτισε τα μεσαίου μεγέθους συστήματα με τους χρόνους αναμονής των πελατών [12]. Έτσι λοιπόν έστω  $T_q$  ο χρόνος που ένας πελάτης ξοδεύει στην ουρά πριν δεχθεί εξυπηρέτηση και  $T$  ο συνολικός χρόνος που ξοδεύει στο σύστημα ( $T = T_q + T_s$ ,  $T_s =$  χρόνος εξυπηρέτησης). Ο αριθμός πελατών στην ουρά είναι  $N_q$  και ο αριθμός πελατών στο σύστημα  $N$ , ενώ οι μέσοι χρόνοι αναμονής στην ουρά και στο σύστημα είναι  $W_q = E[T_q]$  και  $W = E[T]$ , αντίστοιχα. Οι φόρμουλες που διατύπωσε είναι οι εξής:

$$L = \lambda W \quad (2\alpha)$$

$$L_q = \lambda W_q \quad (2\beta)$$

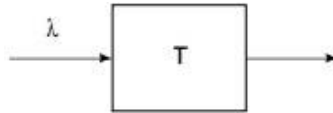
Το θεώρημα του Little έχει μεγάλη σημασία, διότι δε χρειάζονται σαφείς υποθέσεις για το σύστημα, δηλαδή αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «μαύρο κουτί» (Σχήμα 4), ενώ παράλληλα μπορεί να εφαρμοστεί σε όλο το σύστημα ή σε τμήματα του συστήματος και η σχέση μεταξύ του αριθμού των πελατών και του χρόνου περιγράφεται με μαθηματικούς τύπους. Ορισμένοι επιπλέον χρήσιμοι τύποι είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 1:Φόρμουλες του Little

Τύπος	Περιγραφή
$\rho = \lambda / c\mu \quad (2\gamma)$	Ένταση κίνησης: προσφερόμενος ρυθμός φόρτου εργασίας σε έναν εξυπηρετητή
$w = w_q + 1 / \mu \quad (2\delta)$	Επιχείρημα αναμενόμενης τιμής
$Pb = \lambda/c\mu = \rho \quad (2\epsilon)$	Πιθανότητα συνωστισμού για έναν τυχαίο εξυπηρετητή
$r = \lambda/\mu \quad (2\sigma\tau)$	Αναμενόμενος αριθμός πελατών σε εξυπηρέτηση

Οι παραπάνω τύποι καθορίζονται από δύο παραμέτρους:

- $\lambda$  = ο ρυθμός αφίξεων, δηλαδή ο μέσος αριθμός αφίξεων ανά μονάδα χρόνου  $t$
- $\mu$  = ο ρυθμός εξυπηρέτησης, δηλαδή ο μέσος αριθμός αντικειμένων που εξυπηρετούνται ανά μονάδα χρόνου  $t$



Σχήμα 4: Το σύστημα ως μαύρο κουτί

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΛΙΜΑΝΙ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ

#### 4.1 Το λιμάνι του Πειραιά

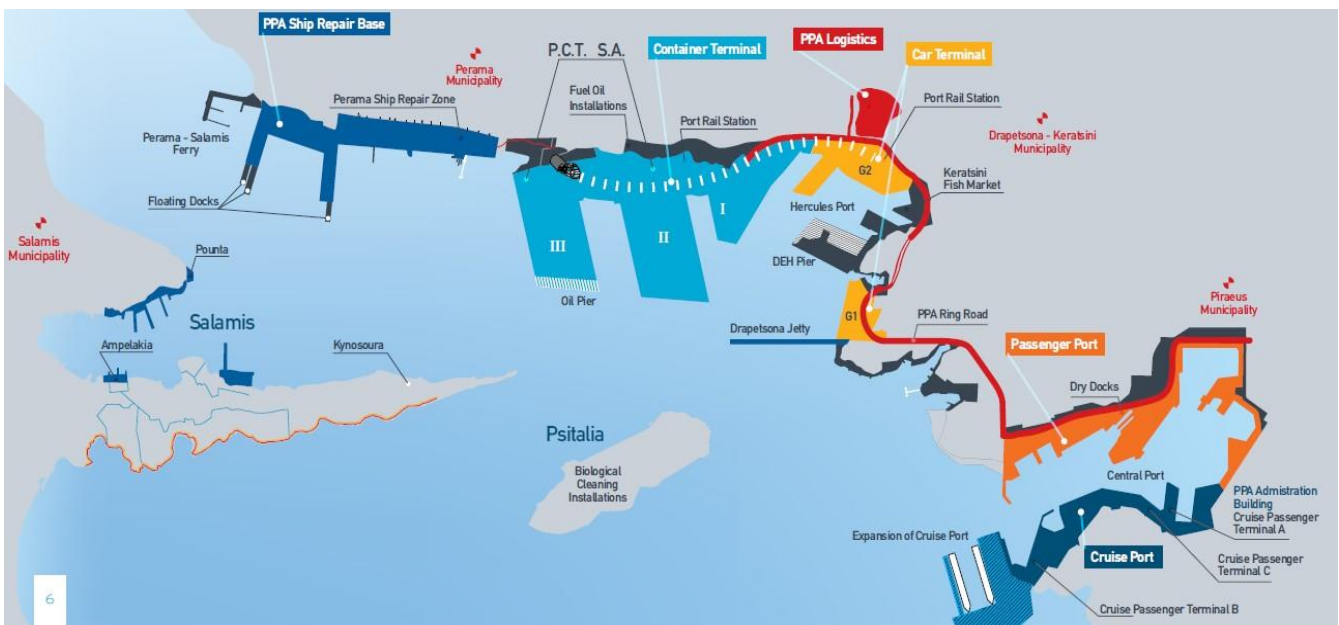
Ο Πειραιάς είναι το πρώτο και μεγαλύτερο λιμάνι της Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα της Μεσογείου. Αποτελεί αναπτυξιακό μοχλό για το διεθνές εμπόριο αλλά και για την τοπική και εθνική οικονομία, χάρη στην κομβική γεωγραφική θέση που διαθέτει. Η ΟΛΠ Α.Ε. (Οργανισμός Λιμένος Πειραιά) επιδίδεται σε πολλαπλές δραστηριότητες που αφορούν το εμπορικό λιμάνι, το επιβατικό λιμάνι, την εξυπηρέτηση πλοίων και την εκμετάλλευση χερσαίων εκτάσεων, απασχολώντας περισσότερους από 1.000 εργαζομένους και εξυπηρετώντας περισσότερα από 24.000 πλοία κάθε τύπου και μεγέθους, ετησίως [13]. Η θέση του Λιμένα διαδραματίζει βασικό ρόλο στην εξυπηρέτηση του Ελλαδικού χώρου, δεδομένου ότι ο Λιμένας γειτνιάζει με την πόλη των Αθηνών, όπου είναι συγκεντρωμένο το 40% του πληθυσμού και το 60% της οικονομικής δραστηριότητας της χώρας.

Ορισμένα συγκριτικά πλεονεκτήματα του Πειραιά, έναντι άλλων λιμένων είναι:

- Πλεονεκτική γεωγραφική θέση ανάμεσα σε Ασία – Αφρική – Ευρώπη
- Υποδομές και φυσικά βυθίσματα για εξυπηρέτηση των μεγαλύτερων σύγχρονων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και αυτοκινήτων
- Λειτουργία των σταθμών 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες το χρόνο
- Ανταγωνιστικό τιμολόγιο
- Πλήθος τροφοδοτικών γραμμών (feeder services) με τα περισσότερα μεγάλα μεσογειακά λιμάνια

Οι προσφερόμενες υπηρεσίες του **εμπορικού** λιμένα μπορεί να είναι:

- Δεξαμενισμός πλοίου (docking), δηλαδή η είσοδος του σε μόνιμη ή πλωτή δεξαμενή για επιθεώρηση ή άλλες εργασίες (υδροβολή/βάψιμο, καθαρισμός υφάλων, ελασματοουργικές εργασίες κλπ.)
- Ναυπηγοεπισκευαστικές εργασίες στη Ναυπηγοεπισκευαστική Ζώνη (θαλάσσια ή χερσαία)
- Εξυπηρέτηση εμπορευματοκιβωτίων (Σταθμός Εμπορευματοκιβωτίων – Σ.ΕΜΠΟ.)
- Διακίνηση αυτοκινήτων καθώς και κάθε είδους τροχοφόρων εμπορευμάτων (Car Terminal)
- Υποδοχή κρουαζιερόπλοιων



Σχήμα 5:Χάρτης του λιμένα του Πειραιά(olp.gr)

Το λιμάνι ως σύστημα είναι αρκετά περίπλοκο, δεδομένου ότι εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό και διαφόρων τύπων πλοίων, καθημερινά και αδιάκοπα. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, κάθε τύπος πλοίου εξυπηρετείται σε συγκεκριμένο σημείο του λιμένα, όπου βρίσκεται ο ανάλογος τερματικός σταθμός (terminal). Για παράδειγμα, όλα τα φορτηγά πλοία εξυπηρετούνται στο Σ.ΕΜΠΟ. στο Νέο Ικόνιο, σε μία από τις Προβλήτες I-III. Αντιθέτως, οι εργασίες συντήρησης γίνονται σε άλλο μέρος του λιμανιού, στο Νέο Μόλο Δραπετσώνας.

Την Προβλήτα I διαχειρίζεται ο ΟΛΠ, ενώ τις Προβλήτες II και III διαχειρίζεται από 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2009 και για 35 χρόνια η Σταθμός Εμπορευματοκιβωτίων Πειραιά Α.Ε. (ΣΕΠ), κατόπιν σύμβασης παραχώρησης από τον ΟΛΠ. Πρόκειται για εταιρεία που έχει ιδρυθεί στην Ελλάδα, πλήρως ελεγχόμενη θυγατρική της Cosco Pacific Limited (CPL), ενός κορυφαίου φορέα εκμετάλλευσης Ε/Κ που βρίσκεται στην 5<sup>η</sup> θέση στην παγκόσμια κατάταξη [14]. Να σημειωθεί πως η CPL από τον Αύγουστο του 2016 κατέχει το πλειοψηφικό πακέτο μετοχών του ΟΛΠ (51%), καθιστώντας την ως τον βασικό μέτοχο του Λιμένα, υπεύθυνη για τη διαχείριση και τις εργασίες του [15].

Η κινέζικη ναυτιλιακή έκτοτε έχει επενδύσει πολλά εκατομμύρια ευρώ για τον εκσυγχρονισμό και τη μεγέθυνση της δυναμικότητας του Σ.ΕΜΠΟ., αλλά και ολόκληρου του λιμένα γενικότερα, με φιλόδοξα σχέδια ενίσχυσης για το κοντινό μέλλον, όπως η βελτίωση της παραγωγικότητας της ναυπηγοεπισκευαστικής ζώνης, η κατασκευή νέας πλωτής δεξαμενής και 4<sup>ης</sup> προβλήτας (Pier IV) [16].

Επιπλέον, οι σύγχρονες οικονομικές ανάγκες, οδήγησαν στη ναυπήγηση εξειδικευμένων φορτηγών πλοίων μεταφοράς ομοειδούς φορτίου. Έτσι διακρίνονται σε:

- Εμπορευματοκιβωτιοφόρα ή κοντέινερς (containers). Ο όγκος των εμπορευματοκιβωτίων μετριέται σε TEUs – Twenty feet Equivalent Unit, διαστάσεων 20·8·8 ποδιών
- Δεξαμενόπλοια (tankers), πλοία σχεδιασμένα να μεταφέρουν υγρά φορτία χύδην (χύμα)
- Bulk carriers, τύπος εμπορικού πλοίου σχεδιασμένο για τη μεταφορά χύδην φορτίων, όπως σιδηρομέταλλευμα και τσιμέντο
- Γενικού φορτίου (breakbulk/general cargo), πλοία που μεταφέρουν χύδην εμπορεύματα ξεχωριστά σε σακούλες, κουτιά, βαρέλια κλπ. και όχι σε εμπορευματοκιβώτια
- Πλοία Ro - Ro (Roll On - Roll off), σχεδιασμένα για τη μεταφορά τροχοφόρων φορτίων, όπως αυτοκίνητα, φορτηγά και δίκυκλα

Ειδικά για τα πλοία Ro – Ro, η φορτοεκφόρτωσή τους πραγματοποιείται στο Σταθμό Αυτοκινήτων ΟΛΠ.

## 4.2 Μοντελοποίηση του συστήματος του εμπορικού λιμένα

Το σύστημα λειτουργίας του Πειραιά μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία διαδικασία ουράς. Οι πελάτες που εισέρχονται στο σύστημα προς παροχή υπηρεσιών είναι τα διάφορα πλοία και οι εγκαταστάσεις στο λιμάνι (προσωπικό, υποδομές και εξοπλισμός) αποτελούν τους εξυπηρετητές. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος έχουν να κάνουν με τους χρόνους αναμονής, εξυπηρέτησης και καθυστέρησης. Οι παράγοντες αυτοί με τη σειρά τους εξαρτώνται από τον ρυθμό άφιξης των πελατών και τον απαιτούμενο χρόνο διακίνησης του εκάστοτε φορτίου.

Ένα εμπορικό πλοίο που φτάνει στον Πειραιά, αρχικά εισέρχεται στο **Αγκυροβόλιο** (Anchorage), δηλαδή σε έναν οριοθετημένο θαλάσσιο χώρο εκτός λιμένος και πλησίον αυτού, μέχρι να λάβει οδηγίες ελλιμενισμού από τις λιμενικές αρχές. Το Αγκυροβόλιο μπορεί να θεωρηθεί ως η ουρά αναμονής του συστήματος και ο χρόνος παραμονής σε αυτό ως ο  $T_q$ . Μόλις φτάσει, μπορεί είτε να ελλιμενιστεί στο Container Terminal απευθείας, σε περίπτωση που υπάρχει θέση ελεύθερη σε κάποια Προβλήτα, ή να περιμένει να αδειάσει κάποια, εάν όλες οι θέσεις είναι κατειλημμένες. Στη συνέχεια ελλιμενίζεται πιθανώς με τη βοήθεια κάποιου ρυμουλκού και μετά από σχετικούς ελέγχους ξεκινά η εκφόρτωση (ή φόρτωση), που στην περίπτωση που πρόκειται για container, αυτή γίνεται με έναν ή παραπάνω γερανούς αποβάθρας (quay cranes). Τέλος, με τη βοήθεια ειδικών βοηθητικών οχημάτων και γερανών σκελετού (gantry cranes), τα εμπορευματοκιβώτια στοιβάζονται σε συγκεκριμένο αποθηκευτικό χώρο.

Τα δύο συνηθέστερα πρότυπα άφιξης ενός πελάτη είναι το τυχαίο και το προγραμματισμένο με καθυστέρηση στην προβλεπόμενη ώρα άφιξης (ETA) και την πραγματική ώρα άφιξης (ATA). Επομένως η καλύτερη προσέγγιση του ρυθμού αφίξεων σε ένα χρονικό διάστημα για το σύστημα δίνεται από μια συνάρτηση κατανομής Poisson:

$$P_n = \frac{(\lambda)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda} \quad (3)$$

Όπου  $\lambda$  ο μέσος αριθμός αφίξεων και  $n$  ο αριθμός των πελατών.



Ο χρόνος παραμονής σε μία θέση εξυπηρέτησης για χειρισμό φορτίου περιγράφεται από μία κατανομή Erlang [17], λόγω μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με την κατανομή Poisson. Η πλήρης εξυπηρέτηση ενός πελάτη γίνεται σε  $k$ -φάσεις και κάθε Erlang φάση περιγράφεται από συνάρτηση αρνητικής εκθετικής κατανομής. Όσο το  $k$  αυξάνεται, οι χρόνοι εξυπηρέτησης γίνονται ολοένα και πιο ομοιόμορφοι μέχρι τελικά για  $k = \infty$  οι χρόνοι να είναι όλοι ίσοι. Ο γενικός τύπος  $P_0$  της συνάρτησης δίνεται από τη σχέση:

$$P_0 = e^{-kb} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(k \cdot b)^n}{n!} \quad (4)$$

Όπου  $b$  ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης και  $k$  ο αριθμός Erlang ( $k = 1, 2, \dots, \infty$ ).

Ωστόσο, το θεωρητικό μοντέλο για ένα πολυκάναλο σύστημα με διαδικασία αφίξεων Poisson και διαδικασία εξυπηρέτησης Erlang δεν έχει δυνατή μαθηματική λύση [18]. Για την ανάλυση τέτοιων περιπτώσεων, η μοντελοποίηση γίνεται λαμβάνοντας μία από τις εξής περιπτώσεις: (α) εκθετικές κατανομές για αφίξεις και χρόνους εξυπηρέτησης και (β) εκθετική κατανομή αφίξεων και σταθερός χρόνος εξυπηρέτησης.

Μόλις ένας πελάτης ελλιμενιστεί κατά υπόδειξη των λιμενικών αρχών σε μία συγκεκριμένη θέση κάποιας Προβλήτας, πάντοτε πλευρικά σε μια από τις εκατέρωθεν πλευρές της (ανατολική – δυτική), ξεκινά η διαδικασία της εξυπηρέτησης. Το συνολικό μήκος σε αυτές τις υποδομές, όπως επίσης και το λιμενικό προσωπικό και ο βοηθητικός εξοπλισμός, επιτρέπουν την ταυτόχρονη παροχή υπηρεσιών σε παραπάνω από έναν πελάτη.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, το σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

- Η άφιξη των πλοίων γίνεται τυχαία και ακολουθεί κατανομή Poisson με ρυθμό  $\lambda$
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί αρνητική εκθετική κατανομή με ρυθμό  $\mu$ , ίδιο για κάθε εξυπηρετητή
- Ο αριθμός μονάδων εξυπηρέτησης είναι  $c$

- Η πειθαρχία ουράς είναι κατά κανόνα FIFO, εκτός από εξαιρέσεις στις οποίες αποδίδεται προτεραιότητα σε συγκεκριμένους πελάτες
- Η δυνατότητα του συστήματος είναι άπειρη
- Κανένας πελάτης δεν ανακαλεί, δηλαδή δεν εξέρχεται ποτέ από το σύστημα χωρίς να εξυπηρετηθεί

Παρατηρείται λοιπόν ότι το μοντέλο **M/M/c** λαμβάνει υπόψη όλα τα πιθανά σενάρια για το σύστημα και παράγει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, όπως να υπάρχει μεγάλος αριθμός αφίξεων ή να μην υπάρχουν αφίξεις για αρκετή ώρα, γι' αυτό και επιλέγεται για τη μελέτη περίπτωσης.

### 4.3 Η ένταση κίνησης στο σύστημα

Η ένταση κίνησης είναι το μέτρο του ρυθμού φόρτου σε ένα σύστημα ουράς. Για να είναι αποδοτικό το σύστημα, πρέπει ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης  $\mu$  να είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό άφιξης  $\lambda$  ( $\mu > \lambda$ ) και ο τελευταίος να είναι μικρότερος από 1 ( $\lambda < 1$ ). Ωστόσο, αν η ένταση κίνησης  $\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$  πάρει τιμή κοντά στο 0, αυτό σημαίνει πως πολλοί πόροι του συστήματος μένουν ανεκμετάλλευτοι και οι servers περνούν μεγάλα χρονικά διαστήματα αδρανείς, αφού οι χρόνοι αναμονής είναι πολύ μικροί. Στην αντίθετη περίπτωση που η ένταση κίνησης έχει τιμή μεγαλύτερη του 1, τότε αναμένονται μεγάλοι χρόνοι αναμονής και ελάχιστοι περίοδοι αδράνειας. Η στρατηγική επιλογή θέσεων ελλιμενισμού και βοηθητικού εξοπλισμού για την εξυπηρέτηση τυχαίου πελάτη είναι καθοριστικός παράγοντας απόδοσης τιμής στο  $\rho$ .

Στη συνέχεια, δίνονται τύποι που ισχύουν στο μοντέλο που επιλέχθηκε, χωρίς απόδειξη. Οι αποδείξεις χρησιμοποιούν επαγωγή, γεωμετρικές σειρές και άλλα μαθηματικά εργαλεία που εύκολα βρίσκονται μετά από αναζήτηση στη βιβλιογραφία της Θεωρίας Ουρών.

Η πιθανότητα να είναι άδειο το σύστημα είναι:

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{1}{n!}\right] + \frac{1}{c!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \cdot \left(\frac{c \cdot \mu}{c \cdot \mu - \lambda}\right)} \quad (5)$$

Η πιθανότητα αναμονής είναι:

$$P_w = \frac{1}{c!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \frac{c}{c \mu - \lambda} \cdot P_0 \quad (6)$$

Η πιθανότητα να υπάρχουν  $n$  πελάτες στο σύστημα είναι:

$$P_n = \frac{1}{c! \cdot c^{n-c}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0, \quad n > c \quad (7\alpha)$$

Και

$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0, \quad n \leq c \quad (7\beta)$$

Ο μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά (όπως προκύπτει από το νόμο του Little) είναι:

$$W_q = \frac{1}{1-\rho} \cdot \frac{1}{c\mu} \cdot p_w \quad (8)$$

Ο μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα είναι:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (9)$$

Ο μέσος αριθμός πελατών στην ουρά είναι:

$$L_q = \lambda W_q \quad (10)$$

Ο μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα είναι:

$$L = \lambda W \quad (11)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 5.1 Παρουσίαση στατιστικών στοιχείων

Τα δεδομένα που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο συλλέχθηκαν κυρίως με τη βοήθεια του διαδικτύου, μέσω δευτερογενών πηγών. Η βάση δεδομένων προς ανάλυση περιέχει καταχωρήσεις από τα αρχεία καταγραφής του Σ.ΕΜΠΟ., όπως επίσης και από τα ναυτιλιακά έγγραφα των πλοίων. Τα βιβλία καταγραφής περιέχουν δεδομένα χρήσιμα για την ανάλυση όπως το είδος του φορτίου, τη χωρητικότητα, τη δέσμευση θέσης στις Προβλήτες και τις πραγματικές ώρες και ημερομηνίες άφιξης, ελλιμενισμού και αναχώρησης.

Από το 2018, οι υποδομές των τριών Προβλητών του Σ.ΕΜΠΟ. περιλαμβάνουν:

Πίνακας 2:Τεχνικά χαρακτηριστικά Σ.ΕΜΠΟ. Πειραιά

Προβλήτα	Συνολικό μήκος (m)	Quay Cranes	Gantry Cranes	Throughput (TEUs)
I	1150	8	8	1.000.000
II	1485 (787 East /698 West)	18 (10E/8W)	32 (16E/16W)	3.200.000
III	1362 (600 East /762 West)	13 (5E/8W)	24 (6E/18W)	3.000.000

Με βάση συγκριτικές αξιολογήσεις που έγιναν στο παρελθόν (benchmark analysis) και λαμβάνοντας υπόψη τις αναβαθμίσεις των υποδομών και του εξοπλισμού από το 2018 που αναγράφονται στον Πίνακα 2, ο αριθμός των θέσεων εξυπηρέτησης (servers) υπολογίζεται σε  $c = 12$  [19],[20]. Χρειάζεται να αναφερθεί πως ένας πελάτης μπορεί να δεσμεύσει περισσότερες από μία θέσεις εξυπηρέτησης, αναλόγως τη χωρητικότητά του σε TEUs.

Για τη μελέτη του φαινομένου της συμφόρησης στον εμπορικό λιμένα έγινε ανάλυση όλων των στοιχείων 12 ημερολογιακών μηνών, από τον Απρίλιο του 2020 έως και το Μάρτιο του 2021, τα οποία αναγράφονται στον Πίνακα 3. Τα δεδομένα για τη λιμενική συμφόρηση

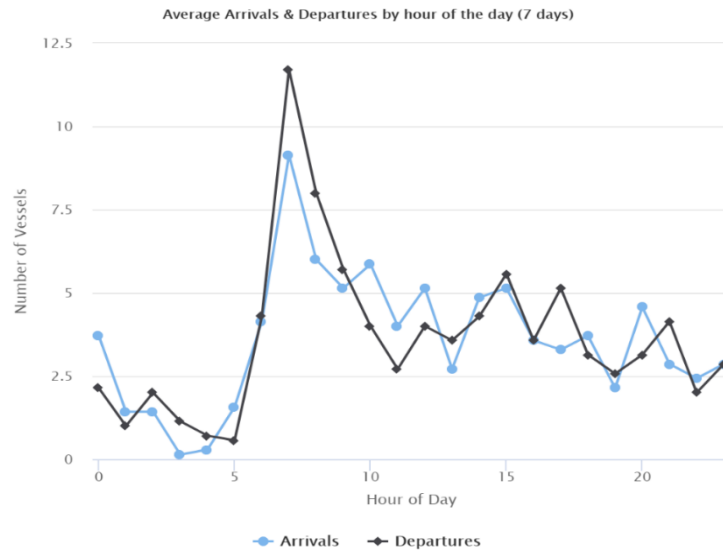
υπολογίζονται ανά εβδομάδα μέσω της διαμέσου των χρόνων παραμονής στο Αγκυροβόλιο και στο Λιμάνι αντίστοιχα, γιατί παρέχει ακριβέστερη τιμή καθώς δεν επηρεάζεται σημαντικά από πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές χρονικών διαστημάτων, αλλά και για επιπλέον λόγους για τους οποίους ένα σκάφος μπορεί να παραμένει αγκυροβολημένο εκτός από τη συμφόρηση, όπως ο χρόνος μετάβασής του από αδρανές σε λειτουργικό (warm lay-up) ή από καθυστέρηση λόγω απαιτήσεων των λιμενικών αρχών. Για τον υπολογισμό των δεδομένων του Πίνακα 3 λαμβάνονται υπόψη όλα τα πλοία που αναχώρησαν την προηγούμενη εβδομάδα από το Λιμάνι, ενώ κατέφθασαν μέσα στους περασμένους 2 μήνες. Παρομοίως, η μέγιστη παραμονή στο Αγκυροβόλιο υπολογίζεται για τους τελευταίους 5 μήνες.

Πίνακας 3:Μηνιαίες αφίξεις και μέσοι χρόνοι παραμονής

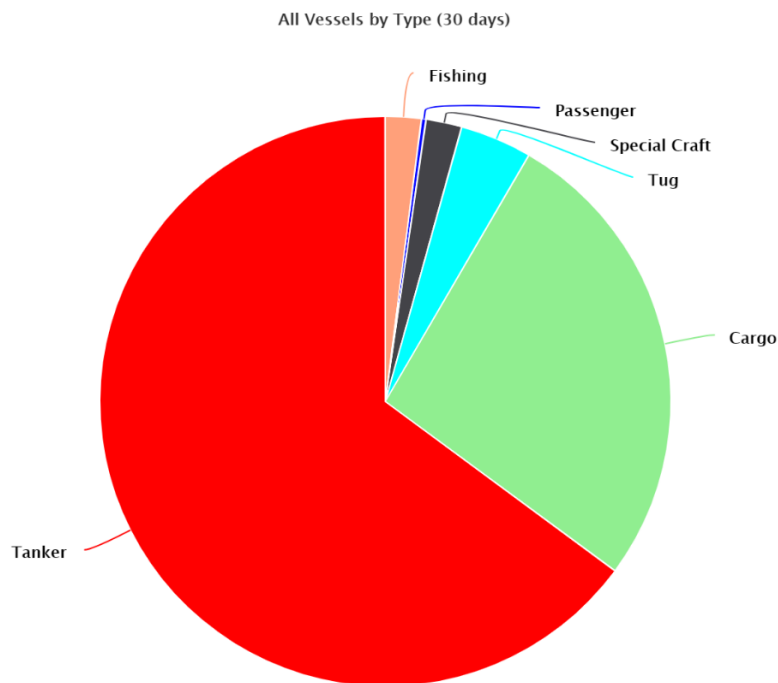
Μήνας	Συνολικές αφίξεις	Μέσος χρόνος στο Αγκυροβόλιο (ημέρες)	Μέσος χρόνος στο Λιμάνι (ημέρες)
Απρίλιος	292	1.34	1.14
Μάιος	257	0.75	0.925
Ιούνιος	243	0.95	0.95
Ιούλιος	318	0.84	0.92
Αύγουστος	233	0.975	0.925
Σεπτέμβριος	299	1.02	1
Οκτώβριος	235	0.775	0.925
Νοέμβριος	217	0.85	0.9
Δεκέμβριος	260	1.04	1
Ιανουάριος	190	2.5	1.1
Φεβρουάριος	206	1.075	1.125
Μάρτιος	232	1.025	0.975

Για το σύστημα συνολικά, ο μεγαλύτερος ρυθμός αφίξεων (αλλά και αναχωρήσεων) εμφανίζεται στις 7 με 8 π.μ. (Σχήμα 6). Επιπλέον, η ανάλυση έδειξε πως από το συνολικό

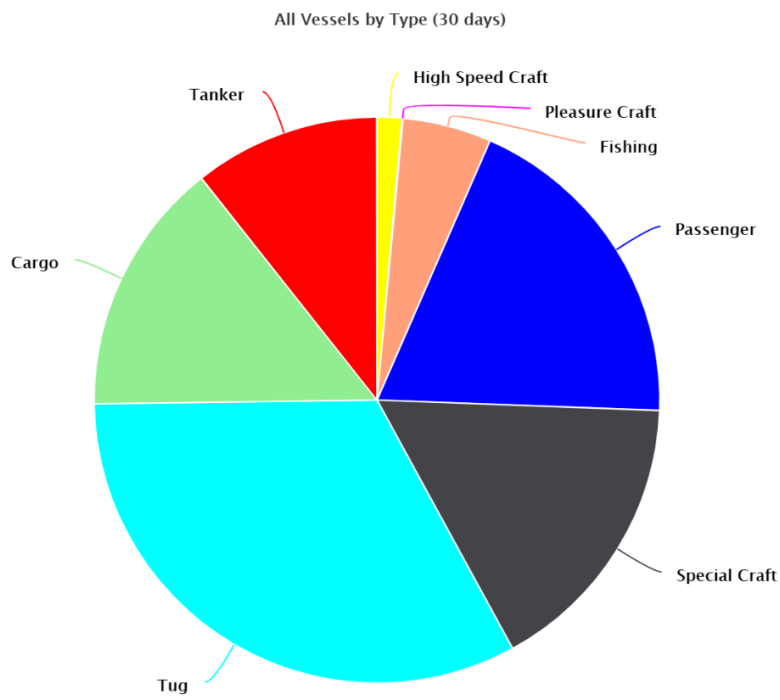
αριθμό αφίξεων στο Αγκυροβόλιο, ένα ποσοστό  $\approx 25\text{-}26\%$  αφορά φορτηγά πλοία (Σχήμα 7), ενώ όσον αφορά το Λιμάνι, το ποσοστό αυτό είναι  $\approx 14\text{-}15\%$  (Σχήμα 8).



Σχήμα 6: Μέσος αριθμός αφίξεων και αναχωρήσεων ανά ώρα για μια τυχαία εβδομάδα (Πηγή: marinetraffic.com)



Σχήμα 7: Αφίξεις στο Αγκυροβόλιο Φεβρουάριος 2021 (marinetraffic.com)



Σχήμα 8: Αφίξεις στο Λιμάνι Φεβρουάριος 2021 (marinetraffic.com)

## 5.2 Υπολογισμός της έντασης κίνησης

Υπενθυμίζεται πως η ένταση κίνησης για κάθε μήνα υπολογίζεται ως  $\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$ . Υπολογίστηκε πως ο μέσος χρόνος παραμονής στο Λιμάνι είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερος από το μέσο χρόνο εξυπηρέτησης κατά 30'. Ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης  $\mu$  ισούται με  $\mu = 1/b$ , όπου  $b$  ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης [21]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναγράφονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4: Ένταση κίνησης ανά μήνα (erl)

Μήνας	Συνολικές αφίξεις	Ώρες λειτουργίας την ημέρα	Μέσος ρυθμός αφίξεων ανά ημέρα ( $\lambda$ )	Μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης ανά ημέρα ( $\mu$ )	Ένταση κίνησης ( $\rho$ )
Απρίλιος	292	24	9.73	0.894	0.907
Μάιος	257	24	8.29	1.116	0.619
Ιούνιος	243	24	8.1	1.112	0.607
Ιούλιος	318	24	10.26	1.112	0.769
Αύγουστος	233	24	7.52	1.116	0.562
Σεπτέμβριος	299	24	9.97	1.021	0.814
Οκτώβριος	235	24	7.58	1.116	0.566
Νοέμβριος	217	24	7.23	1.114	0.541
Δεκέμβριος	260	24	8.39	1	0.699
Ιανουάριος	190	24	6.13	0.909	0.562
Φεβρουάριος	206	24	7.36	0.889	0.690
Μάρτιος	232	24	7.48	1.026	0.608

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φανερώνουν έναν μέσο ρυθμό αφίξεων αρκετά μεγαλύτερο από το μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης για κάθε μήνα. Ωστόσο για την ένταση κίνησης ισχύει  $0.5 < \rho < 1$ , δηλαδή ο ικανοποιητικός αριθμός servers για το σύστημα κρατάει τα επίπεδα συμφόρησης σχετικά χαμηλά χωρίς το σύστημα να μένει για μεγάλα διαστήματα αδρανές.



### 5.3 Ο μέσος αριθμός πελατών στην ουρά και στο σύστημα

Με βάση τα  $\lambda$ ,  $\mu$ , και  $\rho$  που υπολογίστηκαν έπειτα από μελέτη των πηγών και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, είναι εφικτό να μελετηθεί διεξοδικότερα η απόδοση του συστήματος αναφοράς μέσω του υπολογισμού των μέσων χρόνων αναμονής στην ουρά και παραμονής στο σύστημα ( $W_q$  και  $W$  αντίστοιχα), καθώς επίσης και των μέσων αριθμών πελατών στην ουρά και στο σύστημα ( $L_q$  και  $L$  αντίστοιχα). Με αντικατάσταση στις σχέσεις (5)-(11) τις υποενότητας 4.3, προέκυψαν τα αποτελέσματα που αναγράφονται στον Πίνακα 5:

Πίνακας 5: Μέσοι χρόνοι και αριθμοί πελατών ανά μήνα

Μήνας	$W_q$ (ημέρες)	$W$ (ημέρες)	$L_q$	$L$
Απρίλιος	0.664	1.782	6.457	17.341
Μάιος	0.018	0.914	0.147	7.575
Ιούνιος	0.015	0.915	0.124	7.408
Ιούλιος	0.098	0.997	1.006	10.233
Αύγουστος	0.008	0.904	0.063	6.801
Σεπτέμβριος	0.176	1.155	1.751	11.516
Οκτώβριος	0.009	0.905	0.067	6.859
Νοέμβριος	0.006	0.904	0.045	6.535
Δεκέμβριος	0.051	1.051	0.425	8.815
Ιανουάριος	0.01	1.11	0.063	6.807
Φεβρουάριος	0.051	1.176	0.378	8.657
Μάρτιος	0.017	0.991	0.125	7.415

Όπως μαρτυρούν και τα αριθμητικά αποτελέσματα, το σύστημα διατηρεί ως επί το πλείστον αρκετά χαμηλούς μέσους χρόνους αναμονής στην ουρά και μέσο χρόνο παραμονής σε αυτό για ολόκληρο το έτος  $W = 25h36min$  ή  $W = 1.067$  ημέρες. Τα  $L_q$ ,  $L$  προφανώς είναι ανάλογα των  $W_q$ ,  $W$  και οι μέσες τιμές τους για ολόκληρο το έτος υπολογίστηκαν ως  $L_q = 0.89$  πελάτες και  $L = 8.83$  πελάτες αντίστοιχα.

## 5.4 Διακριτές πιθανότητες

Τα τελευταία στοιχεία προς υπολογισμό για τη μελέτη της απόδοσης του συστήματος είναι οι διακριτές πιθανότητες να υπάρχει αναμονή κατά την άφιξη και να υπάρχουν  $n$  πελάτες στο σύστημα, για κάθε μήνα.

### 5.4.1 Πιθανότητα αναμονής

Η πιθανότητα αναμονής στο Αγκυροβόλιο κατά την άφιξη ενός πλοίου για κάθε μήνα, από εφαρμογή της σχέσης (6) υπολογίζεται και παρουσιάζεται παρακάτω, στον Πίνακα 6:

Πίνακας 6:  $P_w$  ανά μήνα

Μήνας	$P_w$
Απρίλιος	$6.65 \cdot 10^{-1}$
Μάιος	$3.53 \cdot 10^{-3}$
Ιούνιος	$2.86 \cdot 10^{-3}$
Ιούλιος	$3.2 \cdot 10^{-2}$
Αύγουστος	$1.36 \cdot 10^{-3}$
Σεπτέμβριος	$7.72 \cdot 10^{-2}$
Οκτώβριος	$1.51 \cdot 10^{-3}$
Νοέμβριος	$9.78 \cdot 10^{-4}$
Δεκέμβριος	$1.41 \cdot 10^{-2}$
Ιανουάριος	$2.09 \cdot 10^{-3}$
Φεβρουάριος	$1.54 \cdot 10^{-2}$
Μάρτιος	$3.52 \cdot 10^{-3}$

Η μέση πιθανότητα αναμονής για όλο το χρόνο είναι  $\underline{P_w} = 0.0683$ .

#### 5.4.2 Πιθανότητα ύπαρξης n πλοίων

Με αντικατάσταση στη σχέση (7α) προέκυψαν οι παρακάτω τιμές για  $P_n$ , για  $1 \leq n \leq 9$ , ενώ η πιθανότητα να είναι άδειο το σύστημα  $P_0$  από τη σχέση (5) προέκυψε ως εξής:

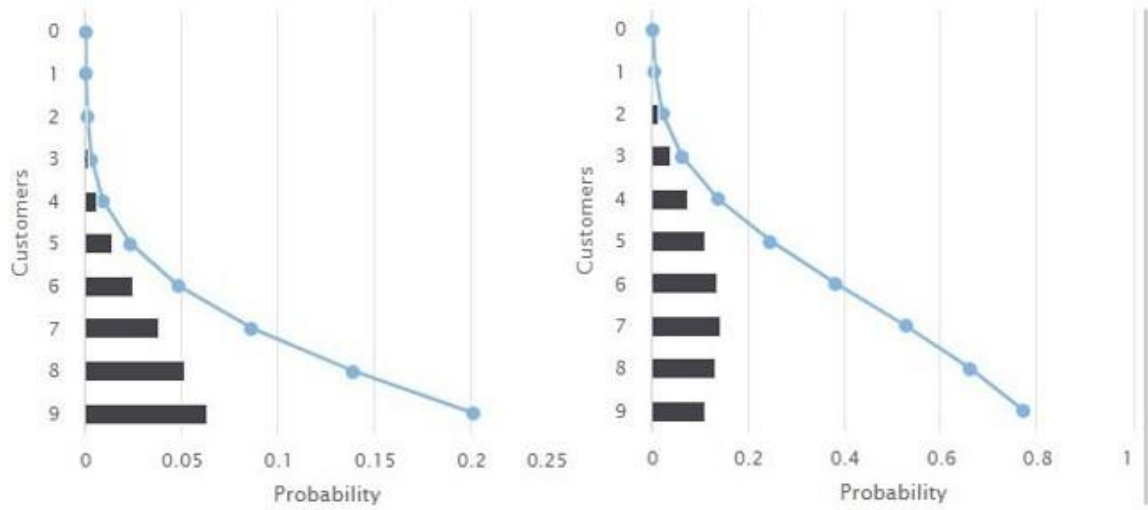
Πίνακας 7:  $P_n$  ανά μήνα

Μήνας	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
Απρίλιος	$10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$6.25 \cdot 10^{-3}$
Μάιος	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$4.34 \cdot 10^{-4}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$7.41 \cdot 10^{-2}$
Ιούνιος	$6.8 \cdot 10^{-4}$	$4.93 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$4.36 \cdot 10^{-2}$	$7.94 \cdot 10^{-2}$
Ιούλιος	$9 \cdot 10^{-5}$	$8.1 \cdot 10^{-4}$	$3.74 \cdot 10^{-3}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$	$2.66 \cdot 10^{-2}$
Αύγουστος	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.93 \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-2}$	$5.99 \cdot 10^{-2}$	$1.01 \cdot 10^{-1}$
Σεπτέμβριος	$5 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$2.27 \cdot 10^{-3}$	$7.38 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$
Οκτώβριος	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$7.57 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-2}$	$5.82 \cdot 10^{-2}$	$9.88 \cdot 10^{-2}$
Νοέμβριος	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$9.81 \cdot 10^{-3}$	$3.18 \cdot 10^{-2}$	$6.88 \cdot 10^{-2}$	$1.12 \cdot 10^{-1}$
Δεκέμβριος	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$	$7.62 \cdot 10^{-3}$	$2.13 \cdot 10^{-2}$	$4.47 \cdot 10^{-2}$
Ιανουάριος	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$2.66 \cdot 10^{-2}$	$5.98 \cdot 10^{-2}$	$1.01 \cdot 10^{-1}$
Φεβρουάριος	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$2.01 \cdot 10^{-3}$	$8.33 \cdot 10^{-3}$	$2.23 \cdot 10^{-2}$	$4.76 \cdot 10^{-2}$
Μάρτιος	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$4.9 \cdot 10^{-3}$	$1.79 \cdot 10^{-2}$	$4.34 \cdot 10^{-2}$	$7.92 \cdot 10^{-2}$

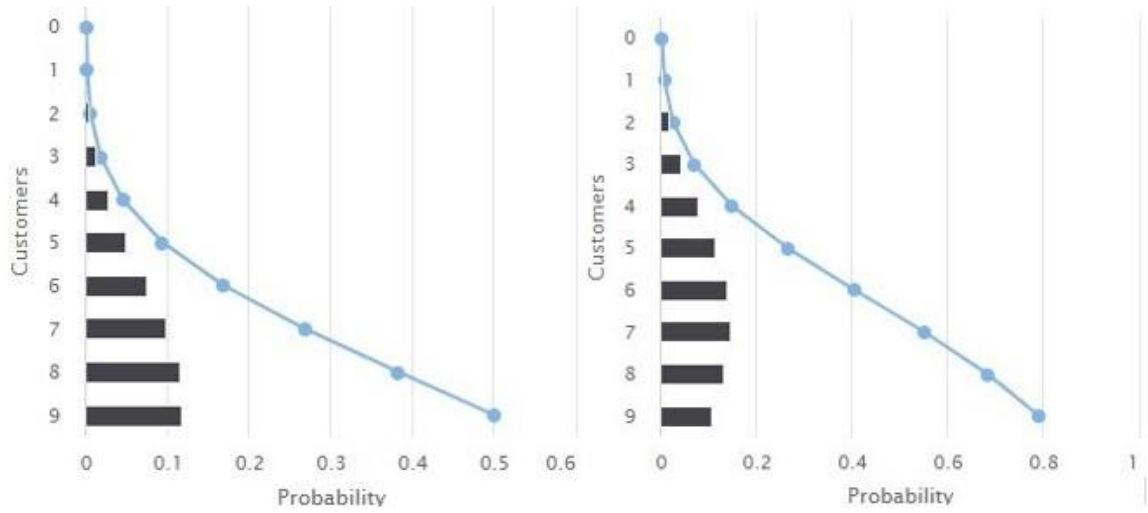
Πίνακας 8: P<sub>n</sub> ανά μήνα (συνέχεια)

P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>
$1.36 \cdot 10^{-2}$	$2.47 \cdot 10^{-2}$	$3.83 \cdot 10^{-2}$	$5.22 \cdot 10^{-2}$	$6.31 \cdot 10^{-2}$
$1.1 \cdot 10^{-1}$	$1.36 \cdot 10^{-1}$	$1.45 \cdot 10^{-1}$	$1.34 \cdot 10^{-1}$	$1.11 \cdot 10^{-1}$
$1.16 \cdot 10^{-1}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$	$1.46 \cdot 10^{-1}$	$1.33 \cdot 10^{-1}$	$1.08 \cdot 10^{-4}$
$4.9 \cdot 10^{-2}$	$7.54 \cdot 10^{-2}$	$9.93 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-1}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$
$1.36 \cdot 10^{-1}$	$1.53 \cdot 10^{-1}$	$1.47 \cdot 10^{-1}$	$1.24 \cdot 10^{-1}$	$9.28 \cdot 10^{-2}$
$3.52 \cdot 10^{-2}$	$5.73 \cdot 10^{-2}$	$7.99 \cdot 10^{-2}$	$9.76 \cdot 10^{-2}$	$1.06 \cdot 10^{-1}$
$1.34 \cdot 10^{-1}$	$1.52 \cdot 10^{-1}$	$1.47 \cdot 10^{-1}$	$1.25 \cdot 10^{-1}$	$9.45 \cdot 10^{-2}$
$1.45 \cdot 10^{-1}$	$1.57 \cdot 10^{-1}$	$1.45 \cdot 10^{-1}$	$1.18 \cdot 10^{-1}$	$8.5 \cdot 10^{-2}$
$7.45 \cdot 10^{-2}$	$1.05 \cdot 10^{-1}$	$1.26 \cdot 10^{-1}$	$1.32 \cdot 10^{-1}$	$1.29 \cdot 10^{-1}$
$1.36 \cdot 10^{-1}$	$1.53 \cdot 10^{-1}$	$1.47 \cdot 10^{-1}$	$1.24 \cdot 10^{-1}$	$9.3 \cdot 10^{-2}$
$7.88 \cdot 10^{-2}$	$1.09 \cdot 10^{-1}$	$1.29 \cdot 10^{-1}$	$1.33 \cdot 10^{-1}$	$1.22 \cdot 10^{-1}$
$1.15 \cdot 10^{-1}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$	$1.46 \cdot 10^{-1}$	$1.33 \cdot 10^{-1}$	$1.08 \cdot 10^{-1}$

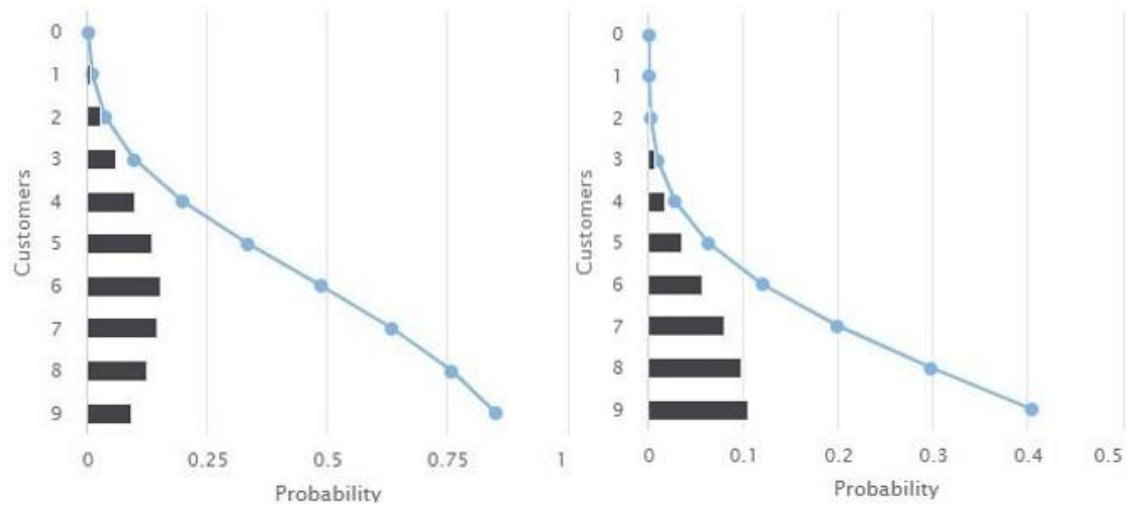
Οι διακριτές πιθανότητες να εμφανιστούν από 0 έως 9 πελάτες καθώς και οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής για το ίδιο διάστημα διακριτών τιμών κάθε μήνα αναπαρίστανται γραφικά σε κοινά διαγράμματα στα Σχήματα 9-14. Με μαύρο χρώμα αναπαρίστανται οι διακριτές πιθανότητες, ενώ με μπλε χρώμα οι συναρτήσεις κατανομής, οι οποίες είναι αύξουσες και δεξιά συνεχείς.



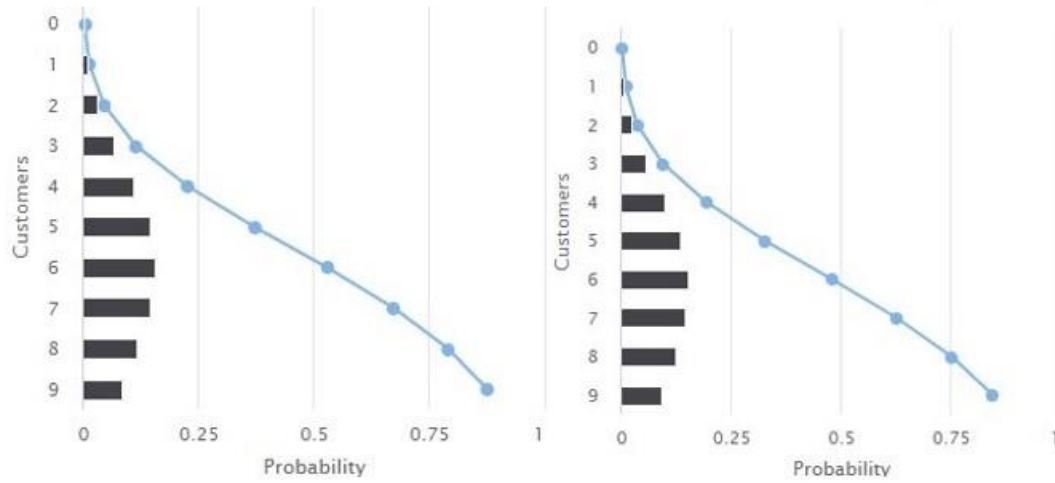
Σχήμα 9: Απρίλιος-Μάιος 2020



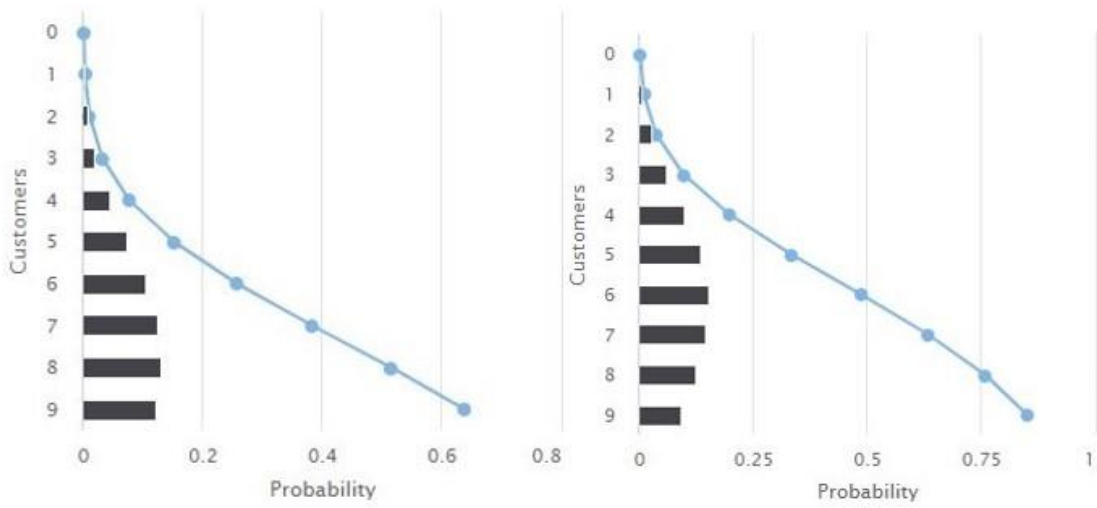
Σχήμα 10: Ιούνιος-Ιούλιος 2020



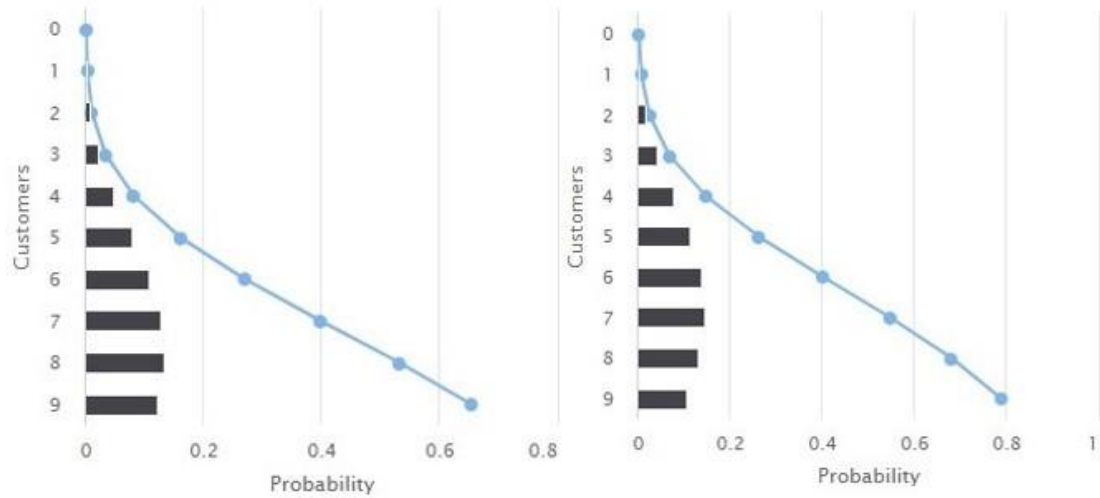
Σχήμα 11: Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2020



Σχήμα 12: Οκτώβριος-Νοέμβριος 2020



Σχήμα 13: Δεκέμβριος 2020-Ιανουάριος 2021



Σχήμα 14: Φεβρουάριος-Μάρτιος 2021

## 5.5 Προσομοίωση του συστήματος

Με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python δημιουργήθηκε ένα script το οποίο προσομοιάζει το σύστημα αναφοράς, όπως ακριβώς περιγράφεται στην Παράγραφο 4.2, προκειμένου να συγκριθούν οι εκτιμώμενες τιμές που δίνονται ως έξοδος του κώδικα με τις πραγματικές τιμές που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 5.1-5.4 και να δώσει μια καλύτερη εικόνα της λειτουργίας του Λιμένα.

Το script υλοποιεί την κλάση **Port\_Simulation** στην οποία αρχικοποιούνται στη συνάρτηση `__init__` όλες οι μεταβλητές με τιμή 0 εκτός του `s_departure` που αρχικοποιείται σε 'inf' δηλαδή άπειρο, ώστε να επιτευχθεί ως πρώτο γεγονός άφιξη. Η συνάρτηση `time_adv` αποφασίζει το επόμενο γεγονός που θα συμβεί κάνοντας σύγκριση τους χρόνους των προγραμματισμένων γεγονότων και έτσι το γεγονός με το μικρότερο χρόνο λαμβάνει χώρα πρώτο. Αν πρόκειται για άφιξη, η συνάρτηση `arrival` αρχικά ανανεώνει τους βοηθητικούς counters και ανάλογα με το αν υπάρχουν ή όχι πλοία στην ουρά αναμονής ορίζει τη θέση του τρέχοντος πλοίου στη σωστή θέση του Λιμένα, δηλαδή σε έναν τυχαίο εξυπηρετητή αν δεν υπάρχει ουρά αναμονής ή στο τέλος της ουράς, εάν υπάρχει και μετά το τέλος της εξυπηρέτησης προγραμματίζει την αναχώρηση και τελικά τη νέα άφιξη. Η συνάρτηση `departure` εκτελεί την αναχώρηση από έναν εξυπηρετητή ανανεώνοντας τις σχετικές μεταβλητές, ελέγχοντας αν υπάρχουν πλοία στην ουρά. Οι συναρτήσεις `gen_int_arr` και `gen_service_time_server` χρησιμοποιούν inverse transform sampling για να παράξουν χρόνους άφιξης και εξυπηρέτησης αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι αν και η διαδικασία άφιξης ακολουθεί κατανομή Poisson και η διαδικασία εξυπηρέτησης αρνητική εκθετική κατανομή, εντούτοις αυτή η υλοποίηση με χρήση της συνάρτησης `np.random.uniform` δίνει καλύτερα αποτελέσματα και για αυτό και χρησιμοποιείται. Τέλος, τα αποτελέσματα αναπαρίστανται σε μορφή πίνακα με χρήση της συνάρτησης `pd.DataFrame` και τυπώνονται σε ένα αρχείο excel.

Ενδεικτικά ο κώδικας με παραμέτρους  $\lambda$  και  $\mu$  για το μήνα Απρίλιο παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνες 2-3):

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3
4 l=9.73 #lambda parameter for a certain month
5 m=0.894 #mi parameter for a certain month
6
7 class Port_Simulation:
8     def __init__(self,num_servers=12):
9         self.clock=0.0 #simulation clock
10        self.num_arrivals=0 #total number of arrivals
11        self.s_arrival=self.gen_int_arr() #time of next arrival
12        self.s_departure=num_servers*[float('inf')] #departure time from each server
13        self.dep_sum=num_servers*[0] #Sum of service times
14        self.state_S=num_servers*[0] #current state of server (binary)
15        self.total_wait_time=0.0 #total wait time
16        self.total_time=0.0 #total time spent in system
17        self.num_in_q=0 #current number in queue
18        self.number_in_queue=0 #ships who had to wait in queue (counter)
19        self.num_in_system=0 #current number of ships in system
20        self.num_of_departures=num_servers*[0] #number of ships served
21        self.num_servers = num_servers #number of servers (12 in our case)
22
23    def time_adv(self): #timing routine
24        s_next_event=min([self.s_arrival] + self.s_departure) #determine time of next event
25        self.total_wait_time += (self.num_in_q*(s_next_event-self.clock))
26        self.total_time += (self.total_wait_time + (1/m))
27        self.clock=s_next_event
28
29        if sum(1 for x in self.s_departure if x>self.s_arrival)==self.num_servers:
30            self.arrival()
31        else:
32            min_id = np.random.randint(0,self.num_servers)
33            self.departure(min_id)
34
35
36
37    def arrival(self):
38        self.num_arrivals += 1
39        self.num_in_system += 1
40
41        if self.num_in_q == 0: #schedule next departure or arrival depending on state of servers
42            if sum(self.state_S)==self.num_servers:
43                self.num_in_q+=1
44                self.number_in_queue+=1
45                self.s_arrival=self.clock+self.gen_int_arr() #schedule next arrival
46            else:
47                min_id = np.random.randint(0,self.num_servers) #assign the service process to a random server
48                self.state_S[min_id]=1
49                self.dep= self.gen_service_time_server()
50                self.dep_sum[min_id] += self.dep
51                self.s_departure[min_id]=self.clock + self.dep #schedule departure
52                self.s_arrival=self.clock+self.gen_int_arr() #schedule next arrival
53            else:
54                self.num_in_q+=1
55                self.number_in_queue+=1
56                self.s_arrival=self.clock + self.gen_int_arr() #schedule next arrival

```

Εικόνα 2:Κώδικας προσομοίωσης του συστήματος (Lines 1-57)

```

58
59
60    def departure(self, server_id): #departure from a server
61        self.num_of_departures[server_id] += 1
62        self.num_in_system -= 1
63        if self.num_in_q>0:
64            self.dep= self.gen_service_time_server()
65            self.dep_sum[server_id] += self.dep
66            self.s_departure[server_id]=self.clock + self.dep
67            self.num_in_q-=1
68        else:
69            self.s_departure[server_id]=float('inf')
70            self.state_S[server_id]=0
71
72
73
74    def gen_int_arr(self): #function to generate arrival times using inverse transform
75        return (-np.log(1-(np.random.uniform(low=0.0,high=1.0)))) * (1/l))
76
77    def gen_service_time_server(self): #function to generate service time for a server using inverse transform
78        return (-np.log(1-(np.random.uniform(low=0.0,high=1.0)))) * (1/m))
79
80
81
82    s=Port_Simulation() #tabular data representation
83    c_columns = ['Average number of arrivals']
84    c_columns += ['Ships who had to wait at Anchorage']
85    c_columns += ['Average waiting time']
86    c_columns += ['Average time spent in system']
87    c_columns += ['Average number of ships in system']
88
89    for i in range(s.num_servers):
90        c_columns += ['Util. of '+str(i)]
91
92    df=pd.DataFrame(columns=c_columns)
93
94    for i in range(30): #run for a total 30 days, 24h/day
95        np.random.seed(i)
96        s.__init__()
97        while s.clock <= 1440:
98            print (s.clock) #print clock to determine the passing of days
99            s.time_adv()
100           output_ = [s.num_arrivals/s.clock]
101           output_ += [s.number_in_queue]
102           output_ += [(s.total_wait_time/s.clock)/30]
103           output_ += [(s.total_time/s.clock)/30]
104           output_ += [(s.total_time/s.clock)*1]/30
105
106           for i in range(s.num_servers):
107               output_ += [s.dep_sum[i]/s.clock]
108
109           a=pd.Series(output_,index=df.columns)
110           df=df.append(a,ignore_index=True)
111
112    df.to_excel('results.xlsx')
113

```

Εικόνα 3:Κώδικας προσομοίωσης του συστήματος (Lines 58-112)



Ακολουθεί ο πίνακας output από το αρχείο excel (Πίνακες 8-9):

Πίνακας 9: Simulation output (Columns A-F)

	A	B	C	D	E	F
1		Average number of arrivals	Ships who had to wait at Anchorage	Average waiting time	Average time spent in system	Average number of ships in system
2	0	9.685380674	0	0	1.575026254	15.32500545
3	1	9.710803011	1	3.44011E-07	1.585528646	15.42719372
4	2	9.604055478	0	0	1.578276326	15.35662865
5	3	9.710908389	1	4.03811E-06	1.815160685	17.66151347
6	4	9.746274324	0	0	1.584121763	15.41350475
7	5	9.810997978	0	0	1.599162012	15.55984638
8	6	9.860698258	0	0	1.614968841	15.71364682
9	7	9.747121489	0	0	1.610074296	15.6660229
10	8	9.82520083	0	0	1.559340418	15.17238227
11	9	9.66386348	0	0	1.57888598	15.36256059
12	10	9.775629913	0	0	1.583592165	15.40835176
13	11	9.691296741	0	0	1.593588189	15.50561308
14	12	9.639546399	0	0	1.575488247	15.32950064
15	13	9.805182204	0	0	1.594960604	15.51896668
16	14	9.617037916	0	0	1.566606537	15.2430816
17	15	9.746433587	0	0	1.586539063	15.43702508
18	16	9.825954098	0	0	1.60578944	15.62433125
19	17	9.984768384	0	0	1.642997559	15.98636625
20	18	9.762744694	0	0	1.597475175	15.54343345
21	19	9.755209629	1	6.23508E-07	1.619816847	15.76081792
22	20	9.667248186	1	1.63739E-07	1.588585688	15.45693874
23	21	9.624688678	0	0	1.591374156	15.48407054
24	22	9.573949014	0	0	1.562519489	15.20331463
25	23	9.759831652	9	3.74985E-05	3.328924026	32.39043077
26	24	9.653084256	0	0	1.598530293	15.55369975
27	25	9.755409007	0	0	1.575267371	15.32735152
28	26	9.704596296	0	0	1.559686912	15.17575365
29	27	9.746583059	0	0	1.576119816	15.33564581
30	28	9.730319506	0	0	1.566630733	15.24331703
31	29	9.786807814	0	0	1.639065766	15.9481099

Πίνακας 10: Simulation output (Columns G-R)

G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Util. of 0	Util. of 1	Util. of 2	Util. of 3	Util. of 4	Util. of 5	Util. of 6	Util. of 7	Util. of 8	Util. of 9	Util. of 10	Util. of 11
0.889885	0.942434	0.910143	0.856654	0.944574	0.94134	0.895244	0.828555	0.907619	0.934899	0.846655	0.913558
0.949315	0.903536	0.847874	0.893908	0.918715	0.91037	0.945284	0.855417	0.946851	0.831548	0.961864	0.915784
0.941384	0.956126	0.878882	0.91625	0.896369	0.958295	0.870151	0.922702	0.905162	0.926552	0.831183	0.897627
0.900791	0.876127	0.926183	0.944093	0.930486	0.920646	0.844781	0.871647	0.916221	0.934158	0.848936	0.833031
0.928403	0.888279	0.878201	0.904089	0.922944	0.840906	0.860084	0.964894	0.92989	0.930929	0.941793	0.900547
0.936698	0.970444	0.877812	0.862395	0.87127	0.889039	0.906422	0.917606	0.986873	0.900368	0.981922	0.945697
0.881144	0.873495	0.911131	0.921763	0.898772	0.917804	0.844972	0.973367	0.874548	0.964281	0.920028	0.960557
0.952219	0.858877	0.913536	0.877354	0.870715	0.827127	0.961428	0.923271	0.932322	0.865254	0.977904	0.898402
0.952596	0.857447	0.890607	0.877803	0.924568	0.959146	0.955484	0.812769	0.945947	0.960795	0.959843	0.955053
0.969134	0.940768	0.909303	0.859425	0.977345	0.886809	0.918485	0.841235	0.882306	0.917174	0.855237	0.979721
0.963528	0.861701	0.930467	0.93988	0.883405	0.919741	0.869144	1.012383	0.878535	0.986498	0.918363	0.887937
0.886581	0.89936	0.891334	0.944698	0.874386	0.891104	0.951206	0.886013	0.952765	0.887491	0.909183	0.885332
0.870393	0.874991	0.899144	0.912217	0.876038	0.910945	0.948333	0.84058	0.876142	0.930153	0.859673	0.895895
0.839902	0.871836	0.900383	0.875289	0.910872	0.932029	0.952918	0.953776	0.865436	0.946892	0.893158	0.947677
0.894684	0.925763	0.850196	0.876049	0.90977	0.864408	0.834132	0.924514	0.877752	0.918903	0.899126	0.853528
0.881453	0.839732	0.964174	0.948875	0.888951	0.938943	0.875935	0.900348	0.907461	0.88429	0.934418	0.959303
0.829959	0.928355	0.968884	0.843904	0.972245	0.967948	0.957469	0.929857	0.930677	0.967065	0.873469	0.875707
0.899522	0.918251	0.918682	0.904081	0.971435	0.898937	0.946021	0.875799	0.949892	0.893781	0.881324	0.902545
0.896858	0.921383	0.864364	0.881881	0.822683	0.879974	0.868061	0.860106	0.918949	0.943495	0.940853	0.946427
0.827989	0.904393	0.914532	0.8736	0.921985	0.84302	0.908739	0.932422	0.907632	0.917934	0.953619	0.923575
0.84678	0.972109	0.890871	0.972542	0.91846	0.927624	0.911248	0.878048	0.946464	0.850674	0.904768	0.914968
0.946064	0.899807	0.911247	0.897854	0.88397	0.894587	0.895125	0.844276	0.920756	0.931747	0.822907	0.919572
0.854785	0.947541	0.860978	0.871986	0.934957	0.935221	0.977156	0.890817	0.883927	0.865419	0.867748	0.856303
0.939819	0.966527	0.937457	0.952372	0.913732	0.868405	0.972805	0.886464	0.916928	0.889291	0.946816	0.918833
0.927622	0.914916	0.888051	0.829812	0.87536	0.879936	0.874808	0.908818	0.942728	0.902351	0.877375	0.88755
0.904959	0.902041	0.92304	0.894259	0.9341	0.925323	0.908911	0.843947	0.909021	0.980355	0.956652	0.860931
0.945773	0.929951	0.872879	0.887701	0.959108	0.919988	0.881847	0.938864	0.875255	0.971692	0.887043	0.9581
0.904378	0.929971	0.939813	0.934059	0.937157	0.854492	0.856475	0.932146	0.928036	0.87941	0.90918	0.897742
0.897795	0.99144	0.912998	0.956042	0.897271	0.931082	0.890859	0.888155	0.880907	0.84653	0.902792	0.890791
0.967433	0.862019	0.89532	0.931981	0.911986	0.908655	0.828158	0.919233	0.922956	0.917103	0.951445	0.936482

Τα στοιχεία εξόδου κάθε στήλης είναι τα παρακάτω:

- **A** – Αριθμός ημέρας
- **B** – Μέσος αριθμός αφίξεων πελατών ανά ημέρα
- **C** – Πελάτες που ανέμειναν στην ουρά
- **D** – Μέσος χρόνος αναμονής σε ημέρες
- **E** – Μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα σε ημέρες
- **F** – Μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα ανά πάσα στιγμή
- **G-R** – Προσφερόμενος ρυθμός φόρτου εργασίας για κάθε έναν από τους εξυπηρετητές 0-11

Αξίζει να σημειωθεί πως τα πλοία που μπήκαν αρχικά στην ουρά, οι μέσοι χρόνοι αναμονής και παραμονής στο σύστημα και ο μέσος αριθμός πλοίων στο σύστημα έχουν μικρότερη τιμή από ότι στην πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί στο script ένα πλοίο ή αναμένει ή εξυπηρετείται απευθείας κατά την άφιξη, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει μια καθυστέρηση ακόμα και αν η ουρά είναι άδεια, είτε λόγω ρυμούλκησης είτε λόγω καιρικών συνθηκών. Επομένως αφού δεν λαμβάνει υπόψη αυτό το χρονικό διάστημα, οι παραπάνω τιμές που εξαρτώνται από το χρόνο εμφανίζονται μικρότερες. Αντιθέτως, οι τιμές του ρυθμού άφιξης και οι τιμές του προσφερόμενου φόρτου σε κάθε server είναι παρόμοιες με τις πραγματικές, αφού είναι ανεξάρτητες οποιασδήποτε χρονικής καθυστέρησης.

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε πως πράγματι τα προσδοκώμενα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση με τα πραγματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από αντικατάσταση των τύπων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, γεγονός που επαληθεύει ότι η επιλογή του μοντέλου που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης ήταν η πιο σωστή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ

#### 6.1 Σύνοψη των ευρημάτων

Η κύρια λειτουργία ενός εμπορικού λιμένα είναι να εξυπηρετεί τα διάφορα διερχόμενα πλοία άμεσα, γρήγορα, αποτελεσματικά και με εύλογο κόστος. Επειδή το κόστος είναι ανάλογο την αναμονής, το πρόγραμμα εξυπηρέτησης των φορτηγών πλοίων θα πρέπει να βγαίνει με τρόπο στρατηγικό ώστε το καθένα να ελλιμενίζεται άμεσα και σε συγκεκριμένη θέση της Προβλήτας του, αναλόγως τις διαστάσεις του και τη χωρητικότητά του σε TEUs. Επιπλέον, η οργάνωση ενός προγράμματος εξυπηρέτησης λαμβάνει υπόψη και τον απαιτούμενο εξοπλισμό (γερανούς και βοηθητικά οχήματα) που πρέπει να δεσμευτεί για την εκφόρτωση (ή φόρτωση) ενός εμπορευματοκιβωτιοφόρου.

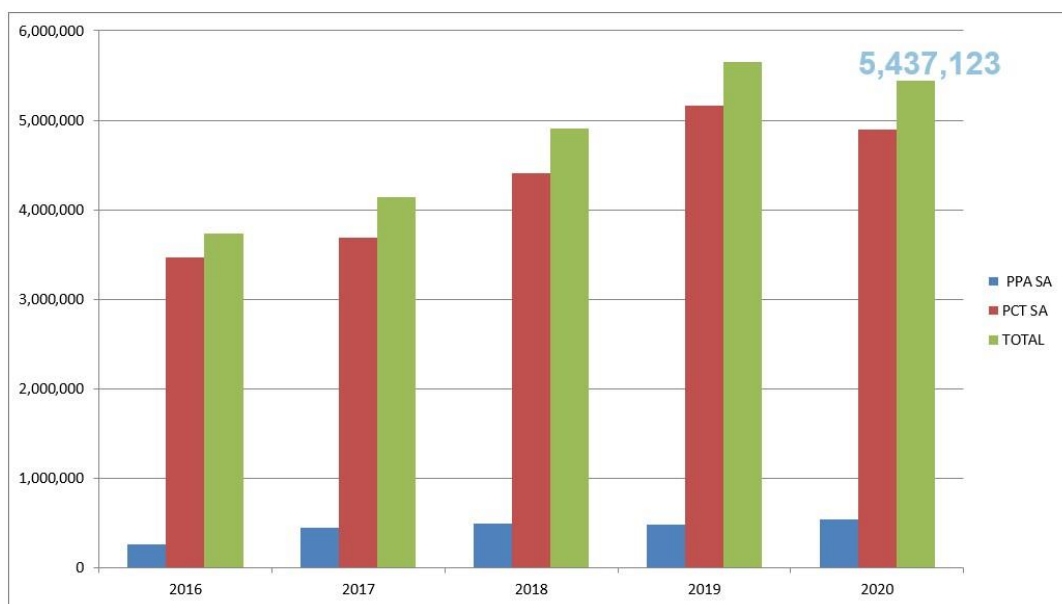
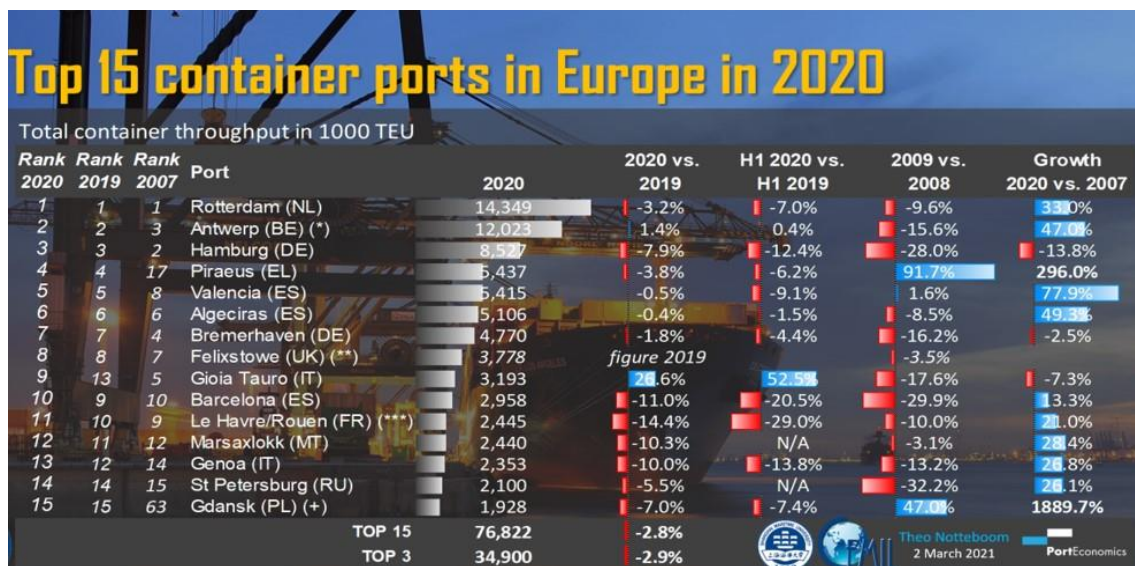
Ο Πειραιάς είναι λιμάνι με μεγάλο γεωγραφικό πλεονέκτημα, οπότε και χρειάζεται να έχει επαρκείς υποδομές και εξοπλισμό για θαλάσσιο εμπόριο προκειμένου να είναι ανταγωνιστικό έναντι άλλων μεγάλων εμπορικών λιμένων της Ευρώπης. Για τη μελέτη περίπτωσης, έγινε ανάλυση των δεδομένων που αφορούν αφίξεις και αναχωρήσεις containers από και προς το Σ.ΕΜΠΟ. (Container Terminal) στο Νέο Ικόνιο, για να προσδιοριστεί η λιμενική συμφόρηση και κατ' επέκταση η απόδοση του συστήματος.

Η ανάλυση έδειξε πως ο μέσος αριθμός αφίξεων για τις 53 εβδομάδες που μελετήθηκαν είναι  $\lambda = 8.17$  containers/ημέρα, ενώ ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης είναι  $\mu = 1.0354$  containers/ημέρα. Έτσι η μέση τιμή της έντασης κίνησης για το σύστημα προέκυψε  $\rho = 0.658$  erl. Ακόμη, ο μέσος χρόνος αναμονής στο Αγκυροβόλιο, δηλαδή στην ουρά αναμονής, βρέθηκε ότι είναι  $W_q = 0.094$  ημέρες ή  $W_q = 2h15min$ , ενώ ο συνολικός χρόνος παραμονής στο σύστημα είναι  $W = 1.067$  ημέρες ή  $W = 25h36min$ . Η πιθανότητα αναμονής στην ουρά (queuing) είναι  $P_w = 6.83\%$  και τέλος οι μέσοι αριθμοί πελατών στην ουρά και στο σύστημα υπολογίστηκαν ως  $L_q = 0.89$  πελάτες και  $L = 8.83$  πελάτες αντίστοιχα. Τέλος, ο αναμενόμενος αριθμός πελατών σε εξυπηρέτηση είναι  $r = 7.89$  πελάτες, που σημαίνει

ότι από τις συνολικά 12 διαθέσιμες θέσεις εξυπηρέτησης στις 3 Προβλήτες, ένα ποσοστό της τάξης του **65.76%** χρησιμοποιείται οποιαδήποτε στιγμή (berth utilization).

Από οικονομικής άποψης, τα στοιχεία δείχνουν πως από τότε που ανέλαβε τη διαχείριση η CPL, το εμπορικό λιμάνι έχει δει μεγάλη ανάπτυξη ως προς τη διακίνηση Ε/Κ (throughput), διακινώντας συνολικά για το 2020 **5.437.123 TEUs** και κατακτώντας την 4<sup>η</sup> θέση στην κατάταξη με τα μεγαλύτερα ευρωπαϊκά εμπορικά λιμάνια, όπως διαπιστώνεται και από τον Πίνακα 11 και το Σχήμα 15 παρακάτω:

Πίνακας 11: Τα μεγαλύτερα ευρωπαϊκά εμπορικά λιμάνια για το 2020 (porteconomics.eu)



Σχήμα 15 Ετήσια διακίνηση Ε/Κ του PPA και PCT σε TEUs (olp.gr)

## 6.2 Συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής, δηλαδή η μοντελοποίηση του Container Terminal του εμπορικού λιμένα του Πειραιά ως ένα σύστημα ουράς και η μελέτη απόδοσής του επιτεύχθηκε με χρήση μόνο μιας βασικής μεθοδολογίας, που δεν είναι άλλη από την εφαρμογή του κλασσικού μοντέλου της Θεωρίας Ουρών που επισημάνθηκε στην Υποενότητα 3.2.

Συμπερασματικά, τα ευρήματα της μελέτης έδειξαν πως το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί αρκετά αποδοτικό, καθώς η μέση τιμή της έντασης κίνησης υποδηλώνει ένα σύστημα με μέτρια λιμενική συμφόρηση, χωρίς ωστόσο οι πόροι του να μένουν για μεγάλα διαστήματα αδρανείς, αλλά ούτε και να μπλοκάρουν. Δηλαδή σε έναν εξυπηρετητή, ο χρόνος εργασίας είναι πάντοτε μεγαλύτερος του χρόνου αδράνειας, ενώ ο αριθμός των θέσεων πλεύρισης αποδείχθηκε επαρκής. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε πως η πιθανότητα να χρειαστεί να περιμένει ένας πελάτης στο Αγκυροβόλιο είναι πολύ μικρή, ενώ ο μέσος χρόνος παραμονής στην ουρά είναι περίπου το 9% του συνολικού χρόνου παραμονής στο σύστημα, σε περίπτωση που εισέλθει στην ουρά.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα πάντως, είναι πως αν και το επενδυτικό πλάνο τα τελευταία 13 χρόνια έχει καταστήσει το Σ.ΕΜΠΟ. ένα από τα μεγαλύτερα ευρωπαϊκά Container Ports, με αύξηση της διακίνησης Ε/Κ κατά 296%, αυτό παραμένει αρκετά αποδοτικό, με περιθώρια εξυπηρέτησης επιπλέον πελατών, όπως μαρτυρά η ετήσια διακίνηση Ε/Κ στο Σχήμα 6.2 από το 2018, που πραγματοποιήθηκε η πιο πρόσφατη αναβάθμιση σε εγκαταστάσεις και εξοπλισμό, έως και το 2020.

### 6.3 Συστάσεις για μελλοντική χρήση

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, παρατίθενται κάποιες συστάσεις για μελλοντική αξιοποίηση του λιμανιού του Πειραιά.

- Η ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη μελέτη αποδοτικότητας του Container Terminal, μπορεί να εφαρμοστεί και για οποιοδήποτε άλλο Σταθμό, τόσο του επιβατηγού όσο και του εμπορικού λιμένα, με χρήση του ίδιου μοντέλου ουράς M/M/c και πειθαρχία ουράς FIFO, εκτός από περιπτώσεις εξαιρέσεων.
- Η μείωση των χρόνων αναμονής και εξυπηρέτησης δύναται να επιτευχθεί με υιοθέτηση μιας εσωτερικής πολιτικής κατανομής πελατών, με παραμέτρους το μήκος του πλοίου, το βύθισμά του, τον συνολικό όγκο του φορτίου και την αποδοτικότητα του εξυπηρετητή.
- Η δημιουργία νέων θέσεων πλευρίσης και η αγορά νέου εξοπλισμού θα αυξήσει σε κάθε περίπτωση την ετήσια διακίνηση σε TEUs, έναντι μεγάλου κόστους ωστόσο. Μια απλή λύση για συντομότερη εξυπηρέτηση, που δεν απαιτεί κάποια επένδυση είναι ο ενστερνισμός ενός προγράμματος φορτοεκφόρτωσης εμπορευμάτων που θα περιορίζει την επανατοποθέτησή τους πάνω στο καράβι ή στο συγκρότημα αποθηκών στο Κερατσίνι, με στόχο να μπορούν να εξυπηρετούνται περισσότεροι πελάτες σε λιγότερο χρόνο.
- Τέλος, συνιστάται για μελλοντική έρευνα, ανάλυση του συστήματος εξυπηρέτησης του Logistics Center του ΟΛΠ στο Κερατσίνι, για τη διακίνηση των εμπορευμάτων γενικού φορτίου που μεταφέρονται με φορητά αυτοκίνητα διεθνών μεταφορών (T.I.R.), καθώς και αυτών που διακινούνται με containers, αλλά και με βαγόνια τρένων.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Erlang, Agner K. (1909), "Sandsynlighedsregning og Telefonsamtaler". Probability Calculation and Telephone Conversations, *Nyt Tidsskrift for Matematik* (in Danish), 20 (B): pp. 33–39, JSTOR 24528622
- [2] Akpudo, C.U. (2014), "Assessment of Port Performance: The Queuing Theory Approach (A case of Apapa Port Complex)". Owrri Federal University of Technology, MSc in Maritime Management Technology, pp. 73
- [3] Kalavathy, S. (2002), "Operations Research". 2<sup>nd</sup> ed., Delhi: Vikas Publishing House Pvt Ltd.
- [4] Sen, P. (1980), "Optimal priority assignment in queues: application to marine congestion problems". *Maritime Policy Management* 7 (3), pp. 174-184
- [5] Edmond, E.D., Maggs, R.P. (1978), "How useful are queue models in port investment decisions for container berths?". *Journal of the Operation Research Society* 29, pp. 741-750
- [6] Dragovic, B., Park, N.K., Radmilovic, Z. (2006), "Ship-berth link performance evaluation-simulation and analytical approaches". *Maritime Policy Management* 33 (3), pp. 281-299
- [7] Solayman Hoque, A.K.M., Biswas, S.K. (2007), "Berthing problem of ships in Chittagong port and proposal for its solution". *Journal of Mechanical Engineering* 37, pp. 66-70
- [8] El-Naggar, M.E. (2010), "Application of queuing theory to the container terminal at Alexandria seaport". *Journal Soil Science Environmental Management* Vol. 1 (3), pp. 77-85
- [9] Sheikholeslami, A., Ilati, G., Yeganeh, Y.E. (2014), "Practical solutions for reducing container ships' waiting times at ports using simulation model". *Journal of Marine Science and Application* 12, pp. 434-444.
- [10] Oyatoye, E.O., Adebisi, S.O., Okoye, J.C., Amole, B. (2011) "Application of queuing theory to port congestion problem in Nigeria". *European Journal of Business and Management* 3 (8), pp. 24-36
- [11] Kendall, G.D. (1953), "Stochastic Processes occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the method of the Imbedded Markov Chain". *Annals of Mathematical Statistics* 24 pp. 338-354

- [12] Little, J.D.C. (1961), "A Proof for the Queuing Formula:  $L=\lambda W$ ". *Operations Research* 9 (3): pp. 383-387
- [13] ΟΛΠ: Στρατηγική – Όραμα [online] Available at:  
<https://www.olp.gr/el/o-organismos/stratigiki-orama> (accessed June 1, 2021)
- [14] ΣΕΠ: Ποιοι είμαστε [online] Available at:  
<http://www.pct.com.gr/content.php?lang=gr&id=1> (accessed June 1, 2021)
- [15] China's Cosco acquires 51 pct stake in Greece's Piraeus Port [online] Available at:  
<https://www.reuters.com/article/greece-privatisation-port-idUSL8N1AR252> (accessed June 1, 2021)
- [16] Επενδύσεις 90 εκατ. στον ΟΛΠ το 2021 από την Cosco [online] Available at:  
<https://www.kathimerini.gr/economy/561146650/ependyseis-90-ekat-ston-olp-to-2021-aro-tin-cosco/> (accessed June 1, 2021)
- [17] Son, J.H., Kim, M.H. (2004), "An analysis of the optimal number of servers in distributed client/servers". *Environmental Decision Support Systems* (36), pp. 297-312.
- [18] Zoran, R., Branislav, D. (2005), "Optimal number and capacity of servers in Queuing Systems". *Inf. Management Science* 16 (3), pp. 1-16.
- [19] Pardalis, A., Michalopoulos, V. (2008), "Determining the position of container handling ports, using benchmarking analysis: The case of the Port of Piraeus". *Maritime Policy and Management* 35 (3), pp. 271-284
- [20] Cholis, G. (2010), "Piraeus Container Terminal Competitiveness in the Eastern and Central Mediterranean". Erasmus University Rotterdam, MSc in Maritime Economics and Logistics, pp. 93-100
- [21] Wen-Chih, H., Tu-Cheng, K., Sheng-Chieh, W. (2007), "A comparison of Analytical Methods and Simulation for Container Terminal planning". *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers* 24 (3), pp. 200-209