



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

**ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΟΥΛΟΥΜΠΕΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

Επιβλέπων: Λυρίδης Δημήτριος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Δ Λυρίδη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης, τον ευχαριστώ για τη συμβολή του στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	10
1 ΕΠΟΨΗ	11
2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	13
3 ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ.....	14
3.1 Η ΛΙΜΕΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....	14
3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΤΙΣ ΕΣΑ.....	16
3.2.1 Ο ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ 14- ΠΕΡΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ	17
3.2.2 Ο ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ 13- ΠΕΡΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ .	18
3.2.3 Η ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΟΥ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	19
4 ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....	21
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	21
4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΟΥΡΩΝ.....	21
4.2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΦΙΞΗΣ ΠΕΛΑΤΩΝ	21
4.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΠΕΛΑΤΩΝ	22
4.2.3 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	23
4.2.4 ΦΑΣΕΙΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	24
4.2.5 ΝΟΜΟΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΕΩΣ ΠΕΛΑΤΩΝ.....	25
4.2.6 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	26
4.3 ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....	26
4.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	28
4.4.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	28
4.4.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	29
4.5 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	30
5 ΠΟΣΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	32

5.1	ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	32
5.2	ΜΟΝΤΕΛΑ ΟΥΡΩΝ POISSON	33
5.2.1	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΝΝΗΣΕΩΝ- ΘΑΝΑΤΩΝ	33
5.2.2	ΜΟΝΤΕΛΑ POISSON ΑΠΛΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΤΗ.....	35
5.2.3	ΜΟΝΤΕΛΑ POISSON ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΤΩΝ.....	40
5.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO.....	44
5.3.1	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	44
5.3.2	ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ	45
5.3.3	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΤΕΣΤ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ	46
5.3.4	ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	47
5.3.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ	49
5.3.6	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΑΤΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ.....	51
5.4	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ MONTE CARLO.....	53
6	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	57
6.1	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΠΛΟΙΩΝ.....	57
6.2	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	58
6.2.1	ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ.....	58
6.2.2	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ	59
6.2.3	ΕΙΔΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ.....	63
6.3	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....	64
7	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ....	65
7.1	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ	65
7.1.1	ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG.....	65
7.1.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΠΛΟΙΩΝ	66
7.2	ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ.....	66
7.2.1	ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ.....	66
7.2.2	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ	67
7.2.3	ΕΙΔΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ.....	75

7.2.4	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....	78
7.3	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΖΗΤΗΣΗΣ	80
7.3.1	ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	80
7.3.2	ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	84
7.3.3	ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	87
7.3.4	ΧΡΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	90
7.3.5	ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	92
7.4	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ	94
7.4.1	ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	95
7.4.2	ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	97
7.4.3	ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	99
7.4.4	ΧΡΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ.....	101
7.4.5	ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ	102
7.5	ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΠΕΛΑΤΩΝ.....	105
7.5.1	ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΖΗΤΗΣΗΣ	105
7.5.2	ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ 106	
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	109
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Ευκαιρίες και απειλές από τη λειτουργία ενός πλοίου μέσα στο λιμένα	15
Εικόνα 2: Διάρθρωση λιμενικού κόστους.....	15
Εικόνα 3: Υπάρχουσες και πιθανές περιοχές ελέγχου εκπεμπόμενων ρύπων (ECAs)	17
Εικόνα 4: Ανώτατα όρια εκπομπής οξειδίων του αζώτου σε ένα κύκλο της μηχανής (gr/kWh)	19
Εικόνα 5: Σύστημα αναμονής με αποχώρηση πελατών	21
Εικόνα 6: Σύστημα αναμονής με παράλληλους σταθμούς εξυπηρέτησης.....	23
Εικόνα 7: Σύστημα αναμονής με πολλές ουρές αναμονής	23
Εικόνα 8: Σύστημα αναμονής, με επιτρεπτή μετακίνηση πελάτη από μία ουρά αναμονής σε άλλη	24
Εικόνα 9: Σύστημα αναμονής πολλών φάσεων εξυπηρέτησης	24
Εικόνα 10: Σύστημα αναμονής με ανατροφοδότηση.....	25
Εικόνα 11: Σύστημα αναμονής με πολλαπλούς σταθμούς εξυπηρέτησης και πολλές φάσεις εξυπηρέτησης.....	25
Εικόνα 12: Κόστος συστήματος αναμονής (Ξηροκώστας, 1991)	29
Εικόνα 13: Αθροιστική κατανομή που προέρχεται από την τυποποιημένη κανονική κατανομή.....	48
Εικόνα 14: Μέθοδος αντίστροφου μετασχηματισμού	48
Εικόνα 15: Εγκιβωτισμός συνάρτησης σε ορθογώνιο	51
Εικόνα 16: Καταμερισμός πιθανοτικής κατανομής σε N=8 ίσα διαστήματα	52
Εικόνα 17: Δειγματοληψία της αθροιστικής κατανομής	52
Εικόνα 18: Σύνολα διαστημάτων Ω , D για τη μέθοδο αποδοχής- απόρριψης (Rubinstein 1986).....	55
Εικόνα 19: Μέθοδος αποδοχής- απόρριψης για την παραγωγή τυχαίων διανυσμάτων για τη βελτιστοποίηση Monte Carlo	56
Εικόνα 20: Διαδικασία ανεφοδιασμού πλοίου	58
Εικόνα 21: Ο τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας (ιστοσελίδα ΔΕΣΦΑ).....	65
Εικόνα 22: Θέση νήσου Ρεβυθούσας	66
Εικόνα 23: Πιθανοτική κατανομή τιμής παροχής LNG ανά κυβικό μέτρο	70

Εικόνα 24: Πιθανοτική κατανομή κόστους παροχής LNG ανά κυβικό μέτρο	71
Εικόνα 25: Υπολογισμός μεγεθών ειδικής συνάρτησης κέρδους	78
Εικόνα 26: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=1$)	82
Εικόνα 27: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=1$).....	83
Εικόνα 28: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=1$).....	83
Εικόνα 29: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=2$)	85
Εικόνα 30: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=2$).....	86
Εικόνα 31: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=2$).....	86
Εικόνα 32: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=3$)	88
Εικόνα 33: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=3$).....	89
Εικόνα 34: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=3$).....	89
Εικόνα 35: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=4$)	91
Εικόνα 36: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=4$).....	91
Εικόνα 37: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=4$).....	92
Εικόνα 38: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό χρηστών ($s=5$)	93
Εικόνα 39: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=5$).....	93
Εικόνα 40: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=5$).....	94
Εικόνα 41: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=1$)	95

Εικόνα 42: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=1$).....	96
Εικόνα 43: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=1$).....	97
Εικόνα 44: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=2$)	97
Εικόνα 45: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=2$).....	98
Εικόνα 46: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=2$).....	98
Εικόνα 47: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=3$)	99
Εικόνα 48: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=3$).....	100
Εικόνα 49: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=3$).....	100
Εικόνα 50: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=4$)	101
Εικόνα 51: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών ($s=4$).....	101
Εικόνα 52: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=4$).....	102
Εικόνα 53: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών ($s=5$)	103
Εικόνα 54: Αθροιστική κατανομή κέρδους από τη χρήση του συστήματος, μετά την επιλογή πελατών ($s=4$).....	103
Εικόνα 55: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών ($s=5$).....	104
Εικόνα 56: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, συναρτήσει των σταθμών εξυπηρέτησεως (s)	105
Εικόνα 57: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, για $s= 3$, 4 και 5 σταθμούς εξυπηρέτησης.....	106
Εικόνα 58: Πιθανοτικές κατανομές κέρδους, από το σύστημα ανεφοδιασμού, συναρτήσει των σταθμών εξυπηρέτησεως (s)	107
Εικόνα 59: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, για $s=3$, $s=4$ και $s=5$ σταθμούς εξυπηρέτησης.....	107

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ανώτατα όρια κατά βάρους περιεκτικότητας θείου στο καύσιμο [IMO, 2013b].....	17
Πίνακας 2: Ανώτατο όριο εκπομπής οξειδίων του αζώτου [IMO, 2013c].....	18
Πίνακας 3: Χρησιμοποιούμενα σύμβολα για την παράσταση συστημάτων αναμονής	27
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/1):(GD/∞/∞)	36
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/1):(GD/N/∞)	37
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/1):(GD/∞/N)	38
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλων Poisson με ένα εξυπηρετητή.....	39
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/s):(GD/∞/∞)	40
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/s):(GD/N/∞)	42
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/s):(GD/∞/K).....	43
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλων Poisson με πολλαπλούς εξυπηρετητές	44
Πίνακας 12: Αναμενόμενη ζήτηση LNG στο λιμένα Πειραιώς τα 2020 (Ζαχαριουδάκης, 2014)	68
Πίνακας 13: Κόστος κτήσεως νέων πλοίων	69
Πίνακας 14: Ετήσιο κόστος διαθέσεως πλοίων.....	69
Πίνακας 15: Κόστος παραμονής πλοίου στο σύστημα αναμονής, ανά κατηγορία πλοίου.....	72
Πίνακας 16: Κόστος παραμονής πλοίου στο σύστημα αναμονής, ανά κατηγορία πλοίου.....	72
Πίνακας 17: Μέση ποσότητα ανεφοδιασμού LNG, ανά κατηγορία πλοίου	73
Πίνακας 18: Κόστος αποχωρήσεως πλοίου, ανά κατηγορία πλοίου	73
Πίνακας 19: Μεγέθη συνάρτησης κέρδους- Μέσες τιμές.....	77

Η λιμενική δραστηριότητα αποτελεί αναπόσπαστο και αυξημένης σημασίας, κομμάτι της ναυτιλιακής δραστηριότητας. Τα πλοία εφοδιάζονται στους λιμένες με νερό, τρόφιμα, καύσιμα, ηλεκτρισμό, ανταλλακτικά, εργαλεία, αναλώσιμα.

Στόχος των σχεδιαζόμενων συστημάτων εξυπηρέτησης είναι η μείωση του κόστους αναμονής, δηλαδή του χρόνου που ένα πλοίο θα περιμένει μέχρι να αρχίσει η εξυπηρέτησή του. Τα σχεδιαζόμενα συστήματα εξυπηρέτησεως θα επαρκούσαν κάθε φορά, αν τα πλοία προσήρχοντο κανονικά σε προκαθορισμένες ώρες και είχαν γνωστούς και σταθερούς χρόνους εξυπηρέτησεως. Όμως, παρουσιάζεται έλλειψη κανονικότητας των χρόνων αφίξεως των πλοίων στους λιμένες και επομένως, αβεβαιότητα στο χρόνο εξυπηρέτησης τους.

Ενδεχόμενες καθυστερήσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια πελατών στο παρόν ή στο μέλλον, αν ο χρόνος αναμονής για ανεφοδιασμό είναι μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο, ή τον προσυμφωνημένο. Μάλιστα, αρκετοί λιμενικοί οργανισμοί, όπως και ο Οργανισμός Λιμένος Πειραιώς (ΟΛΠ) υπογράφουν συμφωνίες με τις ναυτιλιακές εταιρείες για ύπαρξη ελεύθερου αγκυροβολίου όταν το πλοίο θα αφιχθεί στο λιμάνι.

Από την άλλη μεριά, η δημιουργία ενός πολύ μεγάλου συστήματος εξυπηρέτησης για την αποφυγή οποιασδήποτε καθυστέρησης θα απαιτούσε την επένδυση αρκετά μεγάλων χρηματικών ποσών.

Η πρόσφατη απόφαση του IMO για τη θεσμοθέτηση περιοχών ελέγχου καυσαερίων (ECAs) προβλέπεται να οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG): ο εξοπλισμός των πλοίων με διατάξεις καύσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) είναι μία από τις πρώτες αντιδράσεις των πλοιοκτητών στην απόφαση. Η καύση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) εκμηδενίζει τις εκπομπές οξειδίων του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι αρκετά μειωμένες-κατά 80% έως 90% σε σχέση με την καύση MDO και κατά 20-30% σε σχέση με την καύση HFO. Το ενδιαφέρον των ελλήνων πλοιοκτητών είναι έντονο τόσο όσον αφορά τα φορτηγά πλοία, αλλά και την ακτοπλοία αφού η μετάβαση από την καύση πετρελαίου σε καύση φυσικού αερίου επιδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση κατά 50%.

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία, μελετάται η στοχαστική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του σχεδιαζόμενου συστήματος για το μεγαλύτερο λιμάνι της χώρας, το λιμάνι του Πειραιά. Μεταβλητές απόφασης σε ένα σύστημα ουράς είναι συνήθως, ο αριθμός των σταθμών εξυπηρέτησης (s) και ο αριθμός συστημάτων εξυπηρέτησης (λ) ενώ σχεδιαστική παράμετρο αποτελεί η βελτιστοποίηση της απόδοσης των σταθμών εξυπηρέτησης (μ).

Η ευημερία και ανάπτυξη του ΟΛΠ αποτελεί σημαντικό παράγοντα ευημερίας και ανάπτυξης της Ελλάδας. Η αδυναμία πρόβλεψης των ECAs που θα θεσμοθετηθούν μελλοντικά, διακινδυνεύει οποιαδήποτε απόφαση. Το πρόβλημα του σταθμού εξυπηρέτησης LNG του ΟΛΠ δεν εξαντλείται στη σχεδίαση του συστήματος, αλλά σημαντικό ρόλο θα διαδραματίσει η διαχείριση των διαδικασιών, κατά τη λειτουργία του.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η στοχαστική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του συστήματος ανεφοδιασμού του Οργανισμού Λιμένος Πειραιώς, του μεγαλύτερου λιμανιού της χώρας.

Στην αρχή της εργασίας, υποδεικνύεται η σημασία της λιμενικής δραστηριότητας στη ναυτιλιακή οικονομία- το κόστος παραμονής ενός πλοίου μέσα στο λιμένα μπορεί να αποτελεί έως και 35% του λιμενικού κόστους. Μέσω της παράθεσης των κανονισμών 13 και 14 του IMO, περί εκπομπών καυσαερίων σε θεσμοθετημένες ζώνες ελέγχου εκπομπής καυσαερίων, και των πλεονεκτημάτων χρήσης του LNG ως ναυτιλιακού καυσίμου, επιδιώκεται η ανάδειξη της σημασίας παροχής LNG από τους λιμένες στα πλοία, σε περιορισμένα χρονικά περιθώρια και με απόλυτη ασφάλεια.

Το σύστημα ανεφοδιασμού πλοίων με LNG αποτελεί πρόβλημα αναμονής. Στη συνέχεια της διπλωματικής, παρουσιάζονται βασικές έννοιες της θεωρίας συστημάτων αναμονής. Υποδεικνύεται η σημασία του ρυθμού αφίξεων στο σύστημα αναμονής (λ), του ρυθμού εξυπηρέτησεων (μ) και του αριθμού παράλληλων συστημάτων εξυπηρέτησης (s). Παρατίθενται μέθοδοι μεταβολής αυτών των παραμέτρων, ώστε να επιτυγχάνεται το υψηλότερο δυνατό επίπεδο εξυπηρέτησης. Τελικά, παρατίθενται τα βασικά οικονομικά στοιχεία και οι συναρτήσεις κέρδους, που συνδέονται με την απόδοση ενός συστήματος αναμονής.

Λόγω της αβεβαιότητας για τους ρυθμούς αφίξεων και εξυπηρέτησεων, και των τιμών των οικονομικών στοιχείων που διέπουν ένα σύστημα ανεφοδιασμού πλοίων, προτείνεται οι παράμετροι αυτές να μοντελοποιούνται ως πιθανοτικές κατανομές. Η συνάρτηση κέρδους θα είναι τότε μία νέα πιθανοτική κατανομή. Εξάλλου, έχει προηγηθεί η παράθεση των βασικών εννοιών της προσομοίωσης Monte Carlo.

Προκειμένου να ληφθούν οι βέλτιστες αποφάσεις για το ρυθμό αφίξεων, εξυπηρέτησεων και τον αριθμό των παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης, οι οποίοι έχουν προηγουμένως μοντελοποιηθεί ως πιθανοτικές κατανομές, επιδιώκεται η βελτιστοποίηση ως προς κάποια παράμετρο της πιθανοτικής κατανομής κέρδους του συστήματος. Η επιλογή των βέλτιστων τιμών των ανωτέρω παραμέτρων, υπό τους περιορισμούς του συστήματος, είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης Monte Carlo.

Η εξειδίκευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας για το λιμάνι του Πειραιά, υποδεικνύει τον τρόπο εφαρμογής της μεθόδου. Γίνεται προσομοίωση δύο διαφορετικών σεναρίων ζήτησης και βελτιστοποίηση του συστήματος ανεφοδιασμού του ΟΛΠ, για καθένα από αυτά. Τέλος, στα συμπεράσματα της μεθόδου, παρατίθενται πιθανές προεκτάσεις της μελέτης περίπτωσης που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στη βελτίωση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, αλλά και οι περιορισμοί που επιβλήθηκαν στην παρούσα μελέτη περίπτωσης.

3 ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Οι λιμενικές δραστηριότητες είναι εντάσεως κεφαλαίου, και απαιτούν την επένδυση αρκετά μεγάλων χρηματικών ποσών, ή και τη δέσμευση αρκετά μεγάλων χώρων γης. Στόχος για τους λιμενικούς οργανισμούς, κερδοσκοπικούς ή μη, είναι η επίτευξη μέγιστου οφέλους, μέσω του συνδυασμού των διαφόρων παραγωγικών συντελεστών, της ελαχιστοποίησης των απειλών και της μεγιστοποίησης των ευκαιριών, που συνδέονται με τη λιμενική δραστηριότητα (Alderton, 1995).

Μία από τις πρόσφατες εξελίξεις, στις οποίες καλούνται να ανταποκριθούν οι λιμένες είναι η ζήτηση των εφοπλιστών για ανεφοδιασμό των πλοίων τους με υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Ο εξοπλισμός των πλοίων με διατάξεις καύσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) είναι μία από τις πρώτες αντιδράσεις των πλοιοκτητών στην απόφαση του IMO για έλεγχο των παραγόμενων οξειδίων του θείου και του αζώτου σε θεσμοθετημένες περιοχές ελέγχου καυσαερίων (ECAs).

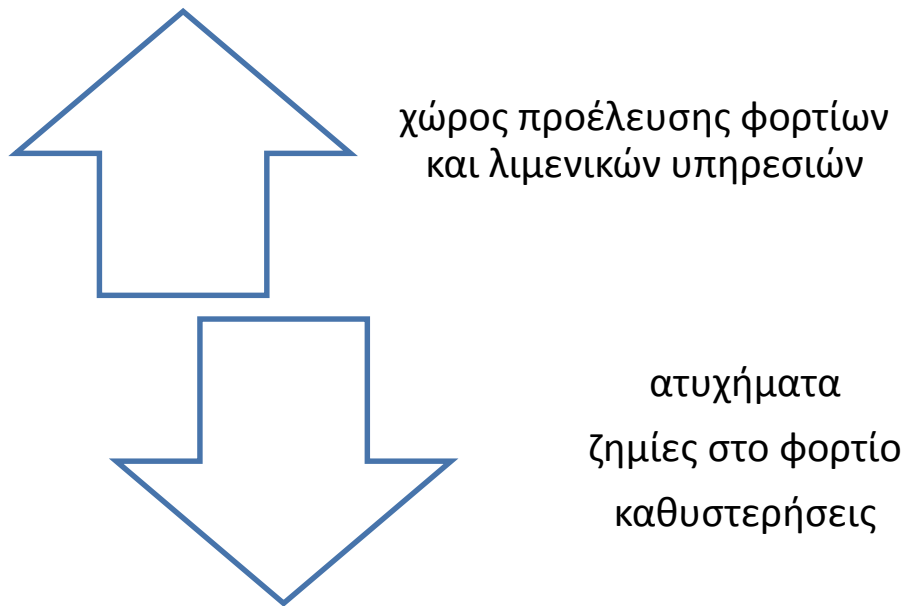
3.1 Η ΛΙΜΕΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Σύμφωνα με τον Alderton (1995), ως λιμάνι θεωρείται «ο παραθαλάσσιος, παραλίμνιος ή παραποτάμιος χώρος απ' τον οποίο διέρχονται άνθρωποι και εμπορεύματα, με σκοπό τη φορτοεκφορτώσή τους στα πλοία». Ένα λιμάνι μπορεί να συνδέεται με την ενδοχώρα ή να βρίσκεται σε κάποια θέση μακριά από τη στεριά. Η λιμενική δραστηριότητα αποτελεί αναπόσπαστο και αυξημένης σημασίας, κομμάτι της ναυτιλιακής δραστηριότητας. Τα πλοία εφοδιάζονται στους λιμένες με νερό, τρόφιμα, καύσιμα, ηλεκτρισμό, ανταλλακτικά, εργαλεία, αναλώσιμα.

Η παραμονή ενός πλοίου στο λιμάνι συνεπάγεται απειλές για το πλοίο, αφού στο λιμάνι:

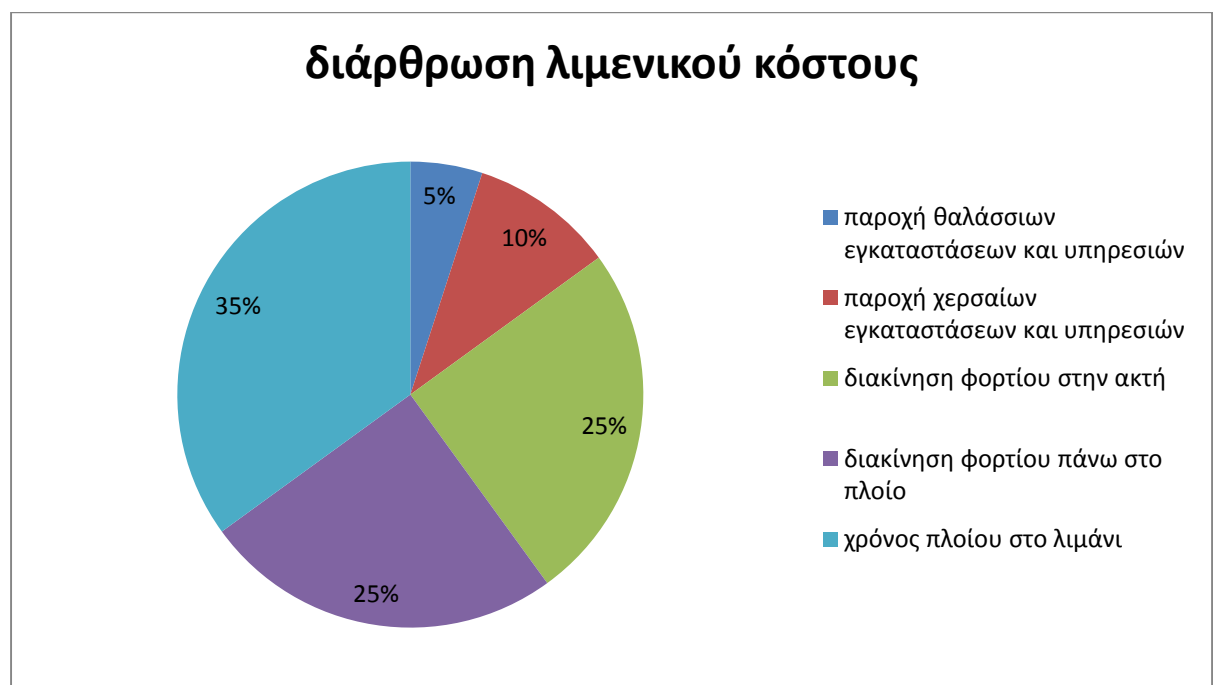
- συμβαίνουν τα περισσότερα ατυχήματα στο φορτίο, το πλήρωμα και τους επιβάτες
- το φορτίο μπορεί να κλαπεί ή να υποστεί ζημιές
- μπορούν να δημιουργηθούν καθυστερήσεις
- εφαρμόζονται οι κυβερνητικές πολιτικές, που αφορούν στον έλεγχο στα φορτία και τα άτομα

αλλά και με ευκαιρίες, αφού το λιμάνι είναι ο χώρος προέλευσης των φορτίων και των λιμενικών υπηρεσιών. Τα ανωτέρω συνοψίζονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Ευκαιρίες και απειλές από τη λειτουργία ενός πλοίου μέσα στο λιμένα

Ο χρόνος παραμονής ενός πλοίου στο λιμάνι αντιστοιχεί, κατά μέσο όρο, στο 35% του χρόνου λειτουργίας του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 (Alderton, 1995). Η μείωση αυτού του χρόνου αποτελεί παράγοντα ανταγωνιστικότητας για το πλοίο. Η εμφάνιση χρονικών καθυστερήσεων σε οποιοδήποτε σημείο της δραστηριότητας θα ζημιώνει αρκετά τους εμπλεκόμενους οργανισμούς- οργανισμό διαχείρισης λιμένα, πλοιοκτήτες, εργαζόμενους, επιβάτες, τοπική κοινωνία και εμπορικά συνεργαζόμενους, με το λιμάνι, επιχειρηματίες.



Εικόνα 2: Διάρθρωση λιμενικού κόστους

Για τη μείωση του χρόνου παραμονής του πλοίου στο λιμάνι, επιδιώκονται:

- μεγιστοποίηση εκμετάλλευσης παραγωγικών συντελεστών στα αγκυροβόλια
- υψηλό επίπεδο εκμετάλλευσης αγκυροβολίων
- βελτιωμένος σχεδιασμός λιμενικών λειτουργιών

Επίτευξη αυτών των στόχων συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος παραγωγής και τελικά, οδηγεί το λιμένα σε εκμετάλλευση οικονομιών κλίμακας. Αντίθετα, η μη επίτευξή τους, δηλαδή η ύπαρξη πλεονάζοντων παραγωγικών συντελεστών, χαμηλού επιπέδου εκμετάλλευσης αγκυροβολίων ή κακού σχεδιασμού των λιμενικών δραστηριοτήτων οδηγούν σε υψηλότερη τιμολόγηση των υπηρεσιών και τελικά, σε μειωμένη προσέλευση πλοίων και συρρίκνωση της οικονομίας του λιμένα (Alderton, 1995).

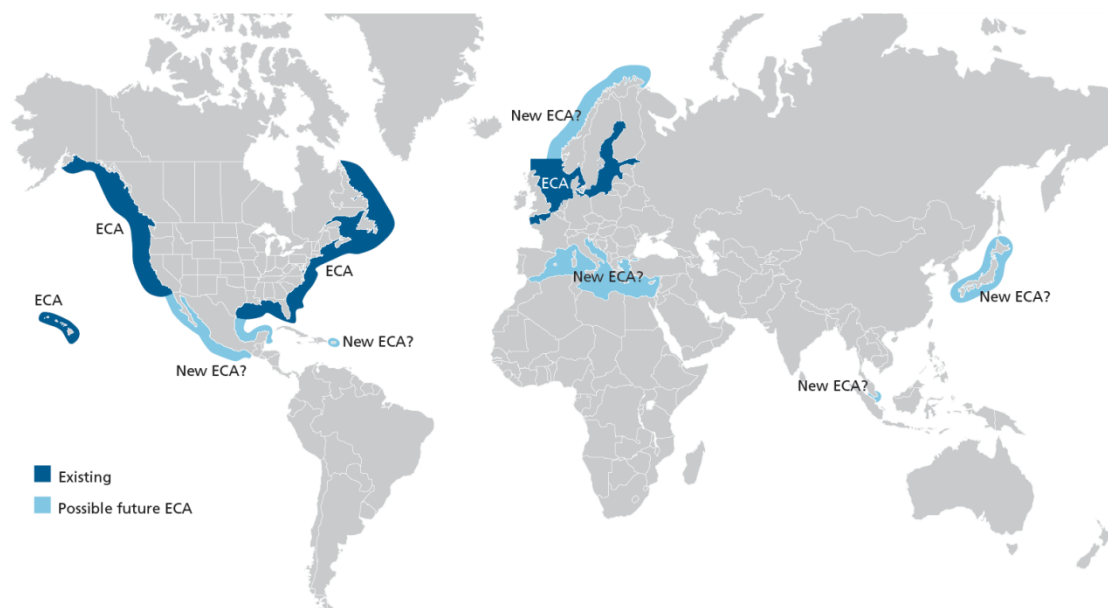
3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΤΙΣ ECA

Όπως γράφεται και στην ιστοσελίδα του IMO, (IMO, 2013a) η επιτροπή για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (MEPC- Marine Environment Protection Committee) ολοκλήρωσε την τροποποίηση των κανονισμών 13- περί εκπομπών οξειδίων του αζώτου από ναυτικούς κινητήρες- και 14- περί εκπομπών οξειδίων του θείου και εκπεμπομένων σωματιδίων (PM, particulate matters)- του παραρτήματος IV της σύμβασης MARPOL.

Οι τροποποιήσεις που προτάθηκαν και τέθηκαν σε ισχύ, αφορούν στα ανώτατα όρια εκπομπών αερίων ρύπων από ναυτικούς κινητήρες εντός ειδικά θεσμοθετημένων περιοχών (ECAs- Emission Control Areas), καθώς και εκτός αυτών. Ήδη θεσμοθετημένες περιοχές ECAs είναι:

- η Βαλτική Θάλασσα
- η Βόρεια Θάλασσα
- η θάλασσα στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής
- η Καραϊβική θάλασσα

Οι ήδη θεσπισμένες ECAs, καθώς και αυτές που συζητάται να θεσμοθετηθούν στο άμεσο μέλλον, παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Υπάρχουσες και πιθανές περιοχές ελέγχου εκπεμπόμενων ρύπων (ECAs)

Οι ECAs θεσπίζονται κατόπιν συμφωνίας των ενδιαφερόμενων εθνικών κυβερνήσεων και του IMO. Σε κάποια ECA, μπορεί να ελέγχονται οι εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και δημιουργούμενων αερίων σωματιδίων (PM, particulate matters), ή και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x). Η Βαλτική και η Βόρεια Θάλασσα ονομάζονται και SECAs (Sulphur Emission Control Areas) αφού επιβάλλουν έλεγχο μόνο στις εκπομπές οξειδίων του θείου.

3.2.1 Ο ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ 14- ΠΕΡΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ

Όσον αφορά τις εκπομπές οξειδίων του θείου (particulate matters), ο IMO καθορίζει με τον κανονισμό 14 (regulation 14) το ανώτατο όριο ποσοστού θείου στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Η χρονική κλιμάκωση των ανώτατων ορίων περιεκτικότητας θείου στο καύσιμο- περιεκτικότητα βάρος κατά βάρος- εντός και εκτός ECAs παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ανώτατα όρια κατά βάρους περιεκτικότητας θείου στο καύσιμο [IMO, 2013b]

	Εκτός ECA	Εντός ECA
Πριν την 1η Ιουλίου 2010		1.50% m/m
Μετά την 1η Ιουλίου 2010		1.00% m/m
Πριν την 1η Ιανουαρίου 2012	4.50% m/m	
Μετά την 1η Ιανουαρίου 2012	3.50% m/m	
Μετά την 1η Ιανουαρίου 2015		0.10% m/m
Μετά την 1η Ιανουαρίου 2020	0.50% m/m*	

Η νέα μείωση του ποσοστού θείου στο καύσιμο εκτός ECAs, μετά την 1η Ιανουαρίου 2020, θα εξαρτηθεί από τη δυνατότητα διάθεσης τέτοιων καυσίμων από τις πετρελαϊκές εταιρείες. Το μέτρο θα συζητηθεί, εκ νέου, το 2018 και αν διαπιστωθεί αδυναμία διάθεσης επαρκών ποσοτήτων τέτοιων καυσίμων, από τις πετρελαϊκές εταιρείες, η εφαρμογή του θα μετατεθεί για το 2025 (IMO, 2013b).

Σύμφωνα με τον οδηγό που συνέγραψαν η fathom shipping και το lloyd's register (n.d.), ο σχηματισμός οξειδίων του θείου οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στο θείο που βρίσκεται στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Η μείωση της περιεκτικότητας του θείου στο καύσιμο επιφέρει, επίσης, μείωση των εκπεμπόμενων αιωρούμενων σωματιδίων (PM, particulate matters).

Πάντως, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί η μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου πέρα από τη μείωση του ποσοστού θείου στο καύσιμο. Αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως πρωτεύουσες (primary), όπου γίνεται προσπάθεια για αποτροπή της δημιουργίας του ρυπαντή, και σε δευτερεύουσες όπου η καταβαλλόμενη προσπάθεια επικεντρώνεται στη μη διάχυση του ρυπαντή στην ατμόσφαιρα. Η εφαρμογή μίας πρωτεύουσας ή δευτερεύουσας μεθόδου, αντί της χρήσης καυσίμου με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο, ή παράλληλα με αυτή, θα πρέπει να εγκρίνεται από τον εκάστοτε νηογνώμονα, ο οποίος θα ακολουθεί τις οδηγίες του IMO (IMO, 2013b).

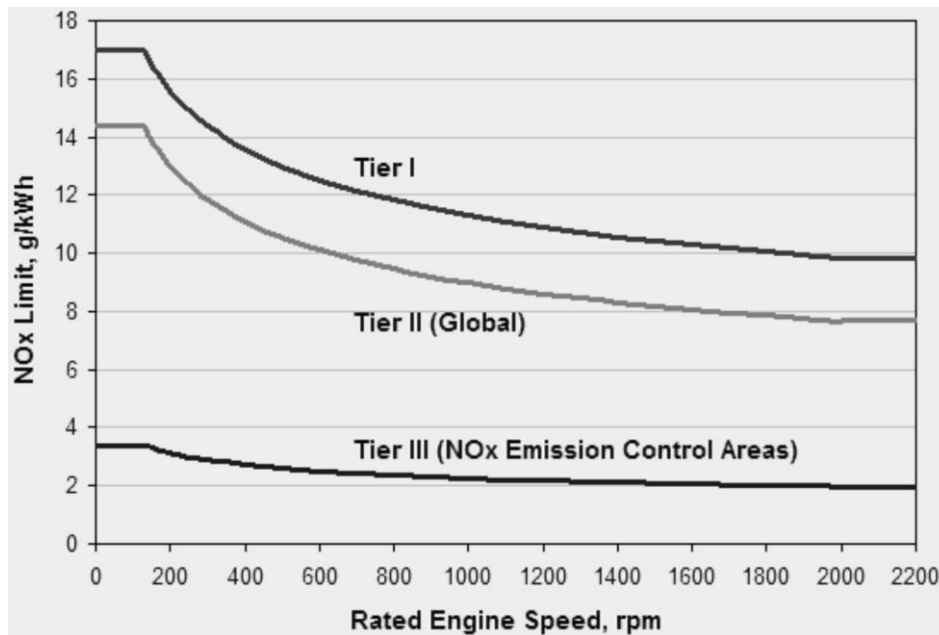
3.2.2 Ο ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ 13- ΠΕΡΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

Σύμφωνα με τον κανονισμό 13 (regulation 13) του IMO (2013c) ο έλεγχος των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου αφορά μηχανές μεγαλύτερες των 130 kW εγκατεστημένης ισχύος. Τα ανώτατα επιτρεπτά όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου ανά κύκλο λειτουργίας εξαρτώνται από τη χρονολογία κατασκευής της μηχανής και τον αριθμό στροφών στις οποίες λειτουργεί. Εξάλλου, με βάση αυτές τις παραμέτρους καθορίζονται τα επίπεδα (tiers) του κανονισμού, τα οποία και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ανώτατο όριο εκπομπής οξειδίων του αζώτου [IMO, 2013c]

Tier	Ημερομηνία κατασκευής πλοίου	Όριο εκπομπής οξειδίων του αζώτου σε ένα κύκλο της μηχανής (g/kWh)		
		$n < 130$	$n = 130$ – 1999	$n > = 2000$
I	μετά την 1/1/2000	17.0	$45 * n^{-0.2}$	9.8
II	μετά την 1/1/2011	14.4	$44 * n^{-0.23}$	7.7
III	μετά την 1/1/2021	3.4	$9 * n^{-0.2}$	2.0

Τα επίπεδα του κανονισμού, συναρτήσει των στροφών της μηχανής, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. Όταν εφαρμοστεί το tier III εντός ECAs, στις περιοχές εκτός ECA θα εφαρμόζεται το tier II (IMO, 2013c).



Εικόνα 4: Ανώτατα όρια εκπομπής οξειδίων του αζώτου σε ένα κύκλο της μηχανής (gr/kWh)

Το όριο εκπομπής οξειδίων του αζώτου, μετά την 1/1/2021, αρχικά ήταν προγραμματισμένο να ισχύσει από το 2016. Όμως, η πρόσφατη συζήτησή του μέτρου επέφερε αναβολή πέντε ετών στο μέτρο (Κυρτάτος, 2013).

Μηχανές, οι οποίες κατασκευάστηκαν από την 1η Ιανουαρίου 1990 μέχρι και την 31η Δεκεμβρίου 1999, με εκτόπισμα μεγαλύτερο των 90 λίτρων ανά κύλινδρο και ισχύ μεγαλύτερη των 5000 KW υποχρεούνται να τηρούν το επίπεδο I του κανονισμού (tier I), αν υπάρχει η δυνατότητα να γίνει αυτό με κάποια εγκεκριμένη, από τον IMO, αναβάθμιση (upgrade) [IMO, 2013c].

Επίσης, σύμφωνα με τον κανονισμό 13, μία μηχανή μπορεί να πιστοποιηθεί για τη συμμόρφωση ως προς τον κανονισμό, από ένα εμπειρογνώμονα ή την κατασκευάστρια εταιρεία μετά την εφαρμογή συγκεκριμένων εξετάσεων που έχει υποδείξει ο IMO. Αν η μηχανή αποτελεί ακριβές αντίγραφο πρότυπης μηχανής (Parent Engine), η οποία έχει ελεγχθεί επιτυχώς, δεν απαιτείται έλεγχος της αφού θεωρείται ότι τα αντίγραφα μίας μηχανής εκπέμπουν την ίδια ποσότητα οξειδίων αζώτου με την πρωτότυπη μηχανή. Η μηχανή- αντίγραφο θα πρέπει να χρησιμοποιεί ενδεδειγμένα ανταλλακτικά (Κυρτάτος, n.d.). Για κάθε μηχανή στο πλοίο, θα πρέπει να υπάρχει το διεθνές πιστοποιητικό αποτροπής αέριας ρύπανσης (EIAPP- Engine International Air Pollution Prevention Certificate) (IMO, 2013c).

3.2.3 Η ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΟΥ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Σύμφωνα με το Stenersen (2011), η καύση φυσικού υγροποιημένου αερίου (LNG) αφορά τόσο μετασκευές πλοίων (retrofits) όσο και κατασκευές νέων πλοίων. Μέσω αυτής, εκμηδενίζονται οι εκπομπές οξειδίων του θείου και αιωρούμενων

σωματιδίων, ενώ και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι μειωμένες. Ενδεικτικά, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου αναμένεται να είναι μειωμένες κατά 80% έως 90% σε σχέση με την καύση MDO (Lorenc, 2011) και κατά 20-30% σε σχέση με την καύση HFO (Stenersen, 2011). Σχεδόν όλοι οι κινητήρες που καίνε LNG ικανοποιούν τις απαιτήσεις του επιπέδου III (tier III) του κανονισμού περί εκπομπών οξειδίων του αζώτου χωρίς περαιτέρω διεργασία επί των καυσαερίων.

Σύμφωνα με τη Lorenc (2011), παράμετροι ιδιαίτερης σημασίας είναι:

- η βελτίωση της ποιότητας του καυσίμου (αριθμός MN)
- η διαθεσιμότητα καυσίμου με υψηλό αριθμό μεθανίων
- ο ανεφοδιασμός και η εν πλω αποθήκευση του καυσίμου
- η απλοποίηση του συστήματος καυσίμου
- η εκπαίδευση των ναυτικών

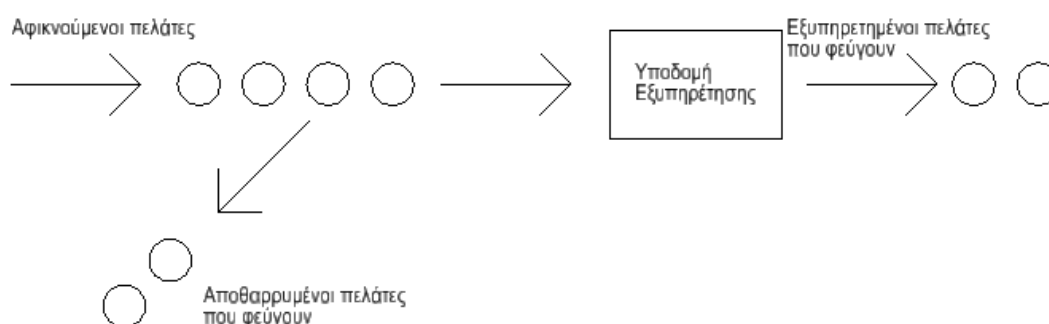
Για τον ανεφοδιασμό των πλοίων, μελετάται η δημιουργία δικτύου διανομής με τη χρήση μικρότερων σκαφών. Η κατασκευή της κατάλληλης υποδομής από τους λιμενικούς οργανισμούς θα πρέπει να συνοδεύει από τη δημιουργία αποτελεσματικής εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς παράμετροι ιδιαίτερης σημασίας είναι η διαθεσιμότητα καυσίμου με αρκετά καλή ποιότητα (υψηλός αριθμός MN του καυσίμου), και η δυνατότητα εν πλω ανεφοδιασμού και αποθήκευσης του καυσίμου.

4 ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Ο σταθμός ανεφοδιασμού του Οργανισμού Λιμένος Πειραιώς αποτελεί σύστημα αναμονής. Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύονται οι βασικές έννοιες και τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αναμονής.

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Ένα σύστημα αναμονής αποτελείται εν γένει, από την ουρά αναμονής και το σύστημα εξυπηρέτησης. Οι πελάτες του συστήματος φτάνουν για εξυπηρέτηση και αν δε βρουν άμεσα ελεύθερο κάποιο σταθμό εξυπηρέτησης περιμένουν στην ουρά αναμονής, μέχρι να υπάρξει διαθέσιμος σταθμός εξυπηρέτησης. Μετά το πέρας της εξυπηρέτησής τους αποχωρούν από το σύστημα αναμονής. Εναλλακτικά, κάποιος πελάτης μπορεί να αποχωρήσει από το σύστημα αναμονής, χωρίς να εξυπηρευτεί, μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος (reneging) ή χωρίς να ενταχθεί καθόλου στο σύστημα (balking) (Ξηροκώστας, 1991). Ένα σύστημα αναμονής με αποχώρηση πελατών, μετά την ένταξή τους στην ουρά, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Σύστημα αναμονής με αποχώρηση πελατών

Η εξυπηρέτηση των πελατών μπορεί να γίνει με μετακίνηση τους στο σταθμό εξυπηρέτησης ή με μετακίνηση του σταθμού εξυπηρέτησης προς τον πελάτη.

4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΟΥΡΩΝ

4.2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΦΙΞΗΣ ΠΕΛΑΤΩΝ

Η διαδικασία αφίξεων πελατών αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο φθάνουν οι πελάτες στο σύστημα. Οι αφίξεις μπορεί να είναι:

- Σταθερές, αν το σύστημα αναμονής χαρακτηρίζεται από σταθερό ρυθμό άφιξης των πελατών- το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών αφίξεων είναι σταθερό

- Τυχαίες και ο αριθμός τους στη μονάδα του χρόνου να ακολουθεί την πιθανοτική κατανομή Poisson - για αυτό το είδος αφίξεων έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα ουρών (μοντέλα Poisson)
- Τυχαίες και ο αριθμός τους στη μονάδα του χρόνου να ακολουθεί κάποια άλλη πιθανοτική κατανομή
- Τυχαίες και ο αριθμός τους στη μονάδα του χρόνου να μην ακολουθεί κάποια πιθανοτική κατανομή

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες περιπτώσεις αφίξεων, σύμφωνα με τον Κωσταρά (2012), είναι:

- Οι καθυστερημένες άφιξεις πελατών
- Οι χονδρικές αφίξεις πελατών (bulk arrivals- άφιξη των πελατών κατά ομάδες)
- Η μη προσχώρηση κάποιου πελάτη στην ουρά αναμονής όταν αυτή είναι μεγάλη (balking)
- Η προσχώρηση κάποιου πελάτη στην ουρά αναμονής, αλλά αποχώρηση του μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος (reneging).

4.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΠΕΛΑΤΩΝ

Αντίστοιχα με τη διαδικασία άφιξης πελατών, οι εξυπηρετήσεις μπορεί να είναι:

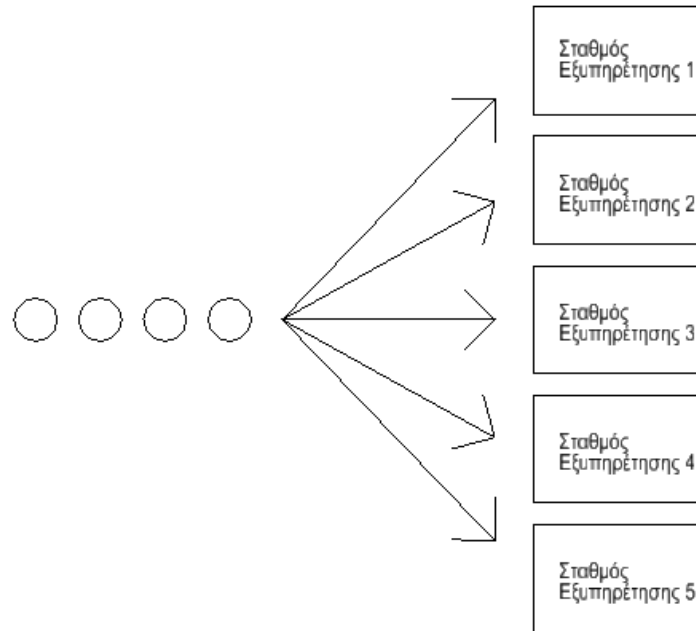
- Σταθερές, αν το σύστημα αναμονής χαρακτηρίζεται από σταθερό ρυθμό εξυπηρετήσεως των πελατών- το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών εξυπηρετήσεων είναι σταθερό
- Τυχαίες και ο αριθμός τους στη μονάδα του χρόνου να ακολουθεί την πιθανοτική κατανομή Poisson
- Τυχαίες και ο αριθμός τους στη μονάδα του χρόνου να ακολουθεί κάποια άλλη πιθανοτική κατανομή
- Τυχαίες και ο αριθμός τους στη μονάδα του χρόνου να μην ακολουθεί κάποια πιθανοτική κατανομή

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες περιπτώσεις εξυπηρετήσεων, σύμφωνα με τον Κωσταρά (2012), είναι:

- Η παράλληλη εξυπηρέτηση πολλών πελατών από ένα σταθμό εξυπηρέτησης, όπως στην περίπτωση ενός υπολογιστή με παράλληλη επεξεργασία
- Η εξάρτηση της ταχύτητας εξυπηρέτησης από το μέγεθος της σειράς αναμονής- ένας εξυπηρετητής μπορεί να δουλεύει με μεγαλύτερη ή μικρότερη ταχύτητα όταν η ουρά μεγαλώνει (state-dependent service) ή όχι (steady-state service)
- Η εξάρτηση της ταχύτητας εξυπηρέτησης από το χρόνο- συνήθως, μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος, ο σταθμός εξυπηρέτησης θα δουλεύει γρηγορότερα ως αποτέλεσμα της απόκτησης εμπειρίας από το ανθρώπινο δυναμικό που εμπλέκεται στην εξυπηρέτηση (Κωσταράς, 2012).

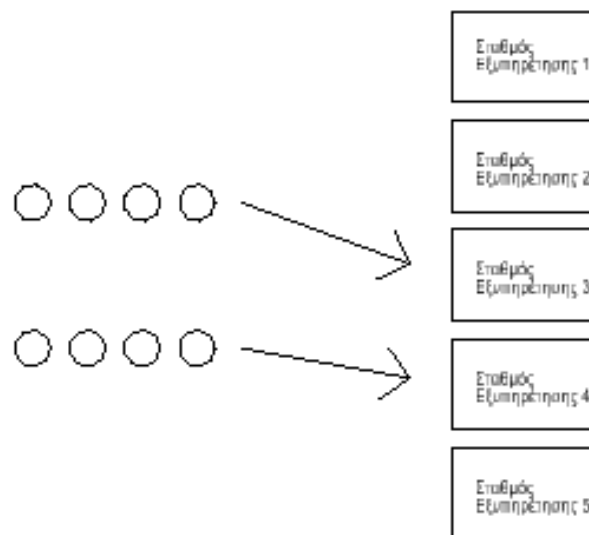
4.2.3 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Ένα σύστημα εξυπηρέτησης μπορεί να αποτελείται από έναν ή περισσότερους παράλληλους σταθμούς εξυπηρέτησης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



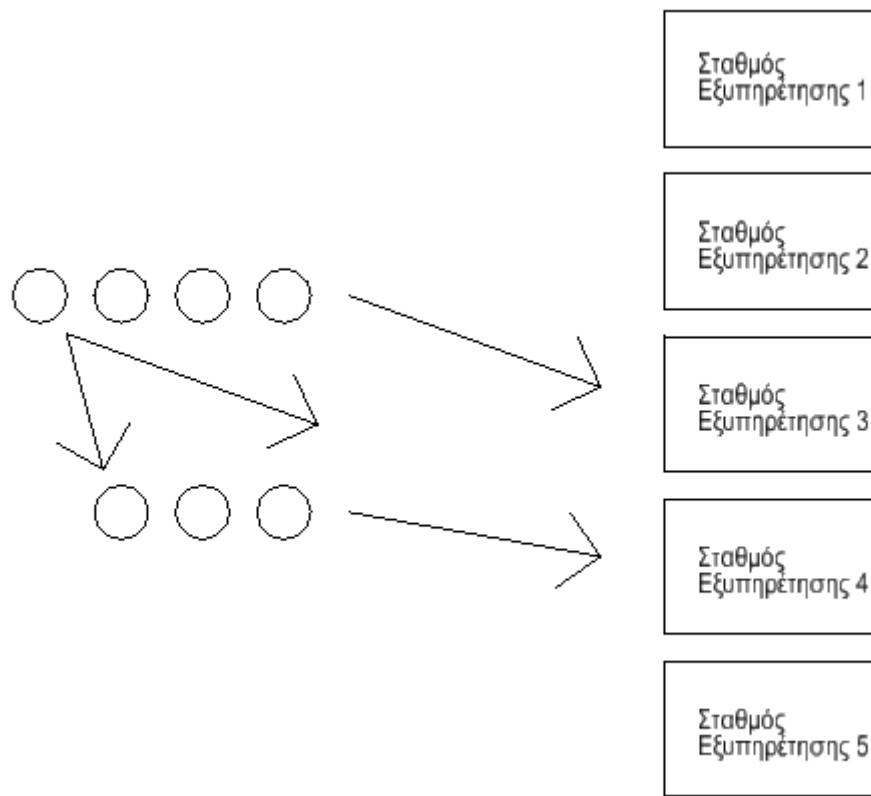
Εικόνα 6: Σύστημα αναμονής με παράλληλους σταθμούς εξυπηρέτησης

Οι παράλληλοι σταθμοί εξυπηρέτησης μπορεί να τροφοδοτούνται από μία ή περισσότερες ουρές αναμονής, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Σύστημα αναμονής με πολλές ουρές αναμονής

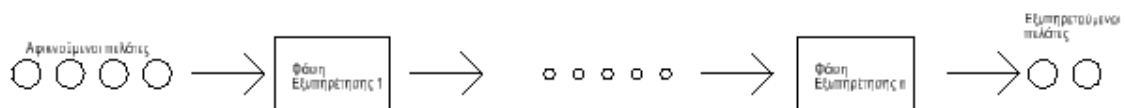
Επίσης, μπορεί να επιτρέπεται η να μην επιτρέπεται η μετακίνηση των πελατών από τη μία ουρά στην άλλη, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Σύστημα αναμονής, με επιτρεπτή μετακίνηση πελάτη από μία ουρά αναμονής σε άλλη

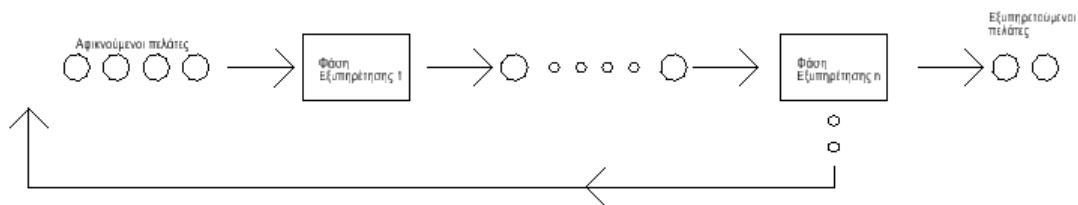
4.2.4 ΦΑΣΕΙΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Σε ένα σύστημα αναμονής, είναι πιθανό ένας πελάτης να πρέπει να περάσει από περισσότερους από ένα σταθμούς εξυπηρέτησης προκειμένου να τελειώσει η εξυπηρέτησή του (Κωσταράς, 2012). Για παράδειγμα, ένας ασθενής σε μία κλινική, ίσως πρέπει να περάσει από διάφορα δωμάτια εξέτασης πριν ολοκληρωθεί η εξυπηρέτησή του στην κλινική. Ένα σύστημα αναμονής με πολλές φάσεις εξυπηρέτησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.



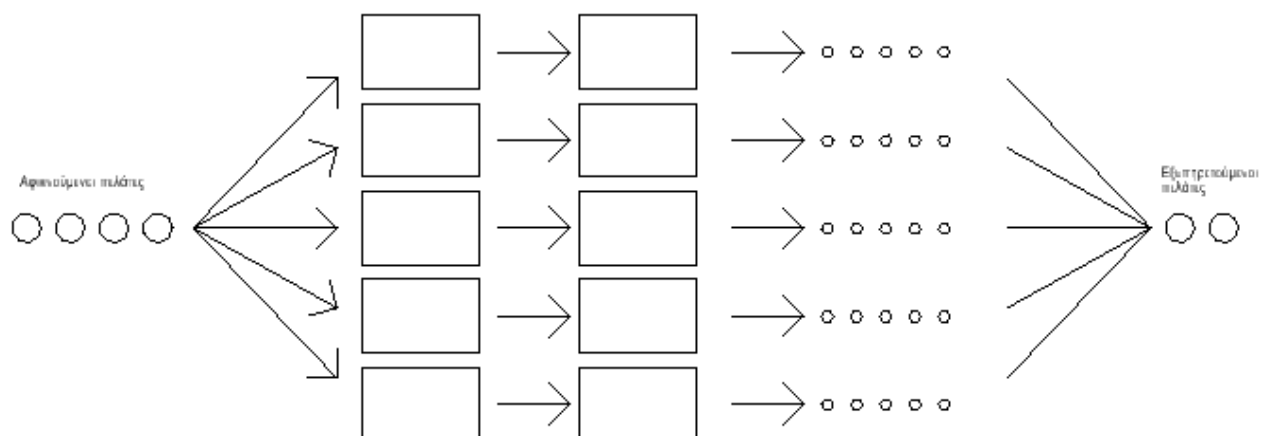
Εικόνα 9: Σύστημα αναμονής πολλών φάσεων εξυπηρέτησης

Σε μερικές πολυφασικές διαδικασίες μπορούμε να έχουμε ανακύκλωση ή ανατροφοδότηση. Σύμφωνα με τον Κωσταρά (2012), η ανακύκλωση είναι συχνό φαινόμενο στην βιομηχανία, όπου μετά από ποιοτικούς ελέγχους τα ελαττωματικά κομμάτια στέλνονται πίσω στα προηγούμενα στάδια παραγωγής για να επεξεργαστούν ξανά, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Σύστημα αναμονής με ανατροφοδότηση

Τελικά, μπορεί να διαμορφωθούν και δίκτυα σειρών αναμονής, δίκτυα δηλαδή τόσο με παράλληλους όσο και με εν σειρά σταθμούς εξυπηρέτησης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Σύστημα αναμονής με πολλαπλούς σταθμούς εξυπηρέτησης και πολλές φάσεις εξυπηρέτησης

4.2.5 ΝΟΜΟΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΕΩΣ ΠΕΛΑΤΩΝ

Ο νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησεων των πελατών είναι ο τρόπος, με τον οποίο επιλέγονται οι πελάτες όταν σχηματιστεί μία ουρά αναμονής. Σύνηθεις κανόνες προτεραιότητας, σύμφωνα με τον Ξηροκόστα (1991) είναι:

- FCFS (First Come First Served) κανόνας προτεραιότητας- ο πρώτος αφικνούμενος εξυπηρετείται πρώτος
- LCFS (Last In First Served) κανόνας προτεραιότητας- ο τελευταίος αφικνούμενος εξυπηρετείται πρώτος

- SIRO (Service In Random Order) κανόνας προτεραιότητας- η σειρά εξυπηρέτησης είναι τυχαία και ανεξάρτητη του χρόνου αφίξεως του πελάτη. Συναντάται και ως ROS (Random Order of Service).
- Εξυπηρέτηση με βάση κάποιο νόμο προτεραιότητας (Priority Selection Rules), όπου κάποιες κατηγορίες πελατών έχουν προτεραιότητα από άλλες κατηγορίες, που ήδη έχουν ενταχθεί στην ουρά αναμονής. Δύο χαρακτηριστικές τέτοιες περιπτώσεις είναι:
 - προτεραιότητα με διακοπή (preemptive)- ο πελάτης με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα εξυπηρετείται ακόμα και αν έχει ήδη αρχίσει η εξυπηρέτηση του πελάτη με τη μικρότερη προτεραιότητα. Ο πελάτης με τη μικρότερη προτεραιότητα παραμερίζεται προσωρινά και η εξυπηρέτησή του συνεχίζεται μετά την εξυπηρέτηση του πελάτη με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα ή επανεκκινείται.
 - προτεραιότητα χωρίς διακοπή (non preemptive)- ο πελάτης με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα μετακινείται στην κεφαλή της ουράς αναμονής, αλλά δεν εξυπηρετείται μέχρι να τελειώσει η εξυπηρέτηση του πελάτη μικρότερης προτεραιότητας.

4.2.6 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τον Κωσταρά (2012), σε κάποιες ουρές αναμονής, ο πελάτης εξαναγκάζεται να αποχωρήσει αν το μέγεθος της ουράς φτάσει κάποιο προκαθορισμένο όριο. Αυτό το όριο επιβάλλεται συνήθως, λόγω φυσικών περιορισμών ως προς το μέγεθος της ουράς, και νέοι πελάτες δε γίνονται δεκτοί στο σύστημα μέχρι τη μερική αποσυμφόρησή του. Τα αντίστοιχα συστήματα αναμονής αναφέρονται ως συστήματα αναμονής με περιορισμένο χώρο αναμονής.

4.3 ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Ο Kendall εισήγαγε το συμβολισμό (a/b/c) για το συμβολισμό συστημάτων αναμονής. Τα γράμματα a και b παριστάνουν την κατανομή αφίξεων και εξυπηρετήσεων αντίστοιχα, ενώ το γράμμα c παριστάνει τον αριθμό των παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης (Ξηροκώστας, 1991).

Τα a και b αντικαθιστώνται από τους συμβολισμούς:

- M, αν η κατανομή των αφίξεων ή των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθεί εκθετική κατανομή Poisson - το γράμμα M προέρχεται από το γεγονός ότι αυτές οι ουρές έχουν απώλεια μνήμης, ή την ιδιότητα Markov σύμφωνα με την οποία:

$$P(t > T + S | t > S) = P(t > T)$$

- D, αν η κατανομή των αφίξεων ή των εξυπηρετήσεων, στη μονάδα του χρόνου, έχει μία σταθερή τιμή- οι αφίξεις ή οι εξυπηρετήσεις συμβαίνουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα

- E_k , για κατανομή Erlang με παράμετρο k μεταξύ διαδοχικών αφίξεων ή εξυπηρετήσεων
- H_k , για υπερεκθετική κατανομή με παράμετρο k μεταξύ διαδοχικών αφίξεων ή εξυπηρετήσεων
- GI, για γενική κατανομή χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων, με την προϋπόθεση ότι αυτές είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες
- G, για γενική κατανομή χρόνων μεταξύ διαδοχικών εξυπηρετήσεων, με την προϋπόθεση ότι αυτές είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες

Το γράμμα c αντικαθίσταται από τον αριθμό των παράλληλων σταθμών εξυπηρετήσεων.

Το 1966, ο A.M. Lee εμπλούτισε τη συμβολική παράσταση των συστημάτων αναμονής με δύο ακόμα γράμματα, τα d και e . Το d αναπαριστά το νόμο προτεραιότητας εξυπηρέτησης πελατών ενώ το e αναπαριστά τη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος, έστω N .

Το 1968, ο Taha εισήγαγε το γράμμα f , το οποίο αναπαριστά το μέγεθος της πηγής προελεύσεως πελατών, έστω N .

Η πλήρης συμβολική παράσταση των συστημάτων αναμονής, είναι τελικά $(a/b/c):(d/e/f)$. Τα σύμβολα και οι τιμές που μπορούν να λάβουν συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

Σύμβολο	Επεξήγηση	Πιθανές τιμές
a	Κατανομή αφίξεων	M, D, E_k , H_k , G, GI, ..
b	Κατανομή εξυπηρετήσεων	M, D, E_k , H_k , G, GI, ..
c	Αριθμός παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης	1, 2, .., ∞
d	Νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησης πελατών	FCFS, LCFS, SIRO, PRI, ..
e	Μέγιστη χωρητικότητα συστήματος	1, 2, .., ∞
f	Μέγεθος πηγής προελεύσεως πελατών	1, 2, .., ∞

Πίνακας 3: Χρησιμοποιούμενα σύμβολα για την παράσταση συστημάτων αναμονής

Ο συμβολισμός, αν και αρκετά χρήσιμος για τα βασικά μοντέλα αναμονής, δε μπορεί να αναπαραστήσει συνθετότερα μοντέλα, όπως είναι τα συστήματα αναμονής με πολλούς σταθμούς εξυπηρέτησης εν σειρά, η μη προσχώρηση στην ουρά όταν αυτή είναι αρκετά μεγάλη (balking) ή η αποχώρηση από αυτή (reneging). (Ξηροκώστας, 1991).

4.4.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Σύμφωνα με τον Ξηροκώστα (1991), οι κυριότερες συνιστώσες του κόστους, που σχετίζονται με το σύστημα αναμονής, όταν αυτό μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά είναι:

- C_s , το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος εξυπηρέτησεως ανά μονάδα χρόνου
- C_α , το μέσο μεταβλητό κόστος ανά εξυπηρέτηση
- C_w , το μέσο κόστος παραμονής πελάτη στο σύστημα αναμονής ανά μονάδα χρόνου
- C_r , το μέσο κόστος αποχωρήσεως πελάτη χωρίς να εξυπηρευθεί
- R , η μέση χρηματική είσπραξη ανά εξυπηρέτηση
- W_s , ο μέσος χρόνος παραμονής πελάτη στο σύστημα αναμονής

Αν υποθεθεί ότι λ είναι ο αριθμός πελατών που εισέρχονται στο σύστημα αναμονής ανά μονάδα χρόνου, και κανένας από αυτούς δεν αποχωρεί, όσο και αν χρειαστεί να αναμένει, το ανά μονάδα χρόνου κόστος παροχής εξυπηρέτησεων είναι:

$$C_H = \lambda C_\alpha + C_s + C_w \lambda W_s$$

Αν υπάρξουν αποχωρήσεις από το σύστημα αναμονής θα πρέπει να συνυπολογιστεί το κόστος αποχωρήσεως ενός πελάτη από το σύστημα αναμονής. Έστω λ , ο αριθμός πελατών που εισέρχονται στο σύστημα αναμονής ανά μονάδα χρόνου, $\lambda_{εξυπ}$, ο αριθμός εξυπηρετούμενων πελατών ανά μονάδα χρόνου και $\lambda_{αποχ}$, ο αριθμός αποχωρησάντων πελατών ανά μονάδα χρόνου, το ανά μονάδα χρόνου κόστος παροχής εξυπηρέτησεων θα είναι:

$$C_H = \lambda_{εξυπ} C_\alpha + C_s + C_w \lambda W_s + \lambda_{αποχ} C_r, \quad \lambda = \lambda_{εξυπ} + \lambda_{αποχ}$$

Αν συνυπολογίζεται το οικονομικό όφελος από την εξυπηρέτηση των πελατών, το μέσο ανά μονάδα χρόνου καθαρό κέρδος θα είναι:

$$G_H = \lambda_{εξυπ} R - C_H$$

Το συνολικό κόστος μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα:

- του κόστους προσφοράς της υπηρεσίας, και
- του κόστους της καθυστέρησης όσον αφορά την προσφορά της υπηρεσίας στον πελάτη

Αν ως μ συμβολιστεί το επίπεδο εξυπηρέτησης και συμβολιστούν ως:

- ETC, το αναμενόμενο συνολικό κόστος ανά μονάδα χρόνου
- EOC, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του συστήματος ανά μονάδα χρόνου

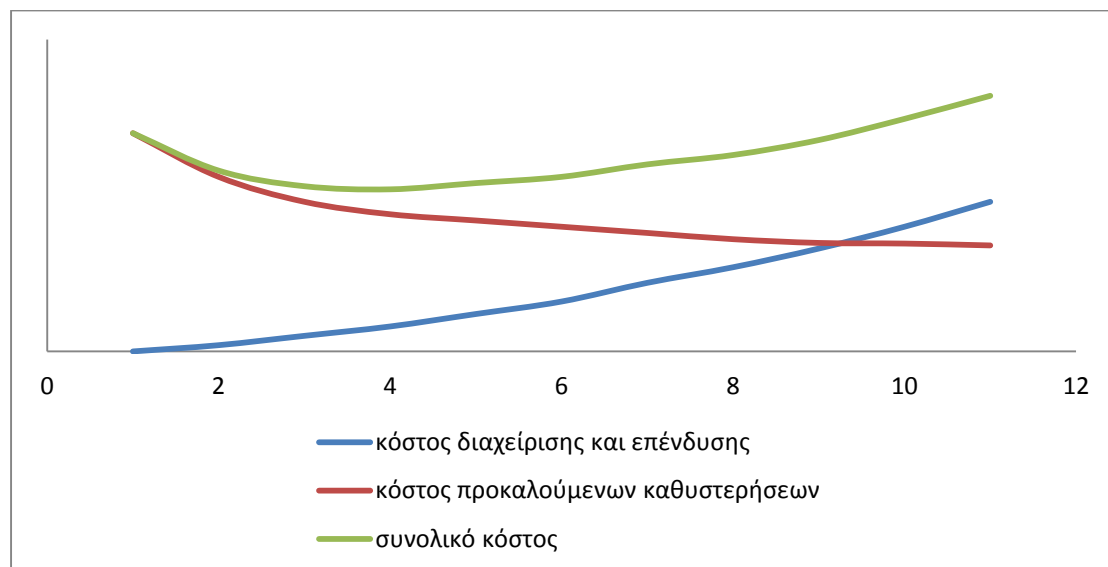
- EWC, το αναμενόμενο κόστος αναμονής ανά μονάδα χρόνου

μπορεί να γραφεί ότι:

$$ETC(\mu) = EOC(\mu) + EWC(\mu)$$

Εν γένει, μία αύξηση στη μία συνιστώσα του κόστους συνεπάγεται μείωση στην άλλη. Αν μειωθεί το κόστος λειτουργίας ανά μονάδα χρόνου, αναμένεται να δημιουργούνται μεγαλύτερες ουρές αναμονής και συνεπώς, μεγαλύτερο κόστος αναμονής για τους πελάτες του συστήματος ενώ ένα υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης πελατών συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας ανά μονάδα χρόνου. Τελικά, επιδιώκεται εκείνο το επίπεδο εξυπηρέτησης, για το οποίο ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος (Ξηροκώστας, 1991).

Οι επιμέρους συνιστώσες του κόστους, αλλά και το συνολικό κόστος θα μπορούσαν να αναπαραστηθούν με ένα γράφημα σαν αυτό της Εικόνας 12.



Εικόνα 12: Κόστος συστήματος αναμονής (Ξηροκώστας, 1991)

4.4.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Το κόστος χρόνου παραμονής ενός πελάτη στο σύστημα αναμονής είναι εν γένει, δύσκολο να υπολογιστεί άμεσα. Ωστόσο, για μία ορθολογική αντιμετώπιση του προβλήματος, θα πρέπει να εκτιμηθεί είτε άμεσα είτε έμμεσα με τη χρήση δεικτών απόδοσης, όπως είναι η απώλεια πελατών που δεν εξυπηρετήθηκαν, είτε λόγω μικρού χώρου αναμονής είτε λόγω μεγάλου χρόνου παραμονής στην ουρά αναμονής με αποτέλεσμα τη διαφυγή κερδών (Ξηροκώστας 1991).

Έτσι, συμπεράσματα για την απόδοση του συστήματος αναμονής μπορούν να εξαχθούν με τη χρήση δεικτών απόδοσης, όπως είναι:

- Μετρικές χρόνου αναμονής για εξυπηρέτηση
 - Μέσος χρόνος παραμονής πελάτη στο σύστημα, W_s
 - Μέγιστος χρόνος παραμονής πελάτη στο σύστημα

- Μετρικές συσσώρευσης πελατών
 - Αριθμός πελατών στην ουρά αναμονής, L_q
 - Αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής, L_s
- Μετρικές χρόνου αδρανείας εξυπηρετητών
 - Μέση διάρκεια αργίας σταθμών εξυπηρετήσεως
 - Μέση διάρκεια συνεχούς απασχολήσεως των σταθμών εξυπηρετήσεως
- Μετρικές μη εξυπηρετούμενων πελατών
 - Ποσοστό πελατών που χάνονται λόγω περιορισμένου χώρου αναμονής
 - Πιθανότητα κάποιος πελάτης να μην ενταχθεί καθόλου στην ουρά αναμονής

4.5 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Σκοπός της μελέτης κάθε συστήματος αναμονής είναι η βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας τους με κατάλληλες τροποποιήσεις στα χαρακτηριστικά τους (Ξηροκώστας, 1991). Οι τροποποιήσεις αυτές μπορεί να αφορούν:

- την κατανομή αφίξεων
 - τροποποίηση του ολικού μέσου ρυθμού αφίξεων, για παράδειγμα με αποκλεισμό από την εξυπηρέτηση ορισμένων κατηγοριών πελατών
 - έλεγχος των χρόνων αφίξεων πελατών με καθιέρωση συστήματος ραντεβού (προγραμματισμός αφίξεων)
 - εξομάλυνση των συστηματικών διακυμάνσεων του ρυθμού αφίξεων χωρίς επιβολή πλήρους ελέγχου του χρόνου αφίξεως (πχ ενημέρωση των πελατών να αποφεύγουν τις ώρες αιχμής)
- το σύστημα εξυπηρετήσεως
 - μείωση του χρόνου εξυπηρετήσεως, για παράδειγμα με βελτίωση του τεχνικού εξοπλισμού, της οργανώσεως των διαδικασιών ή της εκπαιδεύσεως των υπαλλήλων εξυπηρετήσεως
 - περιορισμός του συντελεστή μεταβλητότητας του χρόνου εξυπηρετήσεως, για παράδειγμα με εκπαίδευση των υπαλλήλων εξυπηρετήσεως
 - μεταβολή της ικανότητας του συστήματος με αύξηση των παράλληλων σταθμών εξυπηρετήσεως
 - αύξηση της διαθεσιμότητας του συστήματος εξυπηρετήσεως στις ώρες αιχμής
 - αύξηση της ικανότητας του συστήματος ή μείωση του χρόνου εξυπηρετήσεως κατά την περίοδο αιχμής

- το νόμο επιλογής πελατών
 - παραχώρηση προτεραιότητας σε πελάτες με υψηλό κόστος ανά μονάδα χρόνου αναμονής
 - παραχώρηση προτεραιότητας σε πελάτες με μικρό εκτιμώμενο χρόνο εξυπηρέτησεως.

5 ΠΟΣΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Σύμφωνα με τον Κωσταρά (2012), η δουλειά ενός αναλυτή ουρών χωρίζεται σε δύο σκέλη. Στο να καθορίσει τις τιμές των κατάλληλων μέτρων αποτελεσματικότητας για μια δεδομένη διαδικασία και στο να σχεδιάσει ένα βέλτιστο σύστημα, σύμφωνα πάντα με ένα κριτήριο. Ο καθορισμός των μέτρων αποτελεσματικότητας, όπως είναι οι χρόνοι αναμονής και τα μήκη ουρών μπορεί να γίνει μέσω του συσχετισμού τους με τις δεδομένες τιμές για τους χρόνους αφίξεων και εξυπηρετήσεων, ενώ για τη βελτιστοποίηση του συστήματος απαιτείται η εξισορρόπηση των χρόνων αναμονής των πελατών και του χρόνου αδρανείας των σταθμών εξυπηρέτησης, ώστε να βελτιστοποιείται κάποια καθορισμένη συνάρτηση κόστους. Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύονται δύο ποσοτικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση συστημάτων αναμονής: τα μοντέλα ουρών Poisson και η προσομοίωση Monte Carlo.

5.1 ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Ο Little συσχέτισε το μέσο χρόνο αναμονής στην ουρά και στο σύστημα αναμονής, W_q και W_s αντίστοιχα, με τον αριθμό πελατών στην ουρά αναμονής και στο σύστημα L_q και L_s αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας το ρυθμό άφιξης πελατών, λ . Συγκεκριμένα, διετύπωσε τις εξισώσεις:

- $W_q = \lambda L_q$
- $W_s = \lambda L_s$

Οι δύο αυτές εξισώσεις ονομάζονται και εξισώσεις του Little (Little's formulae).

Ακόμα, διατυπώθηκαν:

- το επιχείρημα αναμενόμενης τιμής:

$$W_s = W_q + 1/\mu$$

όπου μ , ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης.

- ο αναμενόμενος αριθμός πελατών σε εξυπηρέτηση:

$$\rho = \lambda/\mu$$

- ο αναμενόμενος αριθμός πελατών στο σύστημα:

$$L_s = L_q + \rho$$

Όμως, οι πελάτες φτάνουν και αναχωρούν σε μη κανονικά διαστήματα. Έτσι το μήκος της ουράς δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο εκτός αν οι αφίξεις και οι αναχωρήσεις είναι ντετερμινιστικές. Προκύπτει, δηλαδή, πως η κατανομή πιθανότητας για τα μήκη των ουρών είναι συνάρτηση δύο διαφορετικών διαδικασιών: των αφίξεων και των αναχωρήσεων, για τις οποίες γενικά υποθέτουμε πως είναι αμοιβαία ανεξάρτητες (Κωσταράς, 2012).

5.2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΝΝΗΣΕΩΝ- ΘΑΝΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τον Ξηροκώστα (1991), τα περισσότερα από τα πιο απλά μοντέλα ουρών αναμονής επαληθεύουν την υπόθεση ότι οι αφίξεις και οι εξυπηρετήσεις συμβαίνουν σύμφωνα με τη διαδικασία γεννήσεων- θανάτων, σύμφωνα με την οποία οι γεννήσεις και οι θάνατοι συμβαίνουν κατά εντελώς τυχαίο τρόπο και ο μέσος ρυθμός τους εξαρτάται μόνο από τον αριθμό πελατών στο σύστημα αναμονής. Ως γέννηση αναφέρεται η άφιξη στο σύστημα αναμονής, ενώ ως θάνατος αναφέρεται η αποχώρηση από αυτό.

Παραδοχή γεννήσεων

Σύμφωνα με την παραδοχή γεννήσεων, αν ένα σύστημα αναμονής τη χρονική στιγμή t , βρίσκεται στην κατάσταση $N(t) = n - 1$, η πιθανότητα να συμβεί ακριβώς μία άφιξη (γέννηση) στο σύστημα κατά το χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$ είναι $P_n(t + \Delta t) = P_{n-1}(t)[\lambda_{n-1}\Delta t + o(\Delta t)]$. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του συστήματος $N(t) = n - 1$ και δεν εξαρτάται από το ιστορικό αφίξεων, δηλαδή από το χρόνο που παρήλθε από την τελευταία άφιξη.

Παραδοχή θανάτων

Σύμφωνα με την παραδοχή θανάτων, αν ένα σύστημα αναμονής τη χρονική στιγμή t , βρίσκεται στην κατάσταση $N(t) = n + 1$, η πιθανότητα να συμβεί ακριβώς μία αποχώρηση (θάνατος) στο σύστημα κατά το χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$ είναι $P_n(t + \Delta t) = P_{n+1}(t)[\mu_{n+1}\Delta t + o(\Delta t)]$. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του συστήματος $N(t) = n + 1$ και δεν εξαρτάται από το χρόνο που έχει παρέλθει από την έναρξη της τελευταίας εξυπηρετήσεως πελάτη.

Παραδοχή πολλαπλών ενδεχομένων

Αν ένα σύστημα αναμονής τη χρονική στιγμή t , βρίσκεται στην κατάσταση $N(t) = n$, η πιθανότητα το άθροισμα των αφίξεων και εξυπηρετήσεων να υπερβαίνει τη μονά στο χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$ είναι $P_{n \neq n}(t + \Delta t) = o(\Delta t)$.

Τέλος, η πιθανότητα στο χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$ να μη συμβεί καμία άφιξη ή αποχώρηση, είναι ίση με $P_n(t + \Delta t) = P_n(t)[1 - \lambda_n\Delta t - \mu_n\Delta t + o(\Delta t)]$.

Εξίσωση ισορροπίας

Η πιθανότητα το σύστημα να μεταβεί το χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$ από τις καταστάσεις $n - 1, n, n + 1$ στην κατάσταση n είναι:

$$P_n(t + \Delta t) = P_{n-1}(t)[\lambda_{n-1}\Delta t + o(\Delta t)] + P_{n+1}(t)[\mu_{n+1}\Delta t + o(\Delta t)] + o(\Delta t) + o(\Delta t) + P_n(t)[1 - \lambda_n\Delta t - \mu_n\Delta t + o(\Delta t)] \rightarrow$$

$$P_n(t + \Delta t) \cong P_{n-1}(t)\lambda_{n-1}\Delta t + P_{n+1}(t)\mu_{n+1}\Delta t + P_n(t) - P_n(t)\lambda_n\Delta t - P_n(t)\mu_n\Delta t + o(\Delta t) \rightarrow$$

$$\frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = P_{n-1}(t)\lambda_{n-1} + P_{n+1}(t)\mu_{n+1} - P_n(t)\lambda_n - P_n(t)\mu_n + \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} \rightarrow$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} \cong P_{n-1}(t)\lambda_{n-1} + P_{n+1}(t)\mu_{n+1} - P_n(t)[\lambda_n + \mu_n]$$

Στη συμπεριφορά μόνιμης κατάστασης του συστήματος, θεωρείται $\frac{dP_n(t)}{dt} = 0$, δηλαδή θεωρείται ότι οι πιθανότητες αφίξεων και εξυπηρετήσεων ενός πελάτη σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα έχουν σταθεροποιηθεί. Προκύπτει:

$$P_{n-1}\lambda_{n-1} + P_{n+1}\mu_{n+1} = P_n[\lambda_n + \mu_n]$$

Η εξίσωση αυτή αναφέρεται και ως εξίσωση ισορροπίας.

Προκύπτουν:

- $n = 0 \rightarrow P_1\mu_1 = P_0[\lambda_0 + \mu_0]$
- $n = 1 \rightarrow P_0\lambda_0 + P_2\mu_2 = P_1[\lambda_1 + \mu_1]$

Αποδεικνύεται ότι:

$$P_n = \frac{\lambda_{n-1}\lambda_{n-2} \dots \lambda_0}{\mu_n\mu_{n-1}\mu_1} P_0$$

Επίσης, ισχύει:

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$$

Τελικά:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{n-1}\lambda_{n-2} \dots \lambda_0}{\mu_n\mu_{n-1}\mu_1}}$$

5.2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ POISSON ΑΠΛΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΤΗ

Το Μοντέλο (M/M/1):(GD/∞/∞)

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των αφίξεων και των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή Poisson, ενώ υπάρχει μόνο ένας σταθμός εξυπηρέτησης. Το σύστημα εξυπηρέτησης και η πηγή προέλευσης πελατών, έχουν άπειρη χωρητικότητα. Ισχύουν:

- $\lambda_n = \lambda$
- $\mu_n = \mu$
- $\lambda_{eff} = \lambda$
- $\lambda_{lost} = 0$

Προκύπτει:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{n-1}\lambda_{n-2}\dots\lambda_0}{\mu_n\mu_{n-1}\mu_1}} \rightarrow$$
$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{\mu^n}} \rightarrow P_0 = \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)} \rightarrow P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \rho$$

Και

$$P_n = \frac{\lambda_{n-1}\lambda_{n-2}\dots\lambda_0}{\mu_n\mu_{n-1}\mu_1} P_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 = \rho^n P_0 = (1 - \rho)\rho^n$$

Τα μέτρα απόδοσης:

- $L_s = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n (1 - \rho)\rho^n = (1 - \rho)\rho \frac{d}{d\rho} \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n \rightarrow$

$$L_s = (1 - \rho)\rho \frac{d}{d\rho} \left(\frac{1}{1 - \rho} \right) = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

- $W_s = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{1}{\mu(1 - \rho)} = \frac{1}{\mu - \lambda}$

- $W_q = W_s - \frac{1}{\mu}$

- $L_q = \lambda W_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$

- $\bar{s} = L_s - L_q = \rho$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με το μοντέλο Poisson (M/M/1):(GD/∞/∞) συνοψίζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/1):(GD/∞/∞)

λ_n	λ
μ_n	μ
λ_{eff}	λ
λ_{lost}	0
P_0	$1 - \rho$
P_n	$(1 - \rho)\rho^n$
W_s	$\frac{1}{\mu - \lambda}$
W_q	$W_s - \frac{1}{\mu}$
L_s	$\frac{\rho}{1 - \rho}$
L_q	$\frac{\rho^2}{1 - \rho}$
\bar{s}	$L_s - L_q$

Το Μοντέλο (M/M/1):(GD/N/∞)

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των αφίξεων και των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή Poisson, ενώ υπάρχει μόνο ένας σταθμός εξυπηρέτησης. Το σύστημα εξυπηρέτησης έχει χωρητικότητα N πελατών, ενώ η πηγή προέλευσης πελατών έχει άπειρη χωρητικότητα. Ισχύουν:

- $\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & n = 0, 1, \dots, N - 1 \\ 0, & n = N, N + 1, \dots \end{cases}$
- $\mu_n = \mu$
- $\lambda_{lost} = \lambda P_N$
- $\lambda_{eff} = \lambda - \lambda_{lost} = \lambda(1 - P_N)$

Είναι:

- $P_n = \begin{cases} \rho^n P_0, & n \leq N \\ 0, & n > N \end{cases}$

Αποδεικνύονται:

- $P_0 = \begin{cases} \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+1}}, & \rho \neq 1 \\ 0, & \rho = 1 \end{cases}$
- $P_n = \begin{cases} \frac{(1 - \rho)\rho^n}{1 - \rho^{N+1}}, & \rho \neq 1 \\ 0, & \rho = 1 \end{cases}$

Τα μέτρα απόδοσης:

$$\bullet L_s = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^n = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} \rho \frac{d}{d\rho} \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n = \frac{(1-\rho)\rho}{1-\rho^{N+1}} \frac{d}{d\rho} \left(\frac{1-\rho^{N+1}}{1-\rho} \right) \rightarrow$$

$$L_s = \frac{\rho[1 - (N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{N+1})}, \rho \neq 1$$

ή

$$\bullet L_s = \frac{N}{2}, \rho = 1$$

Επίσης:

$$\bullet W_s = \frac{L_s}{\lambda_{eff}} = \begin{cases} \frac{\rho[1-(N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{N+1})\lambda_{eff}}, & \rho \neq 1 \\ \frac{N}{2\lambda_{eff}}, & \rho = 1 \end{cases}$$

$$\bullet W_q = W_s - \frac{1}{\mu}$$

$$\bullet L_q = \lambda_{eff} W_q$$

$$\bullet \bar{s} = L_s - L_q$$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με το μοντέλο Poisson (M/M/1):(GD/N/∞) συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/1):(GD/N/∞)

λ_n	$\begin{cases} \lambda, & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & n = N, N+1, \dots \end{cases}$
μ_n	μ
λ_{eff}	$\lambda(1 - P_N)$
λ_{lost}	λP_N
P_0	$\begin{cases} \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}}, & \rho \neq 1 \\ 0, & \rho = 1 \end{cases}$
P_n	$\begin{cases} \rho^n P_0, & n \leq N \\ 0, & n > N \end{cases}$
W_s	$\begin{cases} \frac{\rho[1 - (N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{N+1})\lambda_{eff}}, & \rho \neq 1 \\ \frac{N}{2\lambda_{eff}}, & \rho = 1 \end{cases}$
W_q	$W_s - \frac{1}{\mu}$
L_s	$\begin{cases} \frac{\rho[1 - (N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{N+1})}, & \rho \neq 1 \\ \frac{N}{2}, & \rho = 1 \end{cases}$
L_q	$\lambda_{eff} W_q$
\bar{s}	$L_s - L_q$

Το Μοντέλο (M/M/1):(GD/∞/K)

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των αφίξεων και των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή Poisson, ενώ υπάρχει μόνο ένας σταθμός εξυπηρέτησης. Το σύστημα εξυπηρέτησης έχει άπειρη χωρητικότητα, ενώ η πηγή προέλευσης πελατών έχει μέγεθος K. Το σύστημα αναμονής προσομοιάζει στην περίπτωση, όπου K μηχανές περιμένουν να επισκευαστούν από ένα τεχνίτη. Ισχύουν:

- $\lambda_n = \begin{cases} \lambda(K - n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
- $\mu_n = \mu, n = 1, \dots, K$
- $\lambda_{eff} = \lambda$
- $\lambda_{lost} = 0$

Επίσης:

- $P_0 = [\sum_{n=0}^K \frac{K! \rho^n}{(K-n)!}]^{-1}$
- $P_n = \frac{K! \rho^n}{(K-n)!} P_0$

Τα μέτρα απόδοσης:

- $L_q = K - \frac{\lambda + \mu}{\lambda} (1 - P_0)$
- $L_s = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=1}^{\infty} (n - 1) P_n + \sum_{n=1}^{\infty} P_n = L_q + (1 - P_0) = K - \frac{\mu}{\lambda} (1 - P_0)$

Και:

- $W_s = \frac{L_s}{\lambda}$
- $W_q = W_s - \frac{1}{\mu}$
- $\bar{s} = L_s - L_q$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με το μοντέλο Poisson (M/M/1):(GD/∞/N) συνοψίζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/1):(GD/∞/N)

λ_n	$\begin{cases} \lambda(K - n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
μ_n	μ
λ_{eff}	λ
λ_{lost}	0
P_0	$[\sum_{n=0}^K \frac{K! \rho^n}{(K-n)!}]^{-1}$

P_n	$\frac{K! \rho^n}{(K-n)!} P_0$
W_s	$\frac{L_s}{\lambda}$
W_q	$W_s - \frac{1}{\mu}$
L_s	$K - \frac{\mu}{\lambda} (1 - P_0)$
L_q	$K - \frac{\lambda + \mu}{\lambda} (1 - P_0)$
\bar{s}	$L_s - L_q$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με τα μοντέλα Poisson με ένα σταθμό εξυπηρέτησης συνοψίζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλων Poisson με ένα εξυπηρετητή

	(M/M/1):(GD/∞/∞)	(M/M/1):(GD/N/∞)	(M/M/1):(GD/∞/N)
λ_n	λ	$\begin{cases} \lambda, & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & n = N, N+1, \dots \end{cases}$	$\begin{cases} \lambda(K-n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
μ_n	μ	μ	μ
λ_{eff}	λ	$\lambda(1 - P_N)$	λ
λ_{lost}	0	λP_N	0
P_0	$1 - \rho$	$\begin{cases} \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+1}}, & \rho \neq 1 \\ 0, & \rho = 1 \end{cases}$	$[\sum_{n=0}^K \frac{K! \rho^n}{(K-n)!}]^{-1}$
P_n	$(1 - \rho)\rho^n$	$\begin{cases} \rho^n P_0, & n \leq N \\ 0, & n > N \end{cases}$	$\frac{K! \rho^n}{(K-n)!} P_0$
W_s	$\frac{1}{\mu - \lambda}$	$\begin{cases} \frac{\rho[1 - (N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{N+1})\lambda_{eff}}, \\ \frac{N}{2\lambda_{eff}}, \rho = 1 \end{cases}$	$\frac{L_s}{\lambda}$
W_q	$W_s - \frac{1}{\mu}$	$W_s - \frac{1}{\mu}$	$W_s - \frac{1}{\mu}$
L_s	$\frac{\rho}{1 - \rho}$	$\begin{cases} \frac{\rho[1 - (N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{N+1})}, \\ \frac{N}{2}, \rho = 1 \end{cases}$	$K - \frac{\mu}{\lambda} (1 - P_0)$
L_q	$\frac{\rho^2}{1 - \rho}$	$\lambda_{eff} W_q$	$K - \frac{\lambda + \mu}{\lambda} (1 - P_0)$
\bar{s}	$L_s - L_q$	$L_s - L_q$	$L_s - L_q$

5.2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ POISSON ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΤΩΝ

Το Μοντέλο (M/M/s):(GD/∞/∞)

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των αφίξεων και των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή Poisson, ενώ υπάρχουν s παράλληλοι σταθμοί εξυπηρέτησης. Το σύστημα εξυπηρέτησης και η πηγή προέλευσης πελατών, έχουν άπειρη χωρητικότητα. Ισχύουν:

- $\lambda_n = \lambda, n \geq 0$
- $\mu_n = \begin{cases} n\mu, & n < s \\ c\mu, & n \geq s \end{cases}$
- $\lambda_{eff} = \lambda$
- $\lambda_{lost} = 0$

Ισχύουν:

- $P_n = \begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n < s \\ \frac{\rho^n}{s!s^{n-s}} P_0, & n \geq s \end{cases}$
- $P_0 = [\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1}{1-\frac{\rho}{s}}]^{-1}, \frac{\rho}{s} < 1$

Τα μέτρα απόδοσης υπολογίζονται:

- $L_q = \frac{\rho^{s+1}}{(s-1)!(s-\rho)^2} P_0$
- $L_s = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = L_q + \rho$

Επίσης:

- $W_s = \frac{L_s}{\lambda}$
- $W_q = \frac{L_q}{\lambda}$
- $\bar{s} = L_s - L_q = \rho$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με το μοντέλο Poisson (M/M/s):(GD/∞/∞) συνοψίζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/s):(GD/∞/∞)

λ_n	λ
μ_n	$\begin{cases} n\mu, & n < s \\ c\mu, & n \geq s \end{cases}$
λ_{eff}	λ
λ_{lost}	0
P_0	$[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1}{1-\frac{\rho}{s}}]^{-1}, \frac{\rho}{s} < 1$

P_n	<ul style="list-style-type: none"> $P_n = \begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n < s \\ \frac{\rho^n}{s!s^{n-s}} P_0, & n \geq s \end{cases}$
W_s	$\frac{L_s}{\lambda}$
W_q	$\frac{L_q}{\lambda}$
L_s	$L_q + \rho$
L_q	$\frac{\rho^{s+1}}{(s-1)!(s-\rho)^2} P_0$
\bar{s}	$L_s - L_q$

Το Μοντέλο (M/M/s):(GD/N/∞)

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των αφίξεων και των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή Poisson, ενώ υπάρχουν s παράλληλοι σταθμοί εξυπηρέτησης. Το σύστημα εξυπηρέτησης έχει χωρητικότητα N πελατών, ενώ η πηγή προέλευσης πελατών έχει άπειρη χωρητικότητα. Ισχύουν:

- $\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & 0 \leq n \leq N \\ 0, & n > N \end{cases}$
- $\mu_n = \begin{cases} n\mu, & n < s \\ c\mu, & n \geq s \end{cases}$
- $\lambda_{eff} = (1 - P_N)\lambda$
- $\lambda_{lost} = \lambda - \lambda_{eff} = \lambda P_N$

Ισχύουν:

- $P_n = \begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n < s \\ \frac{\rho^n}{s!s^{n-s}} P_0, & n \geq s \end{cases}$
- $P_0 = \begin{cases} [\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1 - (\frac{\rho}{s})^{N-s+1}}{1 - \frac{\rho}{s}}]^{-1}, & \frac{\rho}{s} \neq 1 \\ [\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} (N - s + 1)]^{-1}, & \frac{\rho}{s} = 1 \end{cases}$

Τα μέτρα απόδοσης υπολογίζονται:

- $L_q = \begin{cases} \frac{\rho^{s+1}}{(s-1)!(s-\rho)^2} \left[1 - \left(\frac{\rho}{s}\right)^{N-s+1} \left(1 - \frac{\rho}{s}\right) \left(\frac{\rho}{s}\right)^{N-s} \right] P_0, & \frac{\rho}{s} \neq 1 \\ \frac{\rho^s (N-s)(N-s+1)}{2s!} P_0, & \frac{\rho}{s} = 1 \end{cases}$
- $L_s = L_q + \frac{\lambda_{eff}}{\mu}$

Επίσης:

- $W_s = \frac{L_s}{\lambda_{eff}}$
- $W_q = \frac{L_q}{\lambda_{eff}}$
- $\bar{s} = L_s - L_q = \frac{\lambda_{eff}}{\mu}$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με το μοντέλο Poisson (M/M/s):(GD/N/∞) συνοψίζονται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/s):(GD/N/∞)

λ_n	$\begin{cases} \lambda, & 0 \leq n \leq N \\ 0, & n > N \end{cases}$
μ_n	$\begin{cases} n\mu, & n < s \\ c\mu, & n \geq s \end{cases}$
λ_{eff}	$(1 - P_N)\lambda$
λ_{lost}	λP_N
P_0	$\begin{cases} \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1 - (\frac{\rho}{s})^{N-s+1}}{1 - \frac{\rho}{s}} \right]^{-1}, & \frac{\rho}{s} \neq 1 \\ \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} (N - s + 1) \right]^{-1}, & \frac{\rho}{s} = 1 \end{cases}$
P_n	$\begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n < s \\ \frac{\rho^n}{s! s^{n-s}} P_0, & n \geq s \end{cases}$
W_s	$\frac{L_s}{\lambda_{eff}}$
W_q	$\frac{L_q}{\lambda_{eff}}$
L_s	$L_q + \frac{\lambda_{eff}}{\mu}$
L_q	$\begin{cases} \frac{\rho^{s+1}}{(s-1)!(s-\rho)^2} \left[1 - \left(\frac{\rho}{s}\right)^{N-s+1} \left(1 - \frac{\rho}{s}\right) \left(\frac{\rho}{s}\right)^{N-s} \right] P_0, & \frac{\rho}{s} \neq 1 \\ \frac{\rho^s (N-s)(N-s+1)}{2s!} P_0, & \frac{\rho}{s} = 1 \end{cases}$
\bar{s}	$L_s - L_q$

Το Μοντέλο (M/M/s):(GD/∞/K)

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των αφίξεων και των εξυπηρετήσεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή Poisson, ενώ υπάρχουν s παράλληλοι σταθμοί εξυπηρέτησης. Το σύστημα εξυπηρέτησης έχει άπειρη χωρητικότητα, ενώ η πηγή προέλευσης πελατών έχει μέγεθος K. Αυτό το σύστημα αναμονής προσομοιάζει στην περίπτωση, όπου K μηχανές περιμένουν να επισκευαστούν από s τεχνίτες. Ισχύουν:

- $\lambda_n = \begin{cases} \lambda(K - n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$

$$\bullet \mu_n = \begin{cases} n\mu, & 0 \leq n \leq s \\ s\mu, & s \leq n \leq K \end{cases}, n = 1, \dots, K$$

Ισχύουν:

$$\bullet P_0 = [\sum_{n=0}^s \binom{K}{n} \rho^n + \sum_{n=s+1}^K \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{s! s^{n-s}}]^{-1}$$

$$\bullet P_n = \begin{cases} \binom{K}{n} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n \leq s \\ \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{s! s^{n-s}} P_0, & s < n \leq K \end{cases}$$

Για τον αριθμό πελατών στο σύστημα αναμονής, L_s , δεν υπάρχει κλειστή έκφραση οπότε υπολογίζεται ως:

$$L_s = \sum_{n=0}^K n P_n$$

Τα υπόλοιπα μέτρα απόδοσης (L_q , W_s , W_q) υπολογίζονται συναρτήσει της παραμέτρου L_s .

Τα μεγέθη που σχετίζονται με το μοντέλο Poisson (M/M/s):(GD/N/∞) συνοψίζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου Poisson (M/M/s):(GD/∞/K)

λ_n	$\begin{cases} \lambda(K-n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
μ_n	$\begin{cases} n\mu, & 0 \leq n \leq s \\ s\mu, & s \leq n \leq K \end{cases}$
λ_{eff}	$\begin{cases} \lambda(K-n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
λ_{lost}	0
P_0	$[\sum_{n=0}^s \binom{K}{n} \rho^n + \sum_{n=s+1}^K \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{s! s^{n-s}}]^{-1}$
P_n	$\begin{cases} \binom{K}{n} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n \leq s \\ \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{s! s^{n-s}} P_0, & s < n \leq K \end{cases}$
W_s	$\frac{L_s}{\lambda}$
W_q	$\frac{L_q}{\lambda}$
L_s	$\sum_{n=0}^K n P_n$
L_q	$L_s - \rho$
\bar{s}	$L_s - L_q$

Τα μεγέθη που σχετίζονται με τα μοντέλα Poisson με πολλαπλούς σταθμούς εξυπηρέτησης συνοψίζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλων Poisson με πολλαπλούς εξυπηρετητές

	(M/M/s):(GD/∞/∞)	(M/M/s):(GD/N/∞)	(M/M/s):(GD/∞/N)
λ_n	λ	$\begin{cases} \lambda, & 0 \leq n \leq N \\ 0, & n > N \end{cases}$	$\begin{cases} \lambda(K-n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
μ_n	$\begin{cases} n\mu, & n < s \\ c\mu, & n \geq s \end{cases}$	$\begin{cases} n\mu, & n < s \\ c\mu, & n \geq s \end{cases}$	$\begin{cases} n\mu, & 0 \leq n \leq s \\ s\mu, & s \leq n \leq K \end{cases}$
λ_{eff}	λ	$(1 - P_N)\lambda$	$\begin{cases} \lambda(K-n), & 0 \leq n \leq K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$
λ_{lost}	0	λP_N	0
P_0	$[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{s}}]^{-1},$ $\frac{\rho}{s} < 1$	$\begin{cases} [\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1 - (\frac{\rho}{s})^{N-s+1}}{1 - \frac{\rho}{s}}]^{-1}, & \frac{\rho}{s} \neq 1 \\ [\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} (N-s+1)]^{-1}, & \frac{\rho}{s} = 1 \end{cases}$	$[\sum_{n=0}^s \binom{K}{n} \rho^n + \sum_{n=s+1}^K \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{s! s^{n-s}}]^{-1}$
P_n	$\begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n < s \\ \frac{\rho^n}{s! s^{n-s}} P_0, & n \geq s \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n < s \\ \frac{\rho^n}{s! s^{n-s}} P_0, & n \geq s \end{cases}$	$\begin{cases} \binom{K}{n} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n \leq s \\ \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{s! s^{n-s}} P_0, & s < n \leq K \end{cases}$
W_s	$\frac{L_s}{\lambda}$	$\frac{L_s}{\lambda_{eff}}$	$\frac{L_s}{\lambda}$
W_q	$\frac{L_q}{\lambda}$	$\frac{L_q}{\lambda_{eff}}$	$\frac{L_q}{\lambda}$
L_s	$L_q + \rho$	$L_q + \frac{\lambda_{eff}}{\mu}$	$\sum_{n=0}^K n P_n$
L_q	$\frac{\rho^{s+1}}{(s-1)!(s-\rho)^2} P_0$	$\begin{cases} \frac{\rho^{s+1}}{(s-1)!(s-\rho)^2} [1 - (\frac{\rho}{s})^{N-s+1} (1 - \frac{\rho}{s}) (\frac{\rho}{s})^{N-s}] P_0, & \frac{\rho}{s} \neq 1 \\ \frac{\rho^s (N-s)(N-s+1)}{2s!} P_0, & \frac{\rho}{s} = 1 \end{cases}$	$L_s - \rho$
\bar{s}	$L_s - L_q$	$L_s - L_q$	$L_s - L_q$

5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO

Σύμφωνα με τον Pengelly (2002), ως μέθοδος Monte Carlo (Monte Carlo method) νοείται το σύνολο των μεθόδων που χρησιμοποιούν ακολουθίες τυχαίων αριθμών για την εκτέλεση προσομοιώσεων και επιτυγχάνουν προσεγγιστική λύση του τεθέντος προβλήματος. Εξάλλου, η σειρά των μεθόδων ονομάστηκε όπως η πρωτεύουσα του κρατιδίου του Μονακό (Monaco), το Monte Carlo, όπου αφθονεί συγκεκριμένο είδος γεννητριών τυχαίων αριθμών, οι ρουλέτες.

5.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πορεία και ο τρόπος εξέλιξης των μεθόδων Monte Carlo παρουσιάζεται, μέσω της παράθεσης μερικών ιστορικών στοιχείων για τη χρήση της. Ο Fishman (1996) απαριθμεί τρεις περιόδους- ορόσημα στην ανάπτυξη της μεθόδου. Συγκεκριμένα:

- το δέκατοέβδομο και το δέκατοόγδοο αιώνα, οι μαθηματικοί παρακινήθηκαν να αναπαραστήσουν τα διαδοχικά αποτελέσματα παιγνίων τύχης, ως ακολουθίες τυχαίων αριθμών
- το δέκατοένατο αιώνα και συγκεκριμένα το 1899, ο λόρδος Rayleigh επέδειξε την προσεγγιστική λύση παραβολικής διαφορικής εξίσωσης, μέσω της χρήσης μονοδιάστατου τυχαίου περιπάτου. Το 1931, ο Kolmogorov συσχέτισε τις μαρκοβιανές στοχαστικές διαδικασίες με ορισμένες ολοκληρωματικές και διαφορικές εξισώσεις
- το 1944, όπως αναφέρει ο Kochanski (2005), οι επιστήμονες ασχολήθηκαν με το πρόβλημα κατασκευής της ατομικής βόμβας, και συγκεκριμένα με την πολυπλοκότητα των εξισώσεων, που αντικατοπτρίζουν τη γεωμετρία της βόμβας, και αφορούν στον υπολογισμό της πιθανότητας κάποιο νετρόνιο από άτομο ουρανίου να προκαλέσει σχάση σε άλλο άτομο ουρανίου. Η προσπάθεια επίλυσης προβλημάτων πυρηνικής σχάσης συνεχίστηκε και μετά το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου (Fishman 1996).

5.3.2 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ

Όπως έχει γραφεί παραπάνω, οι μέθοδοι Monte Carlo παράγουν ακολουθίες τυχαίων αριθμών για την εκτέλεση προσομοιώσεων. Η ανάπτυξη και η χρήση της μεθόδου αυξήθηκε εντυπωσιακά με την αύξηση της ταχύτητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπου οι τυχαίοι αριθμοί παράγονται ντετερμινιστικά, με τη βοήθεια αλγορίθμων. Επιδιώκεται δε, κάθε ψηφίο ενός αριθμού να έχει την ίδια πιθανότητα εμφάνισης με οποιοδήποτε άλλο. Ο όρος “τυχαίοι αριθμοί” αναφέρεται σε μοιόμορφα παραγόμενους ψευδοτυχαίους αριθμούς (Rubinstein 1981).

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ VON NEUMANN

Ο Von Neumann εισήγαγε έναν αλγόριθμο, αποτέλεσμα του οποίου ήταν τα μεσαία ψηφία ενός αριθμού υψωμένου στο τετράγωνο- για παράδειγμα, αν ο εισαγόμενος αριθμός ήταν το 7452, το τετράγωνο του οποίου υπολογίζεται ως 55532304 και ο εξαγόμενος τυχαίος αριθμός είναι το 5323.

ΣΥΓΚΛΙΝΟΥΣΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Ευρέως χρησιμοποιούμενες γεννήτριες τυχαίων αριθμών είναι οι συγκλίνουσες γεννήτριες (congruential generators), όπου κάθε επόμενος παραγόμενος αριθμός προκύπτει από τους προηγούμενους μέσω κάποιας αλγεβρικής σχέσης.

Οι γραμμικές συγκλίνουσες γεννήτριες (linear congruential generators) ακολουθούν την αλγεβρική σχέση:

$$x_{i+1} = (ax_i + c)(\text{mod } m), a, c, m \in \mathbb{N}$$

από όπου, μετά τη διαίρεση $U_i = \frac{x_i}{\mu}$, προκύπτουν τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα $[0,1)$ (Gentle 1998).

Οι αριθμοί αυτοί έχουν περίοδο, το πολύ ίση με m . Στους υπολογιστές, χρησιμοποιείται $m = 2^\beta$ ή $m = 10^\beta$, αναλόγα με το αν ο υπολογιστής χρησιμοποιεί το δυαδικό ή το δεκαδικό σύστημα αρίθμησης. Η παράμετρος β ισούται με το μέγιστο μήκος λέξης που μπορεί να διαχειριστεί ο υπολογιστής.

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ x και x_i , υπολογίζεται μεταξύ των αριθμών:

$$\frac{1}{\alpha} - \left(\frac{6c}{am}\right) \left(1 - \frac{c}{m}\right) \pm \frac{\alpha}{m}$$

(Rubinstein 1981).

ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Ιδιάζουσα περίπτωση συγκλίνουσας γεννήτριας τυχαίων αριθμών είναι οι πολλαπλασιαστικές γεννήτριες (multiplicative generators), όπου η παράμετρος c λαμβάνεται ίση με το μηδέν ($c = 0$) και τελικά:

$$x_{i+1} = (\alpha x_i) \pmod{m}, \alpha, m \in \mathbb{N}$$

Ενώ, περίπτωση συγκλίνουσας γεννήτριας αναπαριστά και η αλγεβρική σχέση:

$$x_{i+1} = x_i + (x_{i-\kappa}) \pmod{m}$$

από την οποία προκύπτει η ακολουθία Fibonacci, για $\kappa = 1$.

Γενικά, οι τυχαίοι αριθμοί θεωρούνται υψηλής ποιότητας, αν:

- ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή
- είναι στατιστικά ανεξάρτητοι
- είναι εύκολα αναπαράξιμοι.

5.3.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΤΕΣΤ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ

Για το σκοπό της εξακρίβωσης της ποιότητας των τυχαίων αριθμών, χρησιμοποιούνται στατιστικά τεστ. Τα σημαντικότερα είναι:

- τεστ χ^2 - τετράγωνο (χ^2) και τεστ Cramer- Von Mises για την προσαρμογή δείγματος σε πιθανοτική κατανομή
- σειριακό τεστ (serial test) για το βαθμό τυχειότητας μεταξύ διαδοχικών αριθμών κάποιας ακολουθίας (Rubinstein 1981).

ΤΕΣΤ ΧΙ- ΤΕΤΡΑΓΩΝΟ

Για τη διενέργεια του τεστ, οι τυχαίοι αριθμοί ταξινομούνται σε κ κλάσεις και υπολογίζεται η τυχαία μεταβλητή:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\kappa} \frac{(O_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i}$$

όπου o_i το πλήθος των παρατηρούμενων τιμών στην κλάση και e_i το αναμενόμενο πλήθος τιμών σε κάθε κλάση, που προκύπτει από την πιθανοτική κατανομή $f(x)$.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση των τυχαίων αριθμών, όπου ζητείται να εξακριβωθεί η ομοιόμορφη κατανομή τους στο $(0,1)$, ισχύει:

$$\chi^2 = \frac{\kappa}{N} \sum_{i=1}^{\kappa} (o_i - \frac{N}{\kappa})^2,$$

όπου N το πλήθος των παραχθέντων τυχαίων αριθμών.

Η μηδενική υπόθεση του τεστ καθορίζεται ως:

$$H_0: \chi^2 = 0$$

και η εναλλακτική υπόθεση ως:

$$H_1: \chi^2 \neq 0$$

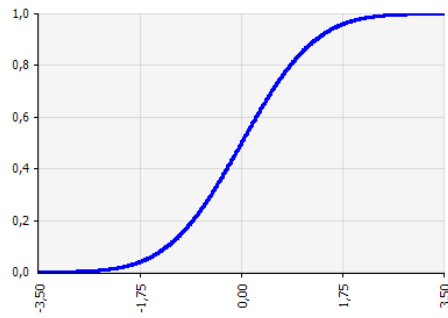
Η κρίσιμη μεταβλητή ακολουθεί την κατανομή χ^2 με πλήθος βαθμών ελευθερίας, ίσο με το πλήθος των κλάσεων μείον το πλήθος των παραμέτρων που χρειάστηκε να υπολογιστούν για τον υπολογισμό της παραμέτρου e_i (Σιμόπουλος 1989).

5.3.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Ο Vose (2000) αναφέρει πως η προσομοίωση Monte Carlo εμπλέκει τη δειγματοληψία από πιθανοτικές κατανομές, με τρόπο ώστε οι, προηγουμένως παραχθέντες, τυχαίοι αριθμοί να ακολουθούν την κατανομή από την οποία γίνεται η δειγματοληψία, το βέλτιστο δυνατό. Τέτοιες μέθοδοι ονομάζονται γεννήτριες τυχαίων μεταβλητών και στα επόμενα παρουσιάζονται κάποιες από αυτές. Στην επόμενη παράγραφο, παρουσιάζεται η χρήση αυτών των τυχαίων μεταβλητών για τον υπολογισμό ολοκληρώματος με διάφορες μεθόδους Monte Carlo.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

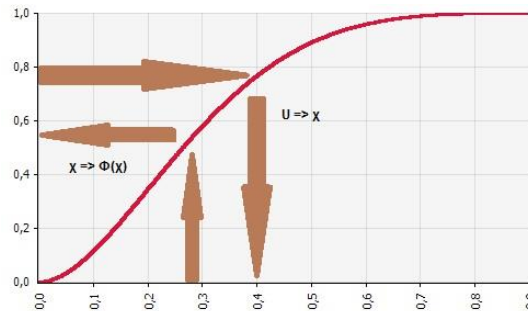
Στην εφαρμογή της μεθόδου αντίστροφου μετασχηματισμού (inverse transform method), χρησιμοποιείται η αθροιστική κατανομή (cumulative distribution function), $F(x) = P(x \leq X)$, όπου X δεδομένος αριθμός. Όπως είναι προφανές, η συνάρτηση $F(x)$ παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Περίπτωση αθροιστικής κατανομής αποτελεί η $\Phi(z)$ που παρουσιάζεται στην Εικόνα 13 και αντιπροσωπεύει την αθροιστική κατανομή που προέρχεται από την τυποποιημένη κανονική κατανομή.



Εικόνα 13: Αθροιστική κατανομή που προέρχεται από την τυποποιημένη κανονική κατανομή

Η αντίστροφη συνάρτηση, αν μπορεί να οριστεί, είναι $F^{-1}(P) = x$.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο της μεθόδου που παρατίθεται από το Vose (2000), παράγεται τυχαίος αριθμός U από την ομοιόμορφη κατανομή $(0,1)$ και εισάγεται στη συνάρτηση ώστε $x \leftarrow F^{-1}(U)$, όπου x η εξαγόμενη μεταβλητή. Η μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Μέθοδος αντίστροφου μετασχηματισμού

Ο Rubinstein (1981) κρίνει τη μέθοδο ως ακατάλληλη σε περίπτωση που είναι δύσκολη ή αδύνατη η εύρεση της αντίστροφης συνάρτησης, $F^{-1}(x)$, ενώ ο Vose (2000) ταυτίζει τη μέθοδο με τη δειγματοληψία Monte Carlo (Monte Carlo sampling) και αναφέρει πως απαιτείται μεγάλος αριθμός επαναλήψεων, για τη λήψη ικανοποιητικού αποτελέσματος.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Η μέθοδος σύνθεσης (composition method) παρουσιάζεται στο έργο του Rubinstein και έγκειται στη γραφή της υπολογιζόμενης πιθανοτικής κατανομής, ως το άθροισμα δύο ή περισσότερων εύκολα υπολογιζόμενων πιθανοτικών κατανομών. Αν:

- η συνάρτηση της πιθανοτικής κατανομής $f(x)$
- $g(x|y)$ μία 1-1 συνάρτηση και
- y προέρχεται από αθροιστική κατανομή $F(y)$,

ισχύει: $f(x) = \int g(x|y)dF(y) = \sum_i P_i \gamma(x|y = i), y \in Z$.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ- ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ

Η μέθοδος αποδοχής- απόρριψης (acceptance- rejection method) χρησιμοποιεί τη γραφή της πιθανοτικής κατανομής $f(x)$, ως $f(x) = c * h(x)g(x)$ όπου $c \geq 1$, $0 \leq g(x) \leq 1$ και $h(x)$ άλλη πιθανοτική κατανομή.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο της μεθόδου:

- παράγεται μία μεταβλητή που ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή $(0,1)$ έστω U_1
- υπολογίζεται η παράμετρος Y , από τη συνάρτηση $h(x)$ και εισάγεται στη συνάρτηση $g(x=Y)$
- ελέγχεται η συνθήκη $U_1 \leq g(Y)$ - αν ισχύει, το Y γίνεται αποδεκτό αλλιώς απορρίπτεται το ζεύγος U_1, Y .

ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΗΤΑ

Ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος για δειγματοληψία από την κατανομή βήτα, είναι ο αλγόριθμος του Johnk, ο οποίος στηρίζεται στο ότι αν U_1, U_2 δύο μεταβλητές προερχόμενες από την ομοιόμορφη κατανομή $(0,1)$ και $Y_1 = U_1^{1/\alpha}$ και $Y_2 = U_2^{1/\beta}$ όπου α, β οι παράμετροι της πιθανοτικής κατανομής βήτα και $Y_1 + Y_2 \leq 1$ τότε και η μεταβλητή $x = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2}$ ακολουθεί την κατανομή βήτα (α, β) .

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ισούται με την πιθανότητα το άθροισμα $Y_1 + Y_2$, να είναι μικρότερο της μονάδας, δηλαδή την πιθανότητα:

$$P(Y_1 + Y_2 \leq 1) = \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}$$

όπου $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty \tau^{\alpha-1} e^{-\tau} d\tau$.

ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Σύμφωνα με τη μέθοδο Box- Muller, αν U_1, U_2 ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή $(0,1)$, τότε οι μεταβλητές:

$$x_1 = \sqrt{-2\log(U_1)}\cos(2\pi U_2)$$

$$x_2 = \sqrt{-2\log(U_1)}\sin(2\pi U_2)$$

ακολουθούν την κανονική κατανομή $(0,1)$.

5.3.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τον Pengelly (2002), μία από τις σημαντικότερες χρήσεις των μεθόδων Monte Carlo είναι ο υπολογισμός ολοκληρωμάτων, με τη χρήση των

παραχθέντων τυχαίων μεταβλητών, καθώς προσφέρεται πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής λύσης, ακόμα και όταν αυτά είναι πολυδιάστατα.

Κατωτέρω, παρουσιάζονται ορισμένες από αυτές τις μεθόδους καθώς και η προσφερόμενη ακρίβεια. Γίνεται εμφανές πως όσο αυξάνεται το προς υπολογισμό δείγμα, αυξάνεται και η ακρίβειά του αποτελέσματος. Υπενθυμίζεται πως η πιθανότητα κάποια τιμή μεταβλητής x , που ακολουθεί συγκεκριμένη πιθανοτική κατανομή με συνάρτηση $f(x)$, να εμπίπτει σε διάστημα τιμών (a, b) συμβολίζεται ως $P(a < x < b)$ και ισούται με $P(a < x < b) = \int_a^b f(x)dx$.

ΑΠΛΗ ΜΕΘΟΔΟΣ MONTE CARLO

Η απλή μέθοδος Monte Carlo (crude monte carlo) ή μέθοδος Monte Carlo δειγματικής τιμής (sample-mean monte carlo) χρησιμοποιεί εκτίμηση της μέσης τιμής δείγματος.

Συγκεκριμένα, αν ζητείται ο υπολογισμός του ολοκληρώματος $I = \int_a^b f(x)dx$, λαμβάνεται ένα πλήθος τυχαίων μεταβλητών, έστω N και υπολογίζονται οι τιμές $f(x_i)$.

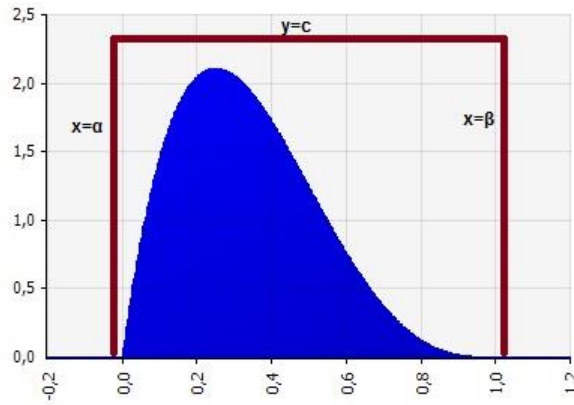
Η λύση του ολοκληρώματος υπολογίζεται ως $I = \frac{\beta - \alpha}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i)$ και έχει διακύμανση $\sigma^2 = \frac{\beta - \alpha}{N} \int_a^b (f(x) - \int_a^b f(t)dt)^2 dx$.

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του ολοκληρώματος δίνεται στο έργο του Rubinstein (1981):

- δημιουργείται ακολουθία N , το πλήθος, αριθμών που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή $(0,1)$ $U_i, i = 1, \dots, N$
- υπολογίζονται οι παράμετροι $x_i = a + U_i(\beta - \alpha), i = 1, \dots, N$ και οι τιμές τους, $f(x_i)$
- υπολογίζονται η μέση τιμή και η διακύμανση του αποτελέσματος.

ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ MONTE CARLO ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ Η ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στην περίπτωση της ολοκλήρωσης με τη μέθοδο Monte Carlo επιτυχίας ή αστοχίας (hit-or-miss monte carlo method), τίθεται και πάλι το πρόβλημα υπολογισμού του ολοκληρώματος $I = \int_a^b f(x)dx$. Η συνάρτηση εγκιβωτίζεται σε ορθογώνιο Ω , για το οποίο ισχύουν: $\alpha \leq x \leq \beta$ και $0 \leq y \leq c$. Το ορθογώνιο παρουσιάζεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Εγκιβωτισμός συνάρτησης σε ορθογώνιο

Τότε, το ολοκλήρωμα ισούται με το εμβαδόν κάτω από τη γραφική παράσταση και το εμβαδόν του ορθογωνίου, υπολογίζεται ως $c(\beta - \alpha)$.

Η πιθανότητα κάποιος τυχαίος αριθμός να είναι κάτω από τη γραφική παράσταση ισούται με $P = \frac{\text{εμβαδόν κάτω από τη γραφική παράσταση}}{\text{εμβαδόν ορθογωνίου}} = \frac{I}{c(\beta - \alpha)}$.

Αν παραχθούν N τυχαίοι αριθμοί και N_H από αυτούς, βρίσκονται κάτω από τη γραφική παράσταση, το ολοκλήρωμα υπολογίζεται ως $I = c(\beta - \alpha) \frac{N_H}{N}$ και η διακύμανση του αποτελέσματος είναι $\sigma^2 = \frac{1}{N} [c(\beta - \alpha) - I]$.

Ο Pengelly (2002) αναφέρει πως η μέθοδος προσφέρει μικρότερη ακρίβεια από την προσφερόμενη από την απλή μέθοδο.

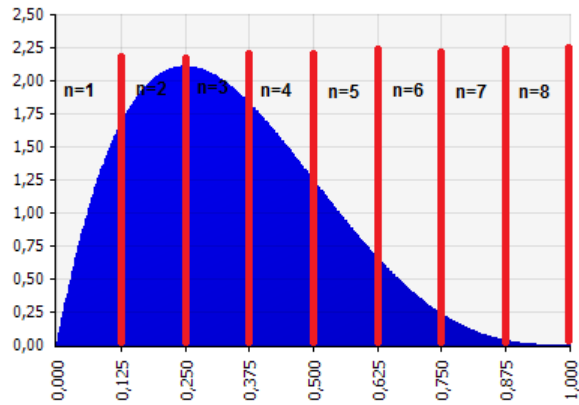
5.3.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΑΤΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ

Στην προσπάθεια ελάττωσης της διακύμανσης που προσφέρεται κατά τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων, γίνεται προσπάθεια ελέγχου των τυχαίων μεταβλητών της δειγματοληψίας, που πραγματοποιείται για τη διενέργειας της προσομοίωσης. Παρακάτω, αναπτύσσονται μερικές από αυτές τις μεθόδους δειγματοληψίας.

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΛΑΤΙΝΙΚΟΥ ΥΠΕΡΚΥΒΟΥ

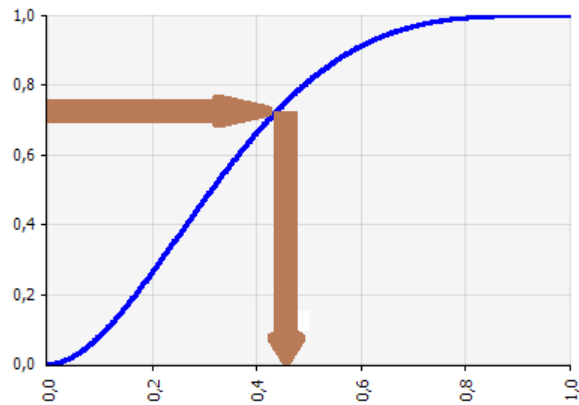
Σύμφωνα με το Vose (2000), η δειγματοληψία λατινικού υπερκύβου (latin hypercube sampling) αποτελεί ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδο δειγματοληψίας στα σημερινά προγράμματα λογισμικού ανάλυσης κινδύνων.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί την πιθανοτική κατανομή για την εξαγωγή N μεταβλητών, όπου N ο αριθμός των επαναλήψεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν. Η πιθανοτική κατανομή χωρίζεται σε N διαστήματα ίσης πιθανότητας. Στην Εικόνα 16, παρουσιάζεται ο χωρισμός μίας πιθανοτικής κατανομής σε $N = 8$ διαστήματα. Ένας τυχαίος αριθμός προσδιορίζει από ποιο διάστημα θα προέλθει η τυχαία μεταβλητή



Εικόνα 16: Καταμερισμός πιθανοτικής κατανομής σε N=8 ίσα διαστήματα

και ένας δεύτερος τυχαίος αριθμός, που προκύπτει από την αθροιστική κατανομή, υποδεικνύει την ακριβή θέση της εξαγόμενης μεταβλητής μέσα στο διάστημα όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Δειγματοληψία της αθροιστικής κατανομής

Αφού ληφθεί η ζητούμενη μεταβλητή, το διάστημα επισημαίνεται ως ήδη χρησιμοποιημένο και η δειγματοληψία συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο χωρίς να μπορεί να εκλεχθεί μεταβλητή από τα ήδη χρησιμοποιημένα διαστήματα.

Ο Vose (2000) αναφέρει πως η δειγματοληψία λατινικού υπερκύβου υπερτερεί της δειγματοληψίας Monte Carlo, αφού αναπαράγει καλύτερα την αρχική πιθανοτική κατανομή υπό τον όρο πραγματοποίησης του συνόλου των επαναλήψεων N που είχε αρχικά προσδιοριστεί. Παραθέτει δε ως εναλλακτική, τη δειγματοληψία του λατινικού υπερκύβου μεσαίου σημείου (mid-point latin hypercube sampling) όπου η εξαγόμενη μεταβλητή είναι το μέσο κάθε διαστήματος από τα N οριζόμενα, σημειωνοντάς την ως ακριβέστερη.

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στην περίπτωση υπολογισμού του ολοκληρώματος $I = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx$, επιχειρείται ο καθορισμός συνάρτησης πιθανοτικής κατανομής $g(x)$ και η επίλυση του ισοδύναμου ολοκληρώματος $I = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{f(x)}{g(x)}g(x)dx$. Η συνάρτηση $g(x)$ επιχειρεί να

προσδιορίσει τις περιοχές τιμών x της συνάρτησης $f(x)$, από τις οποίες θα ήταν επιθυμητό να ληφθεί μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων από τις υπόλοιπες.

Τελικός σκοπός της δειγματοληψίας σπουδαιότητας (importance sampling) είναι η καλύτερη προσέγγιση των τιμών των υποδιαστημάτων, που συνεισφέρουν περισσότερο στο αποτέλεσμα. Συναντάται αρκετά συχνά στη δειγματοληψία πιθανοτικών κατανομών με ασυμμετρία, όπου ακόμα και πολύ μεγάλος αριθμός επαναλήψεων μπορεί να αποτύχει να παράγει ικανοποιητικά συμπεράσματα για την ουρά της κατανομής (Vose 2000). Ο Haugh (2010) καταγράφει τη χρήση της κατά τη μοντελοποίηση σπανίων γεγονότων.

Το ολοκλήρωμα εκτιμάται ως $I = \frac{1}{N} \sum_i \frac{f(x_i)}{g(x_i)}$ (Rubinstein 1981).

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι ανάλογη της ποιότητας περιγραφής της πιθανοτικής κατανομής $g(x)$ για τη δειγματοληψία (Pengelly 2002).

ΣΤΡΩΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Κατά τη στρωματοποιημένη δειγματοληψία ή δειγματοληψία σχηματισμών (stratified sampling), το ολοκλήρωμα $I = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx$ γράφεται ως το άθροισμα περισσότερων ολοκληρωμάτων, παραδείγματος χάριν ως:

$$I = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx = \int_{\alpha}^{\gamma} f(x)dx + \int_{\gamma}^{\beta} f(x)dx, \alpha < \gamma < \beta$$

και υπολογίζεται ξεχωριστά, το καθένα από αυτά. Σύμφωνα με τον Pengelly (2002), χρησιμοποιείται σε βαθμωτές ή περιοδικές συναρτήσεις.

Άλλες χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η συσχετισμένη δειγματοληψία (correlated sampling) σε περιπτώσεις όπου ζητείται να υπολογιστεί η αλλαγή που επιφέρει στο αποτέλεσμα μικρή μεταβολή κάποιας μεταβλητής εισόδου, ο έλεγχος μεταβλητών (control variates) και η χρήση αντιθετικών μεταβλητών (antithetic variates).

5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ MONTE CARLO

Αρκετές φορές, αναζητείται η βελτιστοποίηση ενός προβλήματος, οι εισροές του οποίου είναι πιθανοτικές κατανομές. Στην εργασία, χρησιμοποιείται βελτιστοποίηση Monte Carlo για την επιλογή των κατηγοριών πλοίων που θα εξυπηρετούνται από το σύστημα ανεφοδιασμού, συναρτήσει του αριθμού σταθμών εξυπηρέτησής του. Σε αυτό το σημείο, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρων κάποιων μεθόδων βελτιστοποίησης.

Σύμφωνα με το Rubinstein (1986), το πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός ντετερμινιστικού προβλήματος υπό κάποιες προϋποθέσεις έγκειται στην εύρεση της τιμής x^* , για την οποία η συνάρτηση $g(x)$ που περιγράφει το πρόβλημα

λαμβάνει τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης $g(x)$ όπου $x \in D \subseteq R^n$ αναπαρίσταται ως:

$$\min_{x \in D \subseteq R^n} g(x) = g(x^*) = x^*$$

$$D = \{x: g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, M\}$$

όπου D συμβολίζεται το σύνολο διαστημάτων που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος.

Στην περίπτωση δε στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης, οι σχέσεις μετασχηματίζονται ως:

$$\min_{x \in D \subseteq R^n} \{g(x) = \int \psi(x, y) f_Y(y, x) dt = E_{\psi}(x, Y)\} = g(x^*) = x^*$$

$$D = \{x: g_i(x) = E_{\psi_i}(x, Y) \leq 0, i = 1, 2, \dots, M\}$$

όπου:

- x, Y ν- και κ- διάστατα διανύσματα
- $\psi(x, y)$ η συνάρτηση που περιγράφει το στοχαστικό πρόβλημα
- x^* η μοναδική τιμή για την οποία ελαχιστοποιείται η συνάρτηση
- $f_Y(y, x)$ πιθανοτική κατανομή που εξαρτάται από τα διανύσματα των παραμέτρων x και D .

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τυχαίους αριθμούς για την παραγωγή σημείων στο σύνολο διαστημάτων D και επομένως, σχετίζονται με τις μεθόδους Monte Carlo. Μερικοί από τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση Monte Carlo (Monte Carlo optimization) και δίνονται στο έργο του Rubinstein (1986) αναπαράγονται παρακάτω.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΜΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΤΥΧΑΙΑΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο μη προσαρμοστικής τυχαίας αναζήτησης (non adaptive random search algorithm) ο οποίος προτάθηκε από τον Brooks, το 1958, για την εκτίμηση της τιμής $g(x^*)$ που περιγράφει την ελαχιστοποίηση ντετερμινιστικού προβλήματος:

- παράγονται N τυχαία, ομοιόμορφα κατανομημένα στο D , διανύσματα X_1, \dots, X_N
- υπολογίζονται οι τιμές $Y_k = g(X_k), k = 1, \dots, N$
- η ζητούμενη τιμή $g(x^*)$ λαμβάνεται ίση με $M_N = \min(Y_1, \dots, Y_N)$.

Οι Rubinstein και Weissman πρότειναν την εξαγωγή των διανυσμάτων από πιθανοτικές κατανομές, διαφορετικές της ομοιόμορφης το 1977 (Rubinstein 1986). Τροποποιώντας, τοιουτοτρόπως, τον αλγόριθμο:

- παράγονται N τυχαία διανύσματα X_1, \dots, X_N στο D από πιθανοτική κατανομή $f_x(x) > 0, \forall x \in D$

- υπολογίζονται οι τιμές $Y_k = g(X_k)$, $k = 1, \dots, N$
- η ζητούμενη τιμή $g(x^*)$ λαμβάνεται ίση με $M_N = \min(Y_1, \dots, Y_N)$

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΑΡΧΩΝ

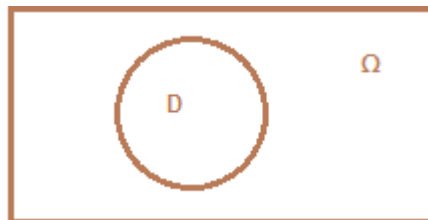
Σύμφωνα με τον αλγόριθμο πολλαπλών αρχών (multistart algorithm):

- παράγονται N τυχαία διανύσματα X_{01}, \dots, X_{0N} στο D από πιθανοτική κατανομή $f_x(x) > 0, \forall x \in D$
- θεωρώντας τα παραχθέντα διανύσματα ως αρχικές τιμές, εφαρμόζεται N φορές κάποια μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης (παραδείγματος χάριν, Newton- Raphson) και υπολογίζονται τα τοπικά ελάχιστα x_1^*, \dots, x_N^*
- η τιμή x^* υπολογίζεται ως το ελάχιστο των τιμών x_1^*, \dots, x_N^* .

Για την παραγωγή των διανυσμάτων έχουν επίσης προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι, όταν το σύνολο διαστημάτων D είναι πολυδιάστο ορθογώνιο, υπερσφαίρα ή υπερσφαινοειδές. Στην περίπτωση πολυπλοκότερου σχήματος, συνήθως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η μέθοδος αποδοχής- απόρριψης (acceptance-rejection method) η οποία και περιγράφεται αμέσως.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ- ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ

Στη μέθοδο αποδοχής- απόρριψης, εισάγεται ένα υπερσύνολο του D , όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Σύνολα διαστημάτων Ω, D για τη μέθοδο αποδοχής- απόρριψης (Rubinstein 1986)

Ο ακολουθούμενος αλγόριθμος παρουσιάζεται στην Εικόνα 19. Οι πραγματοποιούμενες πράξεις είναι:

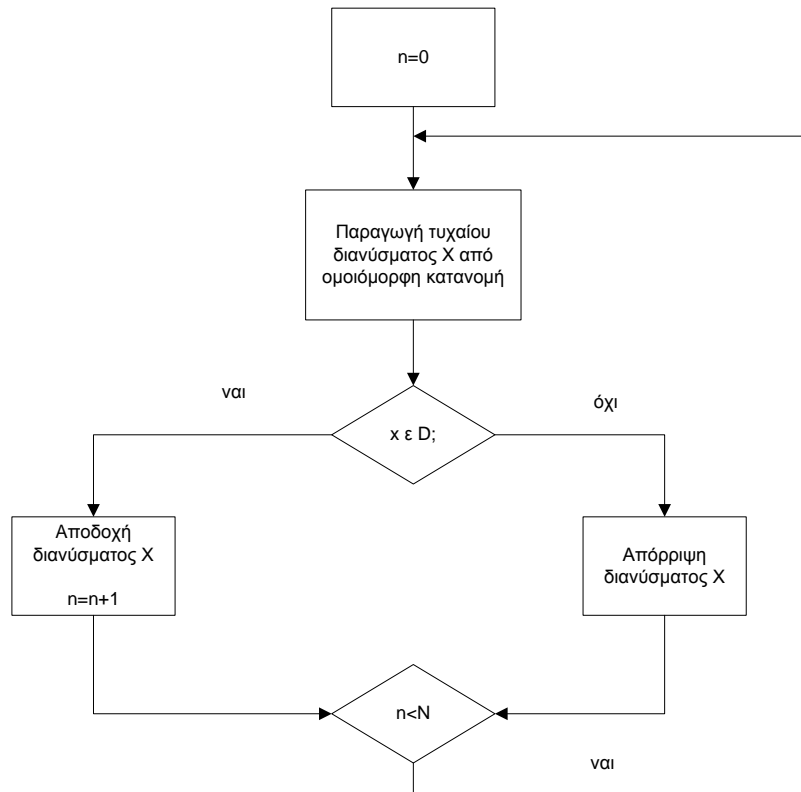
- παράγεται ένα τυχαίο διάνυσμα X , προερχόμενο από ομοιόμορφη κατανομή στο Ω
- αν $X \in D$, το διάνυσμα X γίνεται αποδεκτό- αλλιώς απορρίπτεται
- παράγεται νέο διάνυσμα X - η διαδικασία επαναλαμβάνεται N φορές όπου N ο αριθμός των απαιτούμενων διανυσμάτων

(Rubinstein 1986).

Προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου είναι:

- η ευκολία παραγωγής τυχαίου διανύσματος στο D

- η υψηλή τιμή της αποτελεσματικότητας της μεθόδου, η οποία υπολογίζεται ως $\frac{m(D)}{m(\Omega)}$. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εκφράζει το βαθμό, στον οποίο το σύνολο D καλύπτει το Ω και προφανώς ισχύει: $0 \leq \frac{m(D)}{m(\Omega)} \leq 1$.



Εικόνα 19: Μέθοδος αποδοχής- απόρριψης για την παραγωγή τυχαίων διανυσμάτων για τη βελτιστοποίηση Monte Carlo

6 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο, επιχειρείται η ανάπτυξη μίας μεθόδου μοντελοποίησης και βλτιστοποίησης ενός συστήματος ανεφοδιασμού πλοίων με υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Συγκεκριμένα, αφού περιγραφεί η γενική περίπτωση ενός συστήματος ανεφοδιασμού πλοίων και οι ιδιαιτερότητές του, καταστρώνεται η συνάρτηση κέρδους από τη χρήση του συστήματος.

6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΠΛΟΙΩΝ

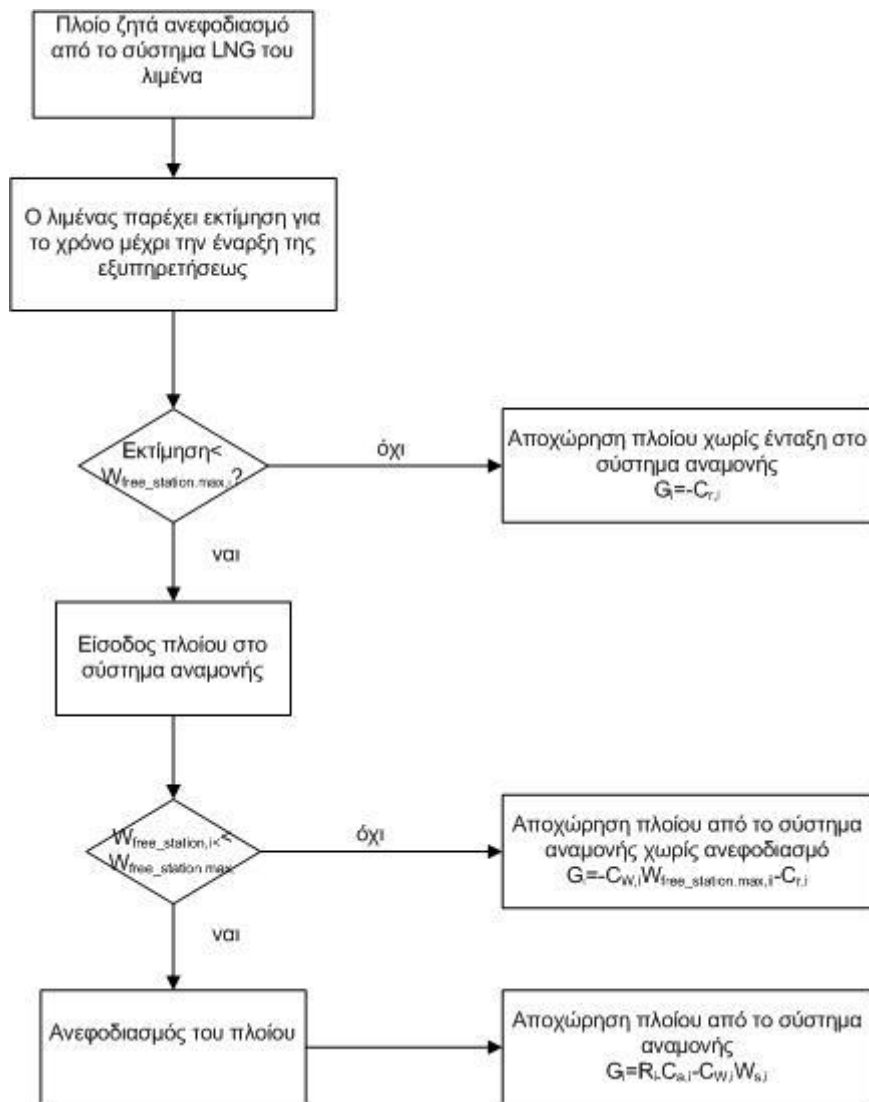
Στο σύστημα ανεφοδιασμού πλοίων με υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), τα πλοία ζητούν άδεια από το λιμενικό οργανισμό να προσεγγίσουν κάποιο ελεύθερο σταθμό ανεφοδιασμού, στην περίπτωση που ο σταθμός ανεφοδιασμού είναι κάποιο αγκυροβόλιο, ή να προσεγγιστούν και να εξυπηρετηθούν από κάποιο πλοίο bunker. Ο λιμένας θα απαντήσει, παρέχοντας εκτίμηση για τον αναμενόμενο χρόνο μέχρι την έναρξη εξυπηρέτησης του πλοίου. Ως στιγμή έναρξης εξυπηρέτησης του πλοίου θεωρείται η στιγμή, κατά την οποία το πλοίο θα είναι το αμέσως επόμενο που θα εξυπηρετηθεί, δηλαδή να υπάρξει ελεύθερος σταθμός εξυπηρέτησης για τον ανεφοδιασμό του. Ο χρόνος που το πλοίο θα είναι στο σύστημα εκείνη τη στιγμή συμβολίζεται με $W_{free_station,,i}$.

Κατόπιν της εκτιμήσεως, το πλοίο θα εισέλθει στο σύστημα αναμονής, αν θεωρεί ότι ο χρόνος αναμονής για την έναρξη της εξυπηρέτησής του είναι ικανοποιητικός ή θα αποχωρήσει από το σύστημα αναμονής, χωρίς να εισέλθει σε αυτό, αν θεωρεί ότι ο χρόνος μέχρι την έναρξη της εξυπηρέτησής του είναι υπερβολικός. Συμβολίζεται $W_{free_station,,max,i}$ ο μέγιστος χρόνος που είναι διατεθειμένο το πλοίο να αναμένει μέχρι την έναρξη της εξυπηρέτησής του.. Η αποχώρηση του πλοίου, χωρίς αυτό να εισέλθει στην ουρά αναμονής θα στοιχίσει στο λιμένα, το κόστος αποχώρησης του πλοίου- πελάτη i , $C_{r,i}$.

Από τη στιγμή, που το πλοίο εισέλθει στο σύστημα αναμονής του σταθμού ανεφοδιασμού LNG, θα αρχίσει η μέτρηση του χρόνου μέχρι την έναρξη της εξυπηρέτησής του. Αν αυτός χρόνος υπερβεί το διαθέσιμο χρόνο από το πλοίο, το πλοίο θα αποχωρήσει, αλλιώς θα εξυπηρετηθεί. Η αποχώρηση του πλοίου, μετά την εισοδό του στην ουρά αναμονής θα στοιχίσει στο λιμένα, το κόστος αποχώρησης του πελάτη i , $C_{r,i}$, και το κόστος παραμονής πελάτη στο σύστημα αναμονής, $C_{w,i}W_{free_station,max,i}$.

Αν τελικά, το πλοίο παραμείνει στο σύστημα αναμονής μέχρι να ξεκινήσει η εξυπηρέτησή του, θα παραμείνει στο σύστημα μέχρι να ολοκληρωθεί η εξυπηρέτησή του και θα αποχωρήσει τότε από αυτό. Η εξυπηρέτηση του πλοίου θα αποφέρει στο σταθμό ανεφοδιασμού τη χρηματική εισπραξη, R_i , ενώ θα τον επιβαρύνει με το μεταβλητό κόστος για την εξυπηρέτηση του πελάτη i , $C_{a,i}$, και το κόστος παραμονής πελάτη στο σύστημα αναμονής, $C_{w,i}W_{s,i}$.

Η διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Διαδικασία ανεφοδιασμού πλοίου

6.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

6.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ

Όπως φάνηκε και από τη διαδικασία ανεφοδιασμού των πλοίων, το κέρδος από καθένα από τα πλοία μπορεί να γραφεί ως:

$$G_i = \begin{cases} R_i - C_{a,i} - C_{w,i}W_{s,i}, & W_{free_station,i} \leq W_{free_station,max,i} \\ -C_{w,i}W_{free_station,max,i} - C_{r,i}, & W_{free_station,i} > W_{free_station,max,i} \\ -C_{r,i}, & \text{αποχώρηση πλοίου χωρίς ένταξη στο σύστημα αναμονής} \end{cases}$$

Για τον υπολογισμό του κέρδους σε μία δεδομένη χρονική περίοδο, πρέπει να συνυπολογιστεί το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος εξυπηρέτησεως ανά μονάδα χρόνου, C_s .

Τελικά, το συνολικό κέρδος από την παροχή ανεφοδιασμών σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο θα είναι:

$$G = -C_s + \sum_i G_i$$

Αν συμβολιστούν:

- N_{balk} , τα πλοία που θα αποχωρήσουν χωρίς να ενταχθούν στο σύστημα αναμονής
- N_{rene} , τα πλοία που θα αποχωρήσουν από το σύστημα αναμονής μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος, και
- $N_{εξυπ}$, τα πλοία που θα εξυπηρετηθούν από το σύστημα αναμονής

το συνολικό κέρδος από την παροχή ανεφοδιασμών σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο θα είναι:

$$G = -C_s + \sum_{balk} G_i + \sum_{rene} G_i + \sum_{εξυπ} G_i$$

Τελικά, μπορεί να γραφεί:

$$G = -C_s + \sum_{balk} (-C_{r,i}) + \sum_{rene} (-C_{w,i}W_{free_station,max,i} - C_{r,i}) + \sum_{εξυπ} (R_i - C_{a,i} - C_{w,i}W_{s,i})$$

6.2.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ

Παραδοχή για το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος

Το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος εξυπηρέτησεως ανά μονάδα χρόνου, C_s , θεωρείται ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι ανεξάρτητη του σταθμού εξυπηρετητών, έστω $C_{s,fixed}$, ενώ η δεύτερη είναι ανάλογη του αριθμού εξυπηρετητών, s . Μπορεί να γραφεί:

$$C_s = C_{s,fixed} + c_s s$$

Ως c_s συμβολίζεται το σταθερό κόστος διαθέσεως κάθε εξυπηρετητή.

Παραδοχή για τη χρηματική εισπραξη από κάθε πελάτη

Η χρηματική εισπραξη από τον πελάτη i θεωρείται ανάλογη του αριθμού κυβικών μέτρων LNG, τα οποία ανεφοδιάζεται

$$R_i = P_{LNG_i} Q_{LNG_i}$$

όπου:

- P_{LNG_i} , η τιμή παροχής του LNG στον πελάτη i ανά κυβικό μέτρο ($\$/m^3$)
- Q_{LNG_i} , η ζήτηση LNG του πελάτη i σε κυβικά μέτρα (m^3)

Παραδοχή για το μεταβλητό κόστος εξυπηρέτησης κάθε πελάτη

Το μεταβλητό κόστος για την εξυπηρέτηση του πελάτη i , $C_{a,i}$, θεωρείται ανάλογο του αριθμού κυβικών μέτρων LNG, τα οποία ανεφοδιάζεται

$$C_{a,i} = c_{aLNGi} Q_{LNGi}$$

όπου:

- c_{aLNGi} , το κόστος παροχής LNG στον πελάτη i ανά κυβικό μέτρο ($\$/m^3$)
- Q_{LNGi} , η ζήτηση LNG του πελάτη i σε κυβικά μέτρα (m^3)

Παραδοχή για το κόστος παραμονής στο σύστημα αναμονής κάθε πελάτη

Το ανά μονάδα χρόνου κόστος παραμονής πελάτη του πελάτη i , $C_{w,i}$, στο σύστημα αναμονής θεωρείται ότι χαρακτηρίζει τον πελάτη i

$$C_{w,i} = C_w(i)$$

Παραδοχή για το κόστος αποχωρήσεως κάθε πελάτη

Το κόστος αποχώρησης του πελάτη i , $C_{r,i}$, από το σύστημα αναμονής θεωρείται ότι χαρακτηρίζει τον πελάτη i

$$C_{r,i} = C_r(i)$$

Το κόστος αποχώρησης του πελάτη i από το σύστημα αναμονής, $C_{r,i}$, θεωρείται ότι ισούται με τη χρηματική είσπραξη που τελικά δεν πραγματοποιήθηκε από τον πελάτη i , συν την αρνητική φήμη που υπήρξε για το σταθμό ανεφοδιασμού και θα αποτρέψει μελλοντικούς ανεφοδιασμούς από αυτό ή άλλα πλοία.

Επίσης, θεωρείται ότι όλες οι πλοιοκτήτριες εταιρείες που θα θελήσουν να ανεφοδιαστούν με LNG από το λιμένα έχουν υπογράψει προηγουμένως, συμφωνία με αυτόν. Η αποχώρηση κάποιου πλοίου θα σημάνει ίσως τη λύση κάποιου συμβολαίου, για παράδειγμα όταν σε αυτό υπάρχει ρήτρα για την έναρξη εξυπηρέτησης του πλοίου εντός ορισμένων χρονικών ορίων από την κλήση για αναεφοδιασμό, όπως είναι τα συμβόλαια με ρήτρα ανεύρεσης ελεύθερου αγκυροβολίου. Η αποτροπή τέτοιων σεναρίων δε μπορεί να επιτευχθεί σε ποσοστό 100%, όσο μεγάλο και αν είναι το σύστημα αναμονής του σταθμού ανεφοδιασμού.

Παραδοχή για το μέγιστο διαθέσιμο χρόνο παραμονής πελάτη στην ουρά

Ο μέγιστος διαθέσιμος χρόνος παραμονής κάποιου πελάτη στην ουρά αναμονής, μέχρι την έναρξη της εξυπηρέτησής του, χαρακτηρίζει τον πελάτη i .

$$W_{free_station,max,i} = W_{free_station,max}(i)$$

Παραδοχή για το χρόνο παραμονής στο σύστημα κάθε πελάτη

Στην περίπτωση που η έναρξη εξυπηρέτησης του πλοίου γίνει τη χρονική στιγμή $W_{free_station,i} \leq W_{free_station,max,i}$, θεωρείται ότι ο συνολικός χρόνος του πλοίου μέσα στο σύστημα αναμονής, ισούται με το άθροισμα του χρόνου αυτού και του χρόνου εξυπηρέτησής του πλοίου. Δηλαδή:

$$W_{s,i} = W_{free_station,i} + W_{serv,i}$$

Η εξυπηρέτηση του πλοίου θεωρείται ότι αποτελείται από το χρόνο που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή έναρξης της εξυπηρέτησής του και μέχρι να αρχίσει ο ανεφοδιασμός του πλοίου, και το χρόνο ανεφοδιασμού του πλοίου, $W_{fuel,i}$. Θεωρείται επίσης, ότι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή έναρξης της εξυπηρέτησής του και μέχρι να αρχίσει ο ανεφοδιασμός του πλοίου είναι ο χρόνος μετακίνησης ανεφοδιαζόμενου πλοίου προς το ελεύθερο αγκυροβόλιο ή του πλοίου bunker προς το ανεφοδιαζόμενο πλοίο, $W_{trans,i}$. Τελικά:

$$W_{serv,i} = W_{trans,i} + W_{fuel,i}$$

Ο χρόνος που το πλοίο θα βρίσκεται στο σύστημα αναμονής:

$$W_{s,i} = W_{free_station,i} + W_{trans,i} + W_{fuel,i}$$

Ο χρόνος από τη στιγμή ένταξης του πλοίου i στο σύστημα αναμονής μέχρι την έναρξη εξυπηρέτησής του, $W_{free_station,i}$ θεωρείται μεταβλητή απόφασης του συστήματος αναμονής και μεταβλητή, ως προς την οποία μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του κέρδους. Πάντως, δε μπορεί να υπερβαίνει το συνολικό διαθέσιμο χρόνο από τη στιγμή ένταξης στο σύστημα αναμονής μέχρι την έναρξη εξυπηρέτησής του $W_{free_station,max,i}$.

Ο χρόνος $W_{free_station,i}$, μπορεί να γίνει μόνο υπό καθορισμένες συνθήκες. Για παράδειγμα, θα πρέπει να έχει καθοριστεί ότι θα χρησιμοποιείται κανόνας προτεραιότητας FIFO (First In First Out) και να είναι επίσης γνωστός ο αριθμός των σταθμών εξυπηρέτησης του συστήματος. Συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιείται κανόνας προτεραιότητας FIFO και υπάρχει μόνο ένας σταθμός εξυπηρέτησης, ο χρόνος ανεύρεσης ελεύθερου σταθμού εξυπηρέτησης για το i πλοίο στην ουρά αναμονής θεωρείται ως το άθροισμα του χρόνου μέχρι να τελειώσει η εξυπηρέτηση του πρώτου πλοίου στην ουρά, που πιθανόν εξυπηρετείται ήδη, συν το χρόνο εξυπηρέτησης των υπόλοιπων πλοίων μετά από αυτό και μέχρι το πλοίο i . Έτσι:

$$W_{free_station,i} = \sum_{\iota=1}^{\iota-1} (W_{trans,i} + W_{fuel,i})$$

Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να γραφεί:

$$W_{s,i} = W_{trans,i} + W_{fuel,i} + \sum_{\iota=1}^{\iota-1} (W_{trans,i} + W_{fuel,i}) = \sum_{\iota=1}^{\iota} (W_{trans,i} + W_{fuel,i})$$

Αν το πλοίο i βρει ελεύθερο σταθμό εξυπηρέτησης, είναι δηλαδή πρώτο στην ουρά αναμονής, ο χρόνος παραμονής του στο σύστημα αναμονής θα είναι:

$$W_{s,1} = W_{trans,i} + W_{fuel,i}$$

Έτσι, αν ακολουθείται κανόνας προτεραιότητας FIFO και υπάρχει μόνο ένας σταθμός εξυπηρέτησης, μπορεί να γραφεί:

$$W_{s,i} = \begin{cases} \sum_{\iota=1}^{\iota-1} (W_{trans,i} + W_{fuel,i}) + W_{trans,i} + W_{fuel,i}, & \sum_{\iota=1}^{\iota-1} (W_{trans,i} + W_{fuel,i}) \leq W_{free_station,max,i} \\ W_{free_station,max,i} & \sum_{\iota=1}^{\iota-1} (W_{trans,i} + W_{fuel,i}) > W_{free_station,max,i} \end{cases}$$

Ο χρόνος μετακίνησης του ανεφοδιαζόμενου πλοίου προς το ελεύθερο αγκυροβόλιο ή του πλοίου bunker προς το ανεφοδιαζόμενο πλοίο, $W_{trans,i}$ θεωρείται συνάρτηση της σχετικής θέσης των δύο, μέσα στο σύστημα αναμονής.

Τέλος, ο χρόνος ανεφοδιασμού του πλοίου, $W_{fuel,i}$, μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της ποσότητας ανεφοδιασμού, Q_{LNG_i} οπότε $W_{fuel,i} = W_{fuel,i}(Q_{LNG_i})$. Μπορεί να γραφεί:

$$W_{fuel,i} = \frac{Q_{LNG_i}}{\dot{Q}_{LNG_i}} = \frac{Q_{LNG_i}}{u_{LNG,coupling} * A_{coupling}}$$

Όπου:

- $u_{LNG,coupling}$, η ταχύτητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσα στο σύνδεσμο μεταφοράς
- $A_{coupling}$, η διατομή του συνδέσμου μεταφοράς

Τελικά, ο χρόνος εξυπηρέτησης ενός πλοίου είναι:

$$W_{serv,i} = W_{trans,i} + W_{fuel,i} = W_{trans,i} + \frac{Q_{LNG_i}}{u_{LNG,coupling} * A_{coupling}}$$

6.2.3 ΕΙΔΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ

Όπως έχει γραφεί προηγουμένως, το συνολικό κέρδος από την παροχή ανεφοδιασμών σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο είναι:

$$G = -C_s + \sum_{balk} (-C_{r,i}) + \sum_{rene} (-C_{w,i} W_{free_station,max,i} - C_{r,i}) + \sum_{\xi\upsilon\pi} (R_i - C_{a,i} - C_{w,i} W_{s,i})$$

Μετά τις παραδοχές της προηγούμενης παραγράφου, μπορεί να γραφεί:

$$G = -C_{s,fixed} - c_s S - \sum_{balk} (C_r(i)) - \sum_{rene} (C_w(i) W_{free_station,max}(i) + C_r(i)) \\ + \sum_{\xi\upsilon\pi} (P_{LNG_i} Q_{LNG_i} - c_{aLNG_i} Q_{LNG_i} - C_w(i) * (W_{free_station}(i) + W_{trans}(i)) \\ + \frac{Q_{LNG_i}}{u_{LNG,coupling} * A_{coupling}})$$

Αν θεωρηθεί ότι:

$$\sum_{i=1}^n x_i = n\bar{x}$$

$$P_{LNG_i} = P_{LNG}$$

$$c_{aLNG_i} = c_{aLNG}$$

μπορεί να γραφεί:

$$G \\ = -C_{s,fixed} - c_s S - N_{balk} \overline{C_{r,balk}} - N_{rene} \overline{C_{rene}} - N_{rene} \overline{C_w(l)_{rene} W_{free_station,max}(l)_{rene}} \\ + (P_{LNG} - c_{aLNG}) \sum_{\xi\upsilon\pi} Q_{LNG_i} \\ + N_{\xi\upsilon\pi} (-C_w(l) * (W_{free_station}(l) + W_{trans}(l)) + \frac{Q_{LNG_l}}{u_{LNG,coupling} * A_{coupling}})$$

Ισχύει:

$$N = N_{\xi\upsilon\pi} + N_{balk} + N_{rene}$$

Το μέγεθος N αφορά το συνολικό αριθμό των πλοίων που θα ζητήσουν ανεφοδιασμό στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο, ενώ το μέγεθος $N_{\xi\upsilon\pi}$ μπορεί να εξαχθεί από το μοντέλο Poisson που προσομοιάζει το σύστημα αναμονής.

Οι μεταβλητές της συνάρτησης συνολικού κέρδους μπορεί να είναι στοχαστικές μεταβλητές, οπότε γράφεται:

$$\begin{aligned}
G = & -C_{s, fixed} - c_s S - N_{balk} C_{r, balk} - N_{rene} C_{r, rene} \\
& - N_{rene} C_w(i)_{rene} W_{free_station, max}(i)_{rene} \\
& + (P_{LNG} - C_{aLNG}) \sum_{\xi\upsilon\pi} Q_{LNG i} + N_{\xi\upsilon\pi} (-C_w(i) * (W_{free_station, (i)} \\
& + W_{trans}(i) + \frac{Q_{LNG i}}{u_{LNG, coupling} * A_{coupling}})
\end{aligned}$$

Σε κάθε χρονική στιγμή λειτουργίας του συστήματος αναμονής, ο αριθμός των πλοίων που έχουν κληθεί να προσεγγίσουν ελεύθερο αγκυροβόλιο ή ανεφοδιάζονται δε μπορεί να ξεπερνά τον αριθμό των σταθμών εξυπηρέτησης του σταθμού ανεφοδιασμού, s .

$$N_{\xi\upsilon\pi}(t) \leq s$$

ενώ, επίσης πρέπει:

$$N = N_{\xi\upsilon\pi} + N_{balk} + N_{rene}$$

6.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Η στοχαστική βελτιστοποίηση του συστήματος ανεφοδιασμού αφορά τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης

$$\begin{aligned}
G = & -C_{s, fixed} - c_s S - N_{balk} C_{r, balk} - N_{rene} C_{rene} \\
& - N_{rene} C_w(i)_{rene} W_{free_station, max}(i)_{rene} \\
& + (P_{LNG} - C_{aLNG}) \sum_{\xi\upsilon\pi} Q_{LNG i} + N_{\xi\upsilon\pi} (-C_w(i) * (W_{free_station, (i)} \\
& + W_{trans}(i) + \frac{Q_{LNG i}}{u_{LNG, coupling} * A_{coupling}})
\end{aligned}$$

Υπό τους περιορισμούς του προβλήματος:

$$N_{\xi\upsilon\pi}(t) \leq s$$

$$N = N_{\xi\upsilon\pi} + N_{balk} + N_{rene}$$

Η βελτιστοποίηση θα μπορούσε να υποδείξει ως συμφέρουσα κάποιες από τις τροποποιήσεις των συστημάτων αναμονής, όπως έχουν περιγραφεί σε προηγούμενη παράγραφο (παράγραφος 4.5) ή τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών που συμμετέχουν στην ανωτέρω εξίσωση.

7 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ

7.1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ

Ο Οργανισμός Λιμένος Πειραιώς αναμένεται να επεξεργαστεί σενάρια που αφορούν στην προώθηση της χρήσης του LNG ως ναυτιλιακού καυσίμου και στην ανάπτυξη της απαραίτητης υποδομής για τη μεταφορά, την αποθήκευση και τελικά, την παροχή του στα πλοία. Σε αυτό το σημείο, γίνεται η κατάρτιση- επεξεργασία ενός τέτοιου σεναρίου με τη χρήση παραδοχών.

7.1.1 ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG

Θεωρείται ότι ως λιμένας εξυπηρέτησης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) θα μπορούσε να οριστεί η Ρεβυθούσα, η οποία βρίσκεται 16 ναυτικά μίλια από τον κεντρικό λιμένα του Πειραιά, μέσα στον κόλπο της Πάχης. Είναι μη κατοικημένο νησί του Σαρωνικού κόλπου με έκταση 1.8 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Ο τερματικός σταθμός LNG της Ρεβυθούσας παρουσιάζεται στην Εικόνα 21.



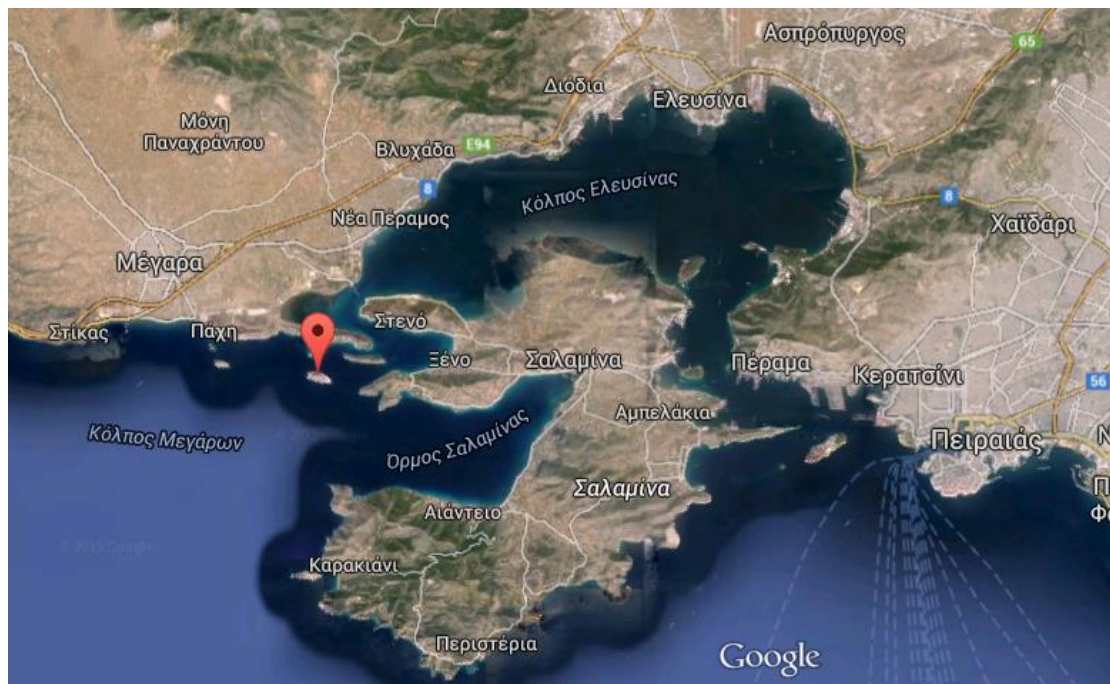
Εικόνα 21: Ο τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας (ιστοσελίδα ΔΕΣΦΑ)

Όπως αναφέρει ο Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (n.d) στα χρόνια λειτουργίας του τερματικού σταθμού έχουν εξυπηρετηθεί δεξαμενόπλοια χωρητικότητας μέχρι $177000m^3$ LNG και μήκους μέχρι 298m. Το αγκυροβόλιο του λιμένα μπορεί να εξυπηρετήσει πλοία μέχρι 290m μήκους και 11.5m βάθους.

Επίσης, σύμφωνα με το Διαχειριστή Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (n.d), ο τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας διαθέτει ήδη δύο δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας $130000 m^3$, στις οποίες αποθηκεύονται προσωρινά τα παραλαμβανόμενα φορτία υγροποιημένου φυσικού αερίου, και μέχρι να οδηγηθούν στις εγκαταστάσεις αεριοποίησης του σταθμού. Μία τρίτη δεξαμενή χωρητικότητας $95000 m^3$ ήδη έχει μελετηθεί και κατασκευάζεται. Η δυναμικότητα αεριοποίησης, μετά και τη θέση σε λειτουργία και αυτής της δεξαμενής, θα είναι $1400 m^3/h$.

7.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΠΛΟΙΩΝ

Η θέση της νήσου Ρεβυθούσας παρουσιάζεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Θέση νήσου Ρεβυθούσας

Λόγω της απόστασής της από τον Πειραιά και των στενών στον κόλπο της Πάχης, θεωρείται ότι τα πλοία που ζητούν ανεφοδιασμό θα εξυπηρετούνται από πλοία bunker, σε αγκυροβόλια στο λιμένα Πειραιώς. Τα μόνα πλοία που θα αγκυροβολούν στη Ρεβυθούσα θα είναι τα πλοία, τα οποία μεταφέρουν το προς αεριοποίηση LNG. Συντονιστής του ανεφοδιασμού των πλοίων στο λιμένα Πειραιώς θεωρείται ο Οργανισμός Λιμένος Πειραιώς (ΟΛΠ).

7.2 ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ LNG ΤΟΥ ΟΛΠ

Μετά τις παραδοχές για το σύστημα ανεφοδιασμού του ΟΛΠ, εξειδικεύεται η προτεινόμενη μεθοδολογία μοντελοποίησης των συστημάτων ανεφοδιασμού πλοίων.

7.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ

Όπως έχει γραφεί στην προτεινόμενη μεθοδολογία:

$$G = -C_s + \sum_{balk} (-C_{r,i}) + \sum_{renew} (-C_{w,i} W_{free_station,max,i} - C_{r,i}) + \sum_{εξυπ} (R_i - C_{a,i} - C_{w,i} W_{s,i})$$

Συμβολίζονται:

- G , το συνολικό κέρδος από τη διάθεση εξυπηρετήσεων σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο
- C_s , το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος τη δεδομένη χρονική στιγμή
- R_i , η χρηματική είσπραξη από την εξυπηρέτηση του πελάτη i
- $C_{a,i}$, το μεταβλητό κόστος εξυπηρέτησης του πελάτη i
- $C_{w,i}$, το κόστος παραμονής του πελάτη i στο σύστημα αναμονής ανά μονάδα χρόνου
- $C_{r,i}$, το κόστος αποχωρήσεως του πελάτη i από το σύστημα αναμονής
- $W_{free_station,max,i}$, ο μέγιστος χρόνος που είναι διατεθειμένος ο πελάτης i να περιμένει στην ουρά αναμονής του συστήματος, μέχρι να βρεθεί ελεύθερος σταθμός για την εξυπηρέτησή του
- $W_{s,i}$, ο συνολικός χρόνος αναμονής του πελάτη i στο σύστημα αναμονής

7.2.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ

Παραδοχή για τη ζήτηση LNG το έτος 2020

Σύμφωνα με τον Ζαχαριουδάκη (2014), η αναμενόμενη ζήτηση LNG στο λιμένα Πειραιώς το 2020, δίνεται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Αναμενόμενη ζήτηση LNG στο λιμένα Πειραιώς τα 2020 (Ζαχαριουδάκης, 2014)

τύπος πλοίου	αριθμός αφίξεων το 2020	μέση ποσότητα ανεφοδιασμού (m ³)	ποσοστό του στόλου που χρησιμοποιεί LNG	ποσοστό κλήσεων με ζήτηση LNG	αριθμός ανεφοδιασμών το 2020	ετήσια ζήτηση LNG 2020 (m ³)
μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	1355	92	0.39	0.6	314	29018.9
μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	697	202	0.48	0.6	201	40547.35
μικρά πλοία κρουαζιέρας	292	143	0.48	0.6	84	12053.3
μεγάλα πλοία κρουαζιέρας	428	450	0.71	0.6	202	91024.25
μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	395	77	0.53	0.6	125	9618.18
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη	708	189	1	1	708	133569.18
μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	1132	44	0.74	1	836	36630.06
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	756	59	0.77	1	580	34052.6
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο	408	132	0.74	1	300	39749.7
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα	274	242	1	1	274	66237.46

Παραδοχή για το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος

Το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος εξυπηρέτησης ανά μονάδα χρόνου, C_s , έχει προηγουμένως θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι ανεξάρτητη του σταθμού εξυπηρετητών, έστω $C_{s, fixed}$, ενώ η δεύτερη είναι ανάλογη του αριθμού εξυπηρετητών, s . Μπορεί να γραφεί:

$$C_s = C_{s,fixed} + c_s s$$

όπου $C_{s,fixed}$, η ανεξάρτητη του σταθμού εξυπηρετητών συνιστώσα του κόστους και c_s , το σταθερό κόστος διαθέσεως κάθε εξυπηρετητή.

Στην περίπτωση της Ρεβυθούσας, μπορεί να υποτεθεί ότι το κόστος των δεξαμενών και το κόστος του αγκυροβολίου στη νήσο, όπου θα δένει το πλοίο μεταφοράς LNG από τη χώρα παραγωγής είναι μηδενικά, αφού υπάρχουν ήδη. Το σύστημα ανεφοδιασμού θα επιβαρυνθεί με το κόστος του πλοίου μεταφοράς LNG από τη χώρα παραγωγής, και την αγορά πλοίων bunker.

Το πλοίο μεταφοράς LNG από τη χώρα παραγωγής θεωρείται ότι θα έχει χωρητικότητα δεξαμενών, ίση με τη μέση μηνιαία ζήτηση, περίπου $45000m^3$. Η απόσταση από τον Πειραιά σε κάποιο από τα κοντινά λιμάνια των παραγωγών LNG χωρών διαρκεί περίπου 10 ημέρες. Ο ανεφοδιασμός όλων των πλοίων θεωρείται ότι πρέπει να αρχίζει και να τελειώνει στον ίδιο σταθμό εξυπηρέτησης. Τα πλοία bunker θεωρείται ότι θα έχουν χωρητικότητα δεξαμενών, ίση με τη μέγιστη ζήτηση LNG από κάποιο πλοίο, έστω $500m^3$.

Τα κόστη κτήσεως νέων πλοίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Κόστος κτήσεως νέων πλοίων

Εξοπλισμός	Αξία κτήσης (10^6 \$)
Πλοίο ανεφοδιασμού δεξαμενών χωρητικότητας $45000m^3$	40
Πλοίο bunker χωρητικότητας δεξαμενών $500 m^3$	1.5

Υποτίθεται ότι όλα τα πλοία έχουν λογιστική διάρκεια ζωής τα 20 έτη.

Το κόστος διαθέσεως για καθένα από τα πλοία παρουσιάζεται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Ετήσιο κόστος διαθέσεως πλοίων

Εξοπλισμός	Ετήσιο κόστος διαθέσεως (\$)
Πλοίο ανεφοδιασμού δεξαμενών χωρητικότητας $45000m^3$	2000000
πλοίο bunker χωρητικότητας δεξαμενών $500 m^3$	75000

Υποτίθεται ότι το κόστος συντήρησης της έως τώρα εγκατάστασης, είναι 4000000 \$ ετησίως. Το ετήσιο κόστος συντήρησης του πλοίου ανεφοδιασμού των δεξαμενών και των πλοίων bunker θεωρείται ίσο με το 10% του ετήσιου κόστους διαθέσεώς τους.

Το συνολικό σταθερό κόστος διαθέσεως υπολογίζεται ως:

$$C_s = \text{ετήσιο κόστος διαθέσεως πλοίου ανεφοδιασμού δεξαμενών} \\ + \text{ετήσιο κόστος διαθέσεως πλοίων bunker} \\ + \text{ετήσιο κόστος διαθέσεως υπάρχουσας εγκατάστασης} \\ + 10\% \text{ ετήσιου κόστους διαθέσεως νέου εξοπλισμού} \rightarrow$$

$$C_s = 2000000\$ + 75000\$ * s + 400000\$ + 10\% * (2000000\$ + 75000\$ * s) \rightarrow$$

$$C_s = 2600000\$ + 82500\$ * s$$

όπου s , ο αριθμός των πλοίων bunker που θα χρησιμοποιηθούν.

Για παράδειγμα, το σταθερό κόστος διαθέσεως του συστήματος αναμονής με την προσθήκη ενός πλοίου ανεφοδιασμού δεξαμενών χωρητικότητας $45000 m^3$ και ενός πλοίου bunker χωρητικότητας δεξαμενών $500 m^3$, υπολογίζεται σε $2682500\$$.

Παραδοχή για τη χρηματική είσπραξη από κάθε πελάτη

Η χρηματική είσπραξη από τον πελάτη i θεωρείται ανάλογη του αριθμού κυβικών μέτρων LNG, τα οποία ανεφοδιάζεται. Δηλαδή:

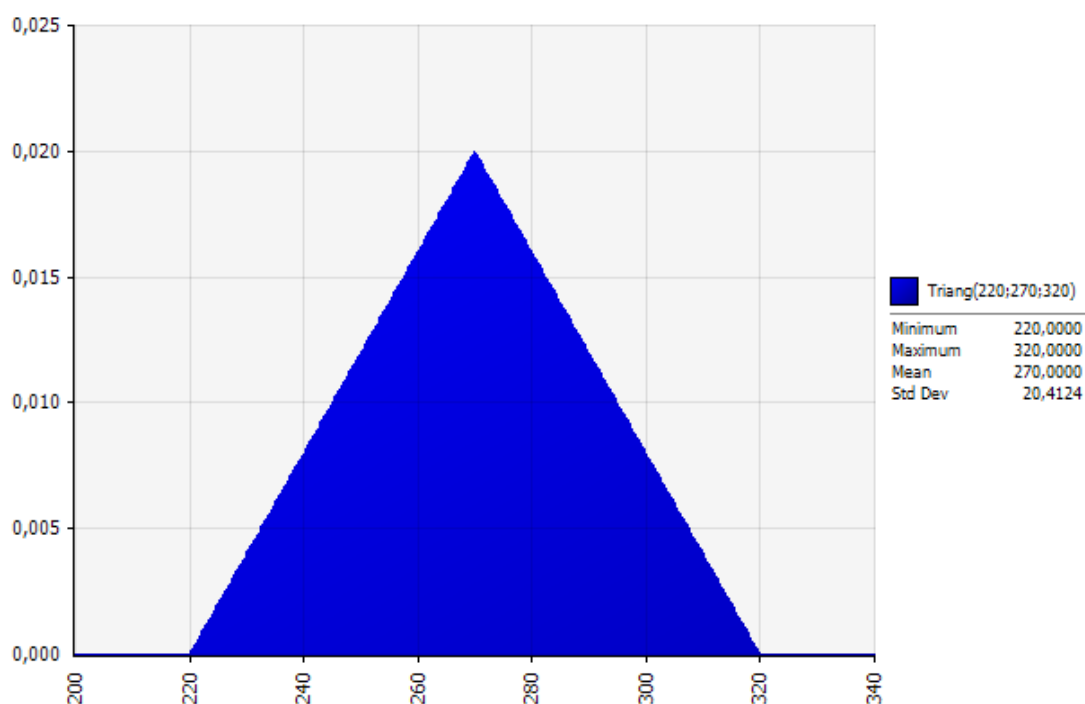
$$R_i = P_{LNG_i} Q_{LNG_i}$$

όπου:

- P_{LNG_i} , η τιμή παροχής του LNG στον πελάτη i ανά κυβικό μέτρο ($\$/m^3$)
- Q_{LNG_i} , η ζήτηση LNG του πελάτη i σε κυβικά μέτρα (m^3)

Σύμφωνα με το Germanischer Lloyd και τη MAN (2013), η τιμή παροχής του LNG θα είναι $13.0 \$/mmBTU$.

Για τη στοχαστική μοντελοποίηση, θα υποτεθεί ότι η στοχαστική μεταβλητή της τιμής παροχής LNG στον πελάτη αναπαρίσταται από την τριγωνική πιθανοτική κατανομή $triang(220 \$/m^3, 270 \$/m^3, 320 \$/m^3)$. Η πιθανοτική κατανομή παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Πιθανοτική κατανομή τιμής παροχής LNG ανά κυβικό μέτρο

Παραδοχή για το μεταβλητό κόστος εξυπηρέτησης κάθε πελάτη

Το μεταβλητό κόστος για την εξυπηρέτηση του πελάτη i , $C_{a,i}$, θεωρείται ανάλογο του αριθμού κυβικών μέτρων LNG, τα οποία ανεφοδιάζεται

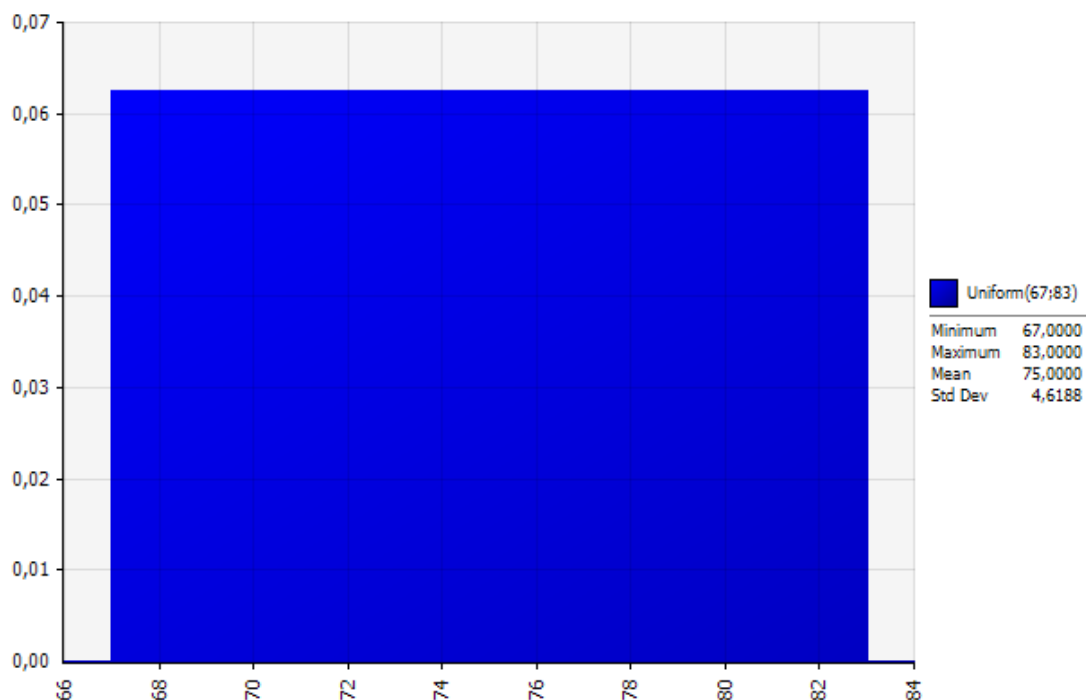
$$C_{a,i} = c_{aLNGi} Q_{LNGi}$$

όπου:

- c_{aLNGi} , το κόστος παροχής LNG στον πελάτη i ανά κυβικό μέτρο ($\$/m^3$)
- Q_{LNGi} , η ζήτηση LNG του πελάτη i σε κυβικά μέτρα (m^3)

Σύμφωνα με το Germanischer Lloyd και τη MAN (2011), το κόστος παροχής LNG από τους λιμένες θα είναι 4.0 $\$/mmBTU$, συνυπολογιζόμενων των κόστων διαμετακόμισης, περίπου δηλαδή $83\$/m^3$.

Για τη μελέτη περίπτωσης, θα υποτεθεί ότι μπορεί να υπάρξει μείωση του κόστους παροχής LNG έως 10%. Το κόστος παροχής LNG στον πελάτη αναπαρίσταται από την ομοιόμορφη πιθανοτική κατανομή $uniform(67\$/m^3, 83\$/m^3)$. Η πιθανοτική κατανομή παρουσιάζεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Πιθανοτική κατανομή κόστους παροχής LNG ανά κυβικό μέτρο

Παραδοχή για το κόστος παραμονής στο σύστημα αναμονής κάθε πελάτη

Το ανά μονάδα χρόνου κόστος παραμονής πελάτη του πελάτη i , $C_{w,i}$, στο σύστημα αναμονής θεωρείται εν γένει ότι χαρακτηρίζει τον πελάτη i

$$C_{w,i} = C_w(i)$$

Για τη μελέτη περίπτωσης, υποτίθεται ότι το κόστος παραμονής πελάτη στο σύστημα αναμονής είναι ίδιο για όλους τους πελάτες κάποιας κατηγορίας πλοίων, και δίνεται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Κόστος παραμονής πλοίου στο σύστημα αναμονής, ανά κατηγορία πλοίου

Κατηγορία πλοίου	Κόστος παραμονής πλοίου (\$/hr)
Μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	5000
μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	10000
μικρά πλοία κρουαζιέρας	5000
μεγάλα πλοία κρουαζιέρας	10000
μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	5000
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη	2000
μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	2000
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	2000
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο	2000
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα	2000

Παραδοχή για το κόστος αποχωρήσεως κάθε πελάτη

Το κόστος αποχωρήσεως του πελάτη i , $C_{r,i}$, από το σύστημα αναμονής θεωρείται εν γένει ότι χαρακτηρίζει τον πελάτη i

$$C_{r,i} = C_r(i)$$

Για τη μελέτη περίπτωσης, υποτίθεται ότι μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το καθαρό κέρδος που θα προέκυπτε από ορισμένο αριθμό εξυπηρετήσεων με μηδενικό κόστος αναμονής, για κάθε κατηγορία πλοίου. Ο αριθμός των χαμένων εξυπηρετήσεων, ανά κατηγορία πλοίου δίνεται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Κόστος παραμονής πλοίου στο σύστημα αναμονής, ανά κατηγορία πλοίου

Κατηγορία πλοίου	Αριθμός χαμένων εξυπηρετήσεων
Μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	10
μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	10
μικρά πλοία κρουαζιέρας	10
μεγάλα πλοία κρουαζιέρας	10
μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	10
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη	2
μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	2
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	2
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο	2
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα	2

Τελικά, θεωρείται ότι

Κόστος αποχώρησης πλοίου

= Αριθμός χαμένων εξυπηρετήσεων * μέσο καθαρό κέρδος →

$C_{r,i} = \text{Αριθμός χαμένων εξυπηρετήσεων} * \text{μέσο καθαρό κέρδος} \rightarrow$

$C_{r,i} = \text{Αριθμός χαμένων εξυπηρετήσεων} * (R_i - C_{a,i}) \rightarrow$

$C_{r,i} = \text{Αριθμός χαμένων εξυπηρετήσεων} * (P_{LNG_i} - c_{a_{LNG_i}}) Q_{LNG_i}$

Η μέση ποσότητα LNG, με την οποία ανεφοδιάζεται κάθε κατηγορία πλοίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 17: Μέση ποσότητα ανεφοδιασμού LNG, ανά κατηγορία πλοίου

Κατηγορία πλοίου	Q_{LNG_i}
Μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	92
μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	202
μικρά πλοία κρουαζιέρας	143
μεγάλα πλοία κρουαζιέρας	450
μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	77
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη	189
μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	44
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	59
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο	132
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα	242

Αν υποθεθεί ότι $P_{LNG_i} = 270 \frac{\$}{m^3}$ και $c_{a_{LNG_i}} = 75 \frac{\$}{m^3}$, το κόστος αποχωρήσεως για κάθε κατηγορία πλοίου δίνεται τελικά, στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18: Κόστος αποχωρήσεως πλοίου, ανά κατηγορία πλοίου

Κατηγορία πλοίου	$C_{r,i}$ (\$)
Μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	179400
μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	393900
μικρά πλοία κρουαζιέρας	278850
μεγάλα πλοία κρουαζιέρας	877500
μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	150150
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη	73710
μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	17160
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	23010
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο	51480
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα	94380

Παραδοχή για το μέγιστο διαθέσιμο χρόνο παραμονής πελάτη στην ουρά

Ο μέγιστος διαθέσιμος χρόνος παραμονής κάποιου πελάτη στην ουρά αναμονής, μέχρι την έναρξη της εξυπηρέτησής του, χαρακτηρίζει εν γένει τον πελάτη i .

$$W_{free_station,max,i} = W_{free_station,max}(i)$$

Για τη μελέτη περίπτωσης, γίνεται η παραδοχή ότι:

$$W_{free_station,max,i} = 0$$

Αυτό μπορεί να γίνει με ρήτρα συμβολαίων για εύρεση ελεύθερου σταθμού εξυπηρέτησης όταν το πλοίο φτάσει στο σύστημα αναμονής.

Παραδοχή για το χρόνο παραμονής στο σύστημα κάθε πελάτη

Ο χρόνος παραμονής του πλοίου στο σύστημα αναμονής έχει υποτεθεί στην προτεινόμενη μεθοδολογία, ως:

$$W_{s,i} = W_{free_station,i} + W_{trans,i} + W_{fuel,i}$$

Όπου:

- ο χρόνος ανεύρεσης ελεύθερου σταθμού εξυπηρέτησης, $W_{free_station,i}$, θεωρείται τώρα μηδενικός αφού:

$$W_{free_station,max,i} = 0$$

ο χρόνος μετακίνησης του πλοίου bunker προς το ανεφοδιαζόμενο πλοίο, $W_{trans,i}$ θεωρείται συνάρτηση της σχετικής θέσης των δύο, μέσα στο σύστημα αναμονής. Όταν για τα πλοία bunker δεν έχουν καθοριστεί συγκεκριμένες θέσεις- περιοχές ευθύνης μέσα στο σύστημα αναμονής θεωρείται:

$$\overline{W_{trans}} = 0.5hr$$

- ο χρόνος ανεφοδιασμού του πλοίου, $W_{fuel,i}$, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$W_{fuel,i} = \frac{Q_{LNGi}}{\dot{Q}_{LNGi}} = \frac{Q_{LNGi}}{u_{LNG,coupling} * A_{coupling}}$$

- $u_{LNG,coupling}$, η ταχύτητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσα στο σύνδεσμο μεταφοράς
- $A_{coupling}$, η διατομή του συνδέσμου μεταφοράς

Σύμφωνα με τη Mann Tek (n.d), η προτεινόμενη μέγιστη ταχύτητα ανεφοδιασμού είναι 15 m/s ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύνδεσμος 6". Έτσι:

$$W_{fuel,i} = \frac{Q_{LNGi}}{15 \frac{m}{s} \pi \frac{0.1524^2 m^2}{4}} = \frac{Q_{LNGi}}{15 \frac{m}{s} \pi \frac{0.1524^2 m^2}{4}} \cong \frac{Q_{LNGi}}{313.55 \frac{m^3}{h}}$$

Τελικά:

$$W_{s,i} = W_{trans,i} + \frac{Q_{LNGi}}{313.55 \frac{m^3}{h}}$$

7.2.3 ΕΙΔΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ

Η γενική συνάρτηση κέρδους έχει προηγουμένως γραφεί:

$$G = -C_s + \sum_{balk} (-C_{r,i}) + \sum_{rene} (-C_{w,i} W_{free_station,max,i} - C_{r,i}) + \sum_{εξυπ} (R_i - C_{a,i} - C_{w,i} W_{s,i})$$

Μετά τις παραδοχές της προηγούμενης παραγράφου, η ειδική συνάρτηση κέρδους, μπορεί να γραφεί ως:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + \sum_{balk} (-C_{r,i}) + \sum_{εξυπ} ((P_{LNG_i} - c_{a_{LNG_i}}) Q_{LNG_i} - C_{w,i} (W_{trans,i} + \frac{Q_{LNG_i}}{313.55 \frac{m^3}{h}}))$$

Αν θεωρηθεί ότι:

$$\sum_{i=1}^n x_i = n\bar{x}$$

η ειδική συνάρτηση κέρδους μπορεί να γραφεί:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + N_{balk} (-\bar{C}_r) + N_{εξυπ} \overline{((P_{LNG} - c_{a_{LNG}}) Q_{LNG} - C_w (W_{trans} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}}))} \rightarrow$$

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + N_{balk} (-\bar{C}_r) + N_{εξυπ} \overline{(P_{LNG} - c_{a_{LNG}}) Q_{LNG}} - N_{εξυπ} \overline{C_w (W_{trans} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})} \rightarrow$$

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + N_{balk} (-\bar{C}_r) + N_{εξυπ} \overline{(P_{LNG} - c_{a_{LNG}})} * \overline{Q_{LNG}} - N_{εξυπ} \overline{C_w} * \overline{(W_{trans} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})} \rightarrow$$

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + N_{balk} (-\bar{C}_r) + N_{εξυπ} (\overline{P_{LNG}} - \overline{c_{a_{LNG}}}) * \overline{Q_{LNG}} - N_{εξυπ} \overline{C_w} * (\overline{W_{trans}} + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}}) \rightarrow$$

Επειδή:

$$N_{εξυπ} = P_{εξυπ} N$$

Και

$$N_{balk} = (1 - P_{εξυπ})N$$

Προκύπτει τελικά:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + (1 - P_{εξυπ})N(-\overline{C_r}) + P_{εξυπ}N(\overline{P_{LNG}} - \overline{c_{aLNG}}) * \overline{Q_{LNG}} - P_{εξυπ}N * \overline{C_w} * (\overline{W_{trans}} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Η πιθανότητα εξυπηρέτησης $P_{εξυπ}$ δίνεται από την ανάλυση με μοντέλα Poisson. Επειδή θεωρείται πως αν ο $s + 1$ πελάτης στην ουρά αναμονής δε βρει ελεύθερο σταθμό εξυπηρέτησης θα αποχωρήσει, ισχύει:

$$P_{εξυπ} = P_0 + P_1 + \dots + P_s$$

Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι συνάρτηση του ρυθμού αφίξεων λ , του ρυθμού εξυπηρετήσεων μ και του αριθμού σταθμών εξυπηρέτησης s , $P_{εξυπ} = P_{εξυπ}(s, \lambda, \mu)$. Ο ρυθμός εξυπηρετήσεων είναι το άθροισμα του χρόνου μετακίνησης του πλοίου bunker προς το προς ανεφοδιασμό πλοίο. Συγκεκριμένα, ο χρόνος παραμονής στο σύστημα έχει καθοριστεί ως:

$$W_{s,i} = W_{trans,i} + \frac{Q_{LNGi}}{313.55 \frac{m^3}{h}}$$

Επομένως, ο ρυθμός εξυπηρετήσεων:

$$\mu = \frac{24h}{\overline{W_{trans}} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}}} \text{ ανεφοδιασμοί/ημέρα}$$

Ενώ ο αριθμός αφίξεων μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\lambda = \frac{\text{αριθμός αφίξεων σε ένα έτος}}{360 \text{ ημέρες}} = \frac{N}{360}$$

Επίσης, υπολογίζεται:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{N}{360}}{\frac{24h}{\overline{W_{trans}} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}}}} = \frac{N[\overline{W_{trans}} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}}]}{8640h}$$

Τελικά:

$$G = G(s, N, \overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}, \overline{P_{LNG}}, \overline{c_{aLNG}}, \overline{W_{trans}})$$

Οι υποθέσεις, που έχουν προηγηθεί, για τα μεγέθη της ανωτέρω εξίσωσης $N, \overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}$ συνοψίζονται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 19: Μεγέθη συνάρτησης κέρδους- Μέσες τιμές

τύπος πλοίου	αριθμός ανεφοδιασμών το 2020 (N)	Q_{LNG}	C_w (\$/hr)	C_r (\$)
μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	314	92	5000	179400
μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	201	202	10000	393900
μικρά πλοία κρουαζιέρας	84	143	5000	278850
μεγάλα πλοία κρουαζιέρας	202	450	10000	877500
μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	125	77	5000	150150
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη	708	189	2000	73710
μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	836	44	2000	17160
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες	580	59	2000	23010
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο	300	132	2000	51480
μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα	274	242	2000	94380

Στο σύστημα αναμονής, μπορεί να συμμετέχουν όλες από τις παραπάνω κατηγορίες πλοίων, ή να επιλεγεί ο αποκλεισμός κάποιων ώστε να αυξηθεί το επίπεδο εξυπηρέτησης για τις υπόλοιπες.

Τα βήματα υπολογισμού των παραμέτρων $N, \overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}$ είναι:

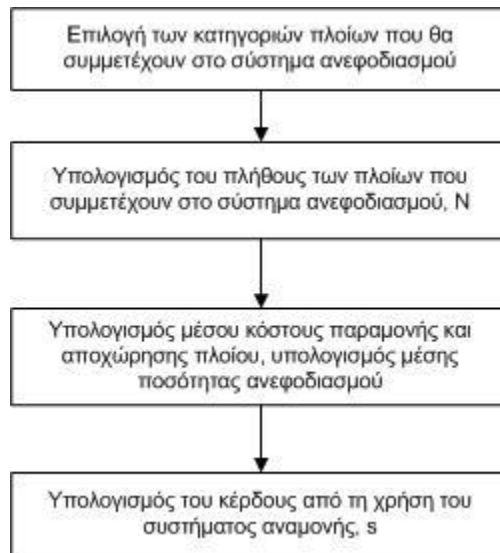
1. Επιλογή κατηγοριών πλοίων που θα μπορούν να ανεφοδιαστούν από το σύστημα ανεφοδιασμού- η μη συμμετοχή των υπολοίπων πλοίων θεωρείται ότι έχει μηδενικό κόστος
2. Υπολογισμός παραμέτρου N , δηλαδή του πλήθους των πλοίων που θα συμμετάσχουν στο σύστημα αναμονής
3. Υπολογισμός των παραμέτρων $\overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}$ ως:

$$\overline{C_r} = \frac{\sum C_r}{N}$$

$$\overline{C_w} = \frac{\sum C_w}{N}$$

$$\overline{Q_{LNG}} = \frac{\sum Q_{LNG_i}}{N}$$

Η διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Υπολογισμός μεγεθών ειδικής συνάρτησης κέρδους

Αν επιλεγεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων του Πίνακα 19, θα προκύψουν:

$$N = 3624$$

$$\bar{C}_r = 131383.80\$$$

$$\bar{C}_w = 3322.57\$/hr$$

$$\bar{Q}_{LNG} = 135.97 \text{ m}^3 / \text{ανεφοδιασμός}$$

Ενώ αν επιλεγεί ο αποκλεισμός των πλοίων, με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο, θα είναι:

$$N = 3324$$

$$\bar{C}_r = 138595.40\$$$

$$\bar{C}_w = 3441.94\$/hr$$

$$\bar{Q}_{LNG} = 136.33 \text{ m}^3 / \text{ανεφοδιασμός}$$

7.2.4 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Η στοχαστική βελτιστοποίηση του συστήματος ανεφοδιασμού αφορά τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης κέρδους

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + (1 - P_{\xi_{\text{υπ}}})N(-\bar{C}_r) + P_{\xi_{\text{υπ}}}N\bar{Q}_{LNG}(\bar{P}_{LNG} - \bar{c}_{aLNG} - \bar{C}_w W_{trans} + \frac{\bar{C}_w}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Υπό τους περιορισμούς του προβλήματος:

$$N_{εξυπ}(t) \leq s$$

$$N = N_{εξυπ} + N_{balk}$$

Είναι:

$$G = G(s, N, \overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}, \overline{P_{LNG}}, \overline{c_{aLNG}}, \overline{W_{trans}})$$

Φαίνεται ότι κάποιες από τις μεταβλητές του συστήματος αναμονής είναι εξωτερικές αυτού, όπως είναι οι μεταβλητές, $\overline{P_{LNG}}, \overline{c_{aLNG}}$ ενώ άλλες μπορούν να βελτιστοποιηθούν, όπως είναι οι μεταβλητές $s, N, \overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}, \overline{W_{trans}}$.

Από αυτές:

- Ο αριθμός εξυπηρετητών, s , είναι σύνθηρης σχεδιαστική παράμετρος ενός συστήματος αναμονής
- Ο αριθμός πλοίων που προσεγγίζουν το λιμένα, N , είναι σχεδιαστική παράμετρος του συστήματος αναμονής και μπορεί να σημάνει τον αποκλεισμό κάποιων ομάδων χρηστών από το σύστημα
- Οι παράμετροι $\overline{C_r}, \overline{C_w}, \overline{Q_{LNG}}$ είναι άμεσα συνυφασμένες με την επιλογή πελατών αφού:

$$\overline{C_r} = \frac{\sum C_r}{N}$$

$$\overline{C_w} = \frac{\sum C_w}{N}$$

$$\overline{Q_{LNG}} = \frac{\sum Q_{LNGi}}{N}$$

- Η παράμετρος $\overline{W_{trans}}$ εξαρτάται από τη σχετική θέση πλοίων bunker και ανεφοδιαζόμενου πλοίου μέσα στο σύστημα αναμονής.

Η στοχαστική βελτιστοποίηση του συστήματος ανεφοδιασμού s πλοίων bunker αφορά στην επιλογή εξυπηρέτησης εκείνων των ομάδων πλοίων, ώστε να μεγιστοποιείται κάποια παράμετρος της συνάρτησης κέρδους, όπως για παράδειγμα η μέγιστη ή η μέση τιμή. Επειδή οι κατηγορίες των πλοίων είναι 10, υπάρχουν 2^{10} σενάρια, για τη συμμετοχή των διαφόρων κατηγοριών πλοίων, στο σύστημα ανεφοδιασμού.

Στα επόμενα, παρουσιάζονται δύο σενάρια ζήτησης και επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της μέσης τιμής της πιθανοτικής κατανομής κέρδους.

7.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΖΗΤΗΣΗΣ

Για τη στοχαστική ανάλυση με μοντέλα Poisson, θα χρησιμοποιηθούν πιθανοτικές κατανομές για τα μεγέθη της αντικειμενικής συνάρτηση κέρδους, που έχει περιγραφεί ως:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * s + (1 - P_{εξυπ})N(-\bar{C}_r) + P_{εξυπ}N(\bar{P}_{LNG} - \bar{c}_{aLNG}) * \bar{Q}_{LNG} - P_{εξυπ}N * \bar{C}_w * (\bar{W}_{trans} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Συγκεκριμένα, θα υποθεθούν:

- $\bar{P}_{LNG} = \text{triang}(220 \$/m^3, 270 \$/m^3, 320 \$/m^3)$
- $\bar{c}_{aLNG} = \text{uniform}(67 \$/m^3, 83 \$/m^3)$
- $\bar{Q}_{LNG} = \text{uniform}(90\% * \bar{Q}_{ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ}, 110\% * \bar{Q}_{ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ})$

7.3.1 ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Με τη χρήση ενός σταθμού εξυπηρέτησης, το κέρδος από το σύστημα ανεφοδιασμού το 2020, θα είναι:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * 1 + (1 - P_{εξυπ})N(-\bar{C}_r) + P_{εξυπ}N(\bar{P}_{LNG} - \bar{c}_{aLNG}) * \bar{Q}_{LNG} - P_{εξυπ}N * \bar{C}_w * (\bar{W}_{trans} + \frac{Q_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Για την πιθανότητα εξυπηρέτησης, ισχύει:

$$P_{εξυπ} = P_0 + P_1$$

Σύμφωνα με το μοντέλο Poisson (M/M/1):(GD/∞/∞), ισχύουν:

$$P_0 = 1 - \rho$$

και

$$P_1 = (1 - \rho)\rho$$

Άρα:

$$P_{εξυπ} = 1 - \rho + (1 - \rho)\rho = (1 - \rho)(1 + \rho) = 1 - \rho^2$$

Επίσης, ισχύει:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{N}{360}}{24h} = \frac{N[\overline{W_{trans}} + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}}]}{8640h}$$

$$\frac{\overline{W_{trans}} + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}}}{313.55 \frac{m^3}{h}}$$

Τελικά, μπορεί να γραφεί:

$$G = -2682500\$ + \rho^2 N(-\overline{C_r}) + (1 - \rho^2) N(\overline{P_{LNG}} - \overline{c_{aLNG}}) * \overline{Q_{LNG}} - (1 - \rho^2) N * \overline{C_w}$$

$$* (\overline{W_{trans}} + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

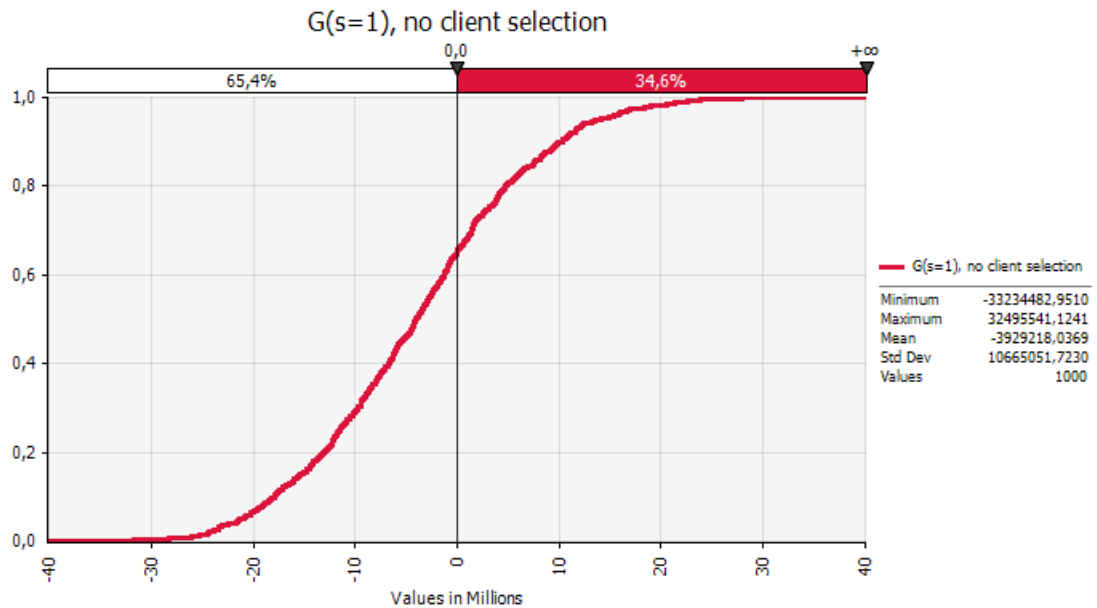
Αν επιλεγεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων, που ζητούν ανεφοδιασμό, θα είναι:

- $\overline{W_{trans}} = 0.5h$
- $N = 3624$
- $\overline{C_r} = 131383.80\$$
- $\overline{C_w} = 3322.57\$/hr$
- $\overline{Q_{LNG}} = uniform(90\% * 135.97m^3, 110\% * 135.97m^3) \rightarrow$

$$\overline{Q_{LNG}} = uniform(122.37m^3, 149.57m^3)$$

- $\rho = \frac{3624 * \left[0.5h + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}} \right]}{8640h} = \frac{1812h + 11.56 \frac{h}{m^3} * \overline{Q_{LNG}}}{8640h} \rightarrow$
- $\rho = 0.2097 + 0.0013 * uniform(122.37m^3, 149.57m^3)$
- $\overline{P_{LNG}} = triang(220 \$/m^3, 270 \$/m^3, 320 \$/m^3)$
- $\overline{c_{aLNG}} = uniform(67 \$/m^3, 83 \$/m^3)$

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με ένα σταθμό εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, δίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=1)

Όπως φαίνεται, αν επιλεχθεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων, υπάρχει πιθανότητα ζημίας για το σύστημα ανεφοδιασμού, ίση με περίπου 65%. Αυτό οφείλεται στο ότι η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι περίπου 85% και επομένως, περίπου 1 στα 7 πλοία θα αποχωρεί από το σύστημα ανεφοδιασμού.

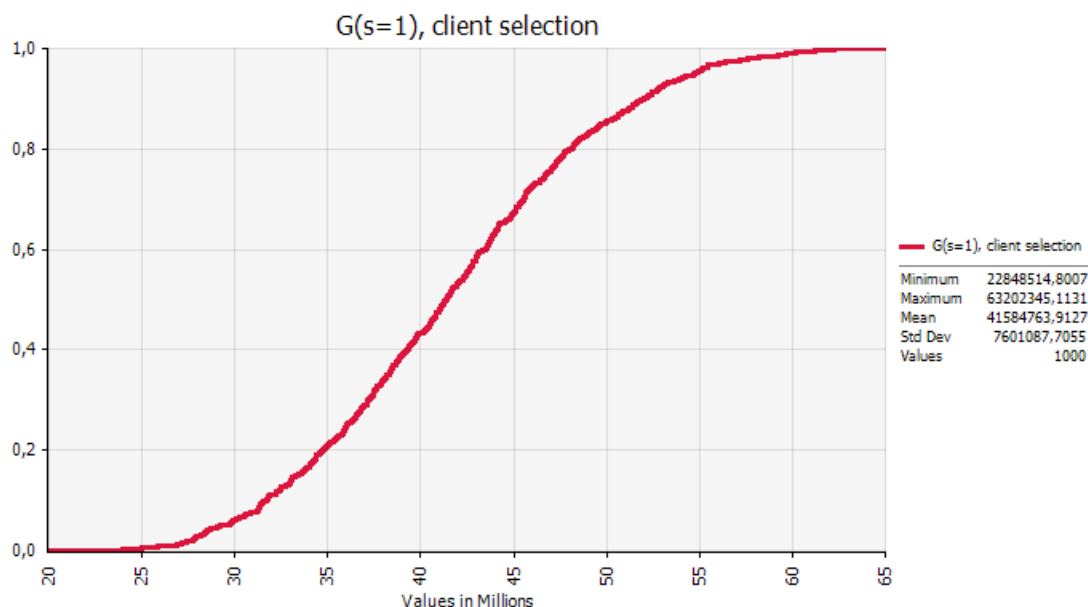
Η στοχαστική βελτιστοποίηση υποδεικνύει πως η μέση τιμή του κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού μπορεί να μεγιστοποιηθεί αν αποκλειστούν από αυτό:

- τα μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
- τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
- τα μικρά πλοία κρουαζιέρας
- τα μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων
- τα μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες

και εξυπηρετούνται μόνο:

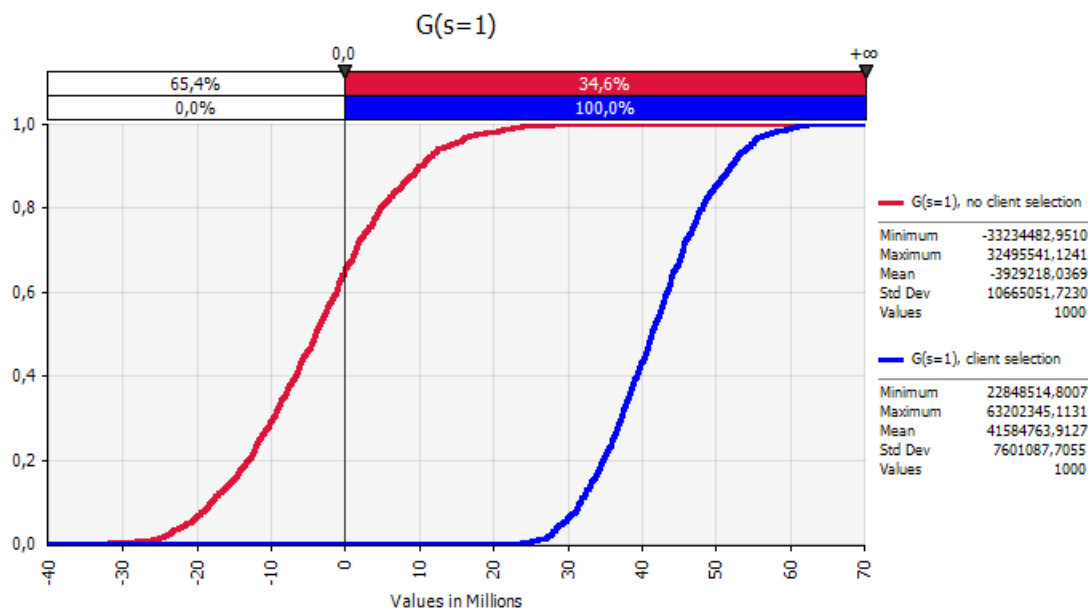
- τα μεγάλα πλοία κρουαζιέρας
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με ένα σταθμό εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=1)

Φαίνεται πως, μετά την επιλογή των συγκεκριμένων κατηγοριών πελατών προς εξυπηρέτηση από το σύστημα ανεφοδιασμού, δεν υπάρχει πιθανότητα ζημίας ενώ το μέσο προσδοκώμενο κέρδος είναι περίπου 41500000\$. Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=1)

Στην περίπτωση, που επιλεχθεί να χρησιμοποιηθεί ένας σταθμός εξυπηρέτησης, για παράδειγμα λόγω περιορισμών ως προς το αρχικό κόστος επένδυσης, η μέση τιμή του κέρδους μεγιστοποιείται αν αποκλειστούν οι προαναφερόμενες κατηγορίες πλοίων- πελατών από το σύστημα.

7.3.2 ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Με τη χρήση δύο σταθμών εξυπηρέτησης, το κέρδος από το σύστημα ανεφοδιασμού το 2020, θα είναι:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * 2 + (1 - P_{\varepsilon\xi\upsilon\pi})N(-\overline{C}_r) + P_{\varepsilon\xi\upsilon\pi}N(\overline{P}_{LNG} - \overline{c}_{aLNG}) * \overline{Q}_{LNG} - P_{\varepsilon\xi\upsilon\pi}N * \overline{C}_w * (\overline{W}_{trans} + \frac{\overline{Q}_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Για την πιθανότητα εξυπηρέτησης, ισχύει:

$$P_{\varepsilon\xi\upsilon\pi} = P_0 + P_1 + P_2$$

Σύμφωνα με το μοντέλο Poisson (M/M/2):(GD/∞/∞), ισχύουν:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{s}} \right]^{-1} \rightarrow P_0 = \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{2}} \right]^{-1}$$

$$P_1 = \frac{\rho^1}{1!} P_0$$

$$P_2 = \frac{\rho^2}{2!} P_0$$

Οπότε:

$$P_{\varepsilon\xi\upsilon\pi} = P_0 + P_1 + P_2 = \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{2}} \right]^{-1}$$

Επίσης, ισχύει:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{N}{360}}{24h} = \frac{N[\overline{W}_{trans} + \frac{\overline{Q}_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}}]}{8640h}$$

Τελικά:

$$G = -2765000\$ + \left(1 - \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{2}} \right]^{-1} \right) N(-\overline{C_r}) + \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{2}} \right]^{-1} N(\overline{P_{LNG}} - \overline{c_{aLNG}}) * \overline{Q_{LNG}} - \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{2}} \right]^{-1} N * \overline{C_w} * \left(\overline{W_{trans}} + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}} \right)$$

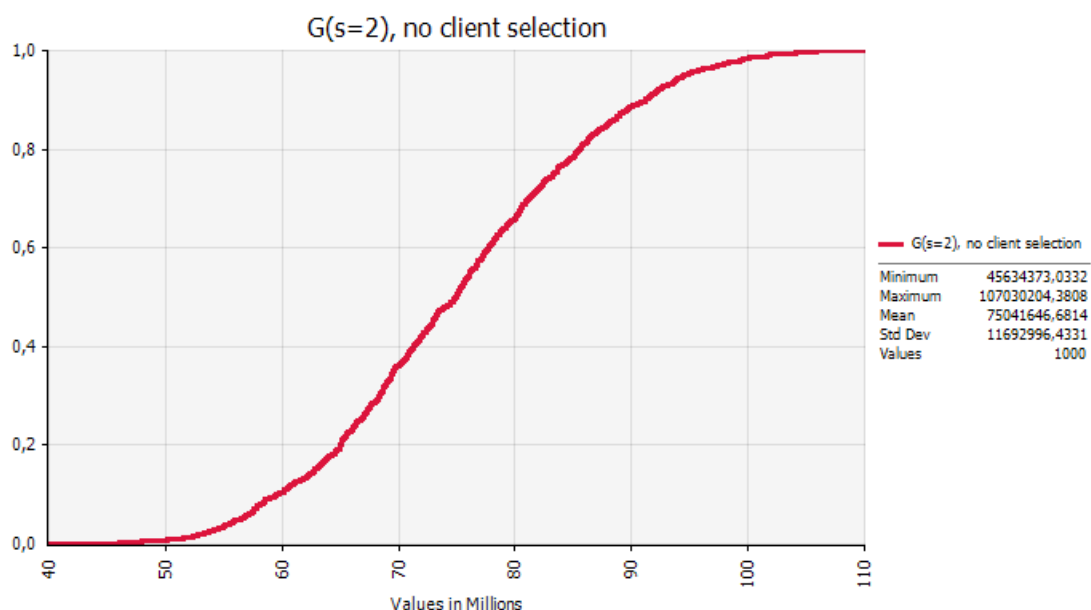
Αν επιλεγεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων, που ζητούν ανεφοδιασμό, θα είναι:

- $\overline{W_{trans}} = 0.5h$
- $N = 3624$
- $\overline{C_r} = 131383.80\$$
- $\overline{C_w} = 3322.57\$/hr$
- $\overline{Q_{LNG}} = uniform(90\% * 135.97m^3, 110\% * 135.97m^3) \rightarrow$

$$\overline{Q_{LNG}} = uniform(122.37m^3, 149.57m^3)$$

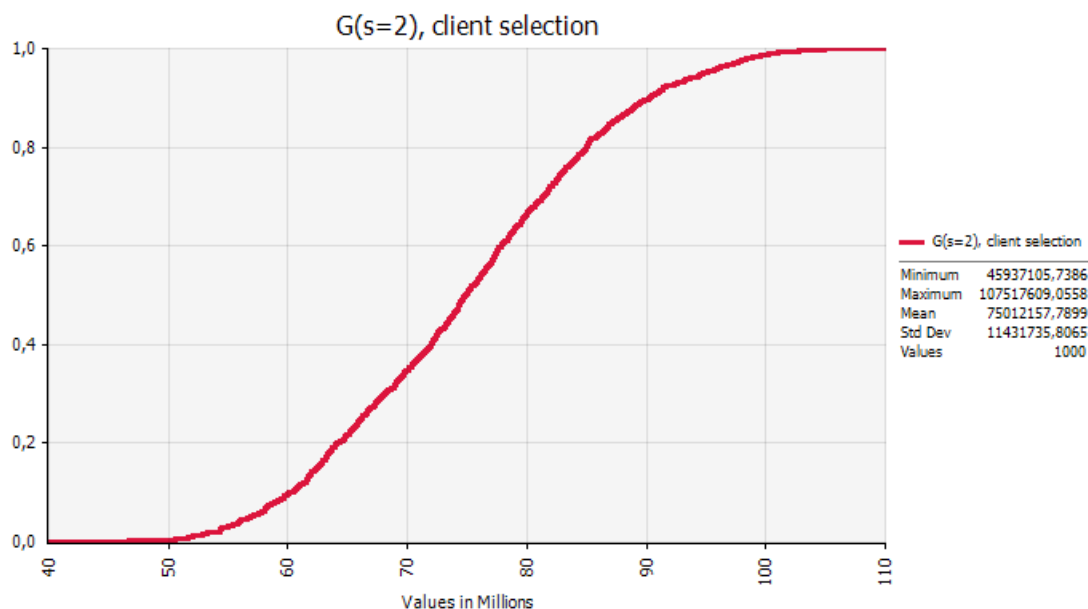
- $\rho = \frac{3624 * \left[0.5h + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}} \right]}{8640h} = \frac{1812h + 11.56 \frac{h}{m^3} * \overline{Q_{LNG}}}{8640h} \rightarrow$
 $\rho = 0.2097 + 0.0013 * uniform(122.37m^3, 149.57m^3)$
- $\overline{P_{LNG}} = triang(220 \$/m^3, 270 \$/m^3, 320 \$/m^3)$
- $\overline{c_{aLNG}} = uniform(67 \$/m^3, 83 \$/m^3)$

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 29.



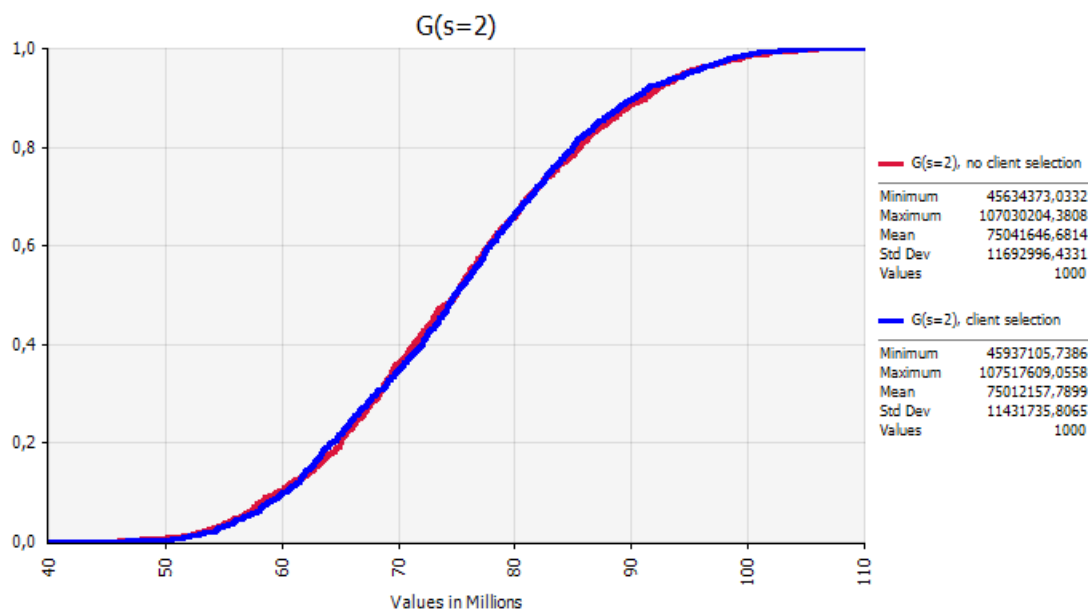
Εικόνα 29: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=2)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 98.75%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 30: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=2)

Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 31: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=2)

Στην περίπτωση, που επιλεγθεί να χρησιμοποιηθούν δύο σταθμοί εξυπηρέτησης, η μέση τιμή του κέρδους μεγιστοποιείται αν δεν υπάρξει αποκλεισμός κατηγορίας πελατών από το σύστημα.

7.3.3 ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Με τη χρήση τριών σταθμών εξυπηρέτησης θα είναι:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * 3 + (1 - P_{εξυπ})N(-\bar{C}_r) + P_{εξυπ}N(\bar{P}_{LNG} - \bar{c}_{aLNG}) * \bar{Q}_{LNG} - P_{εξυπ}N * \bar{C}_w * (\bar{W}_{trans} + \frac{\bar{Q}_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Για την πιθανότητα εξυπηρέτησης, ισχύει:

$$P_{εξυπ} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3$$

Σύμφωνα με το μοντέλο Poisson (M/M/3):(GD/∞/∞), ισχύουν:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{s}} \right]^{-1} \rightarrow P_0 = \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{3}} \right]^{-1}$$

$$P_1 = \frac{\rho^1}{1!} P_0$$

$$P_2 = \frac{\rho^2}{2!} P_0$$

$$P_3 = \frac{\rho^3}{3!} P_0$$

Οπότε:

$$P_{εξυπ} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{3}} \right]^{-1}$$

Επίσης, ισχύει:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{N}{360}}{24h} = \frac{N[\bar{W}_{trans} + \frac{\bar{Q}_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}}]}{8640h}$$

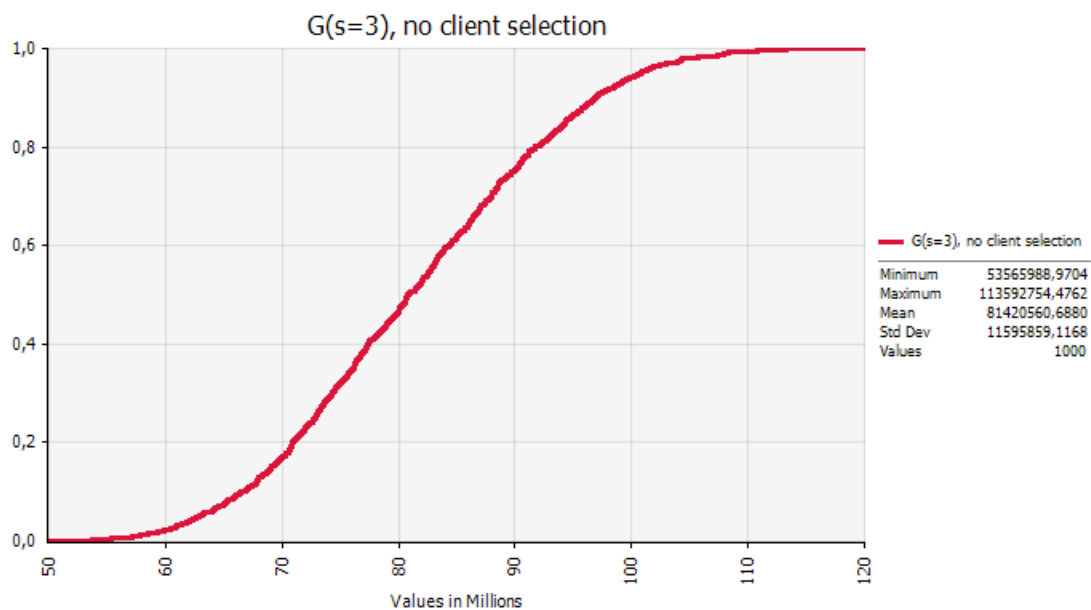
Τελικά:

$$G = -2847500\$ + \left(1 - \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{3}} \right]^{-1} \right) N(-\overline{C_r})$$

$$+ \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{3}} \right]^{-1} N(\overline{P_{LNG}} - \overline{c_{aLNG}}) * \overline{Q_{LNG}}$$

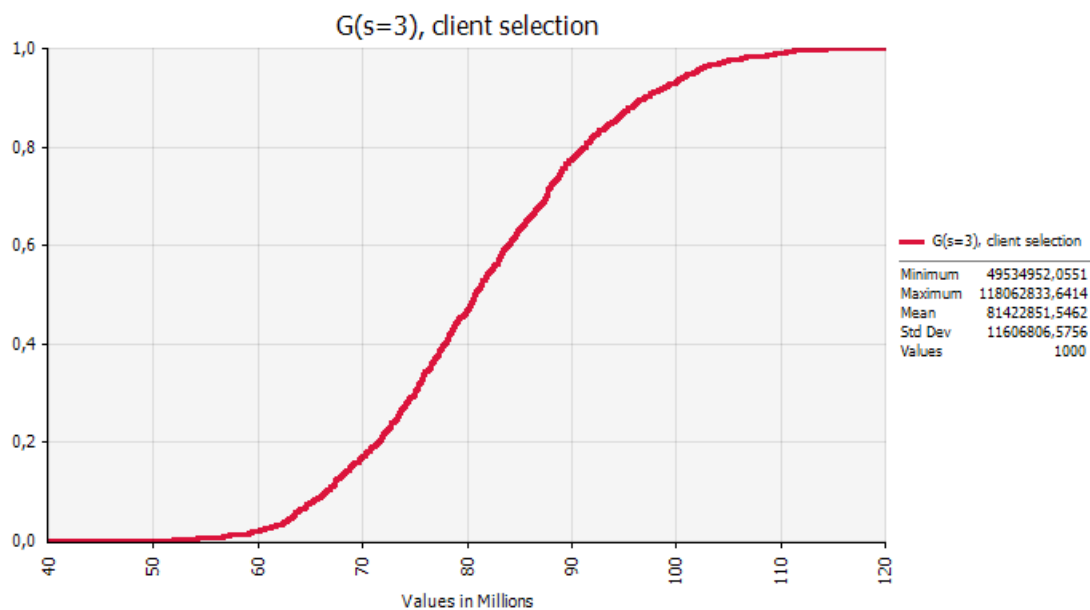
$$- \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{3}} \right]^{-1} N * \overline{C_w} * (\overline{W_{trans}} + \frac{\overline{Q_{LNG}}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με τρεις σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πλοίων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 32.



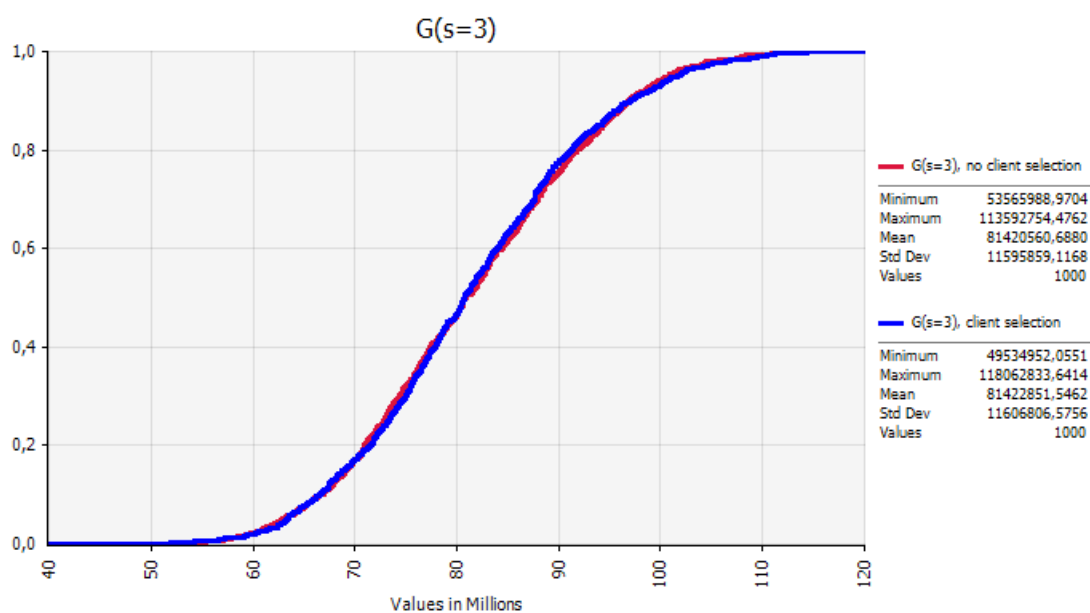
Εικόνα 32: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=3)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 99.90%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με τρεις σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 33.



Εικόνα 33: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=3)

Η αντιπαράβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 34.



Εικόνα 34: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=3)

Στην περίπτωση, που επιλεγθεί να χρησιμοποιηθούν τρεις σταθμοί εξυπηρέτησης, η μέση τιμή του κέρδους μεγιστοποιείται αν δεν υπάρχει αποκλεισμός κατηγορίας πελατών από το σύστημα.

7.3.4 ΧΡΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Με τη χρήση τεσσάρων σταθμών εξυπηρέτησης θα είναι:

$$G = -2600000\$ - 82500\$ * 4 + (1 - P_{\varepsilon\xi\nu\pi})N(-\bar{C}_r) + P_{\varepsilon\xi\nu\pi}N(\bar{P}_{LNG} - \bar{c}_{aLNG}) * \bar{Q}_{LNG} - P_{\varepsilon\xi\nu\pi}N * \bar{C}_w * (\bar{W}_{trans} + \frac{\bar{Q}_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}})$$

Για την πιθανότητα εξυπηρέτησης, ισχύει:

$$P_{\varepsilon\xi\nu\pi} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Σύμφωνα με το μοντέλο Poisson (M/M/4):(GD/∞/∞), ισχύουν:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{s}} \right]^{-1} \rightarrow P_0 = \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{4}} \right]^{-1}$$

$$P_1 = \frac{\rho^1}{1!} P_0$$

$$P_2 = \frac{\rho^2}{2!} P_0$$

$$P_3 = \frac{\rho^3}{3!} P_0$$

$$P_4 = \frac{\rho^4}{4!} P_0$$

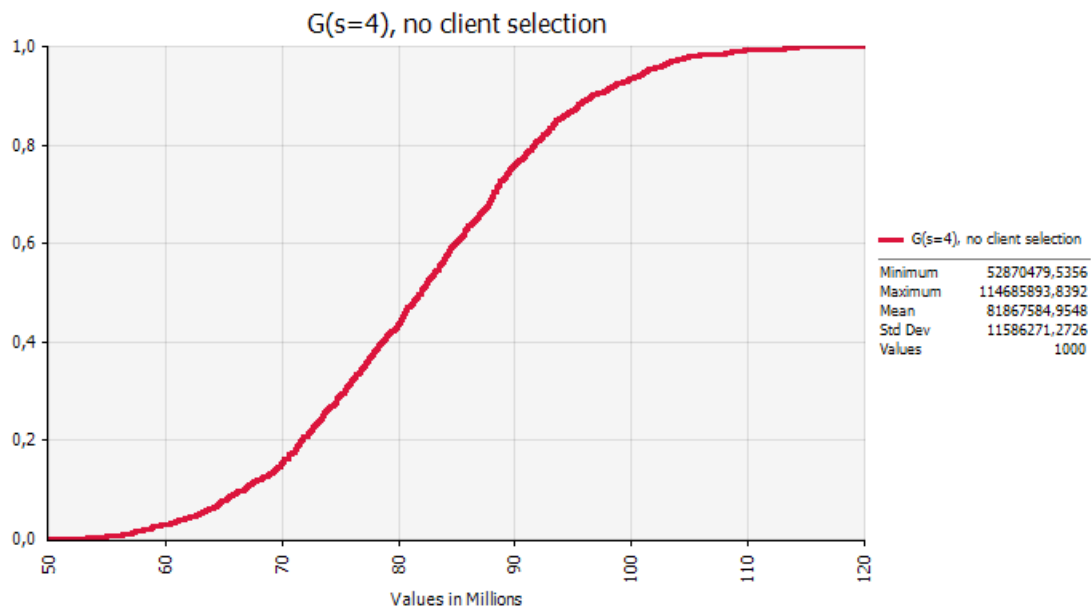
Οπότε:

$$P_{\varepsilon\xi\nu\pi} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} \right) * \left[\frac{\rho^0}{0!} + \frac{\rho^1}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{4}} \right]^{-1}$$

Ισχύει:

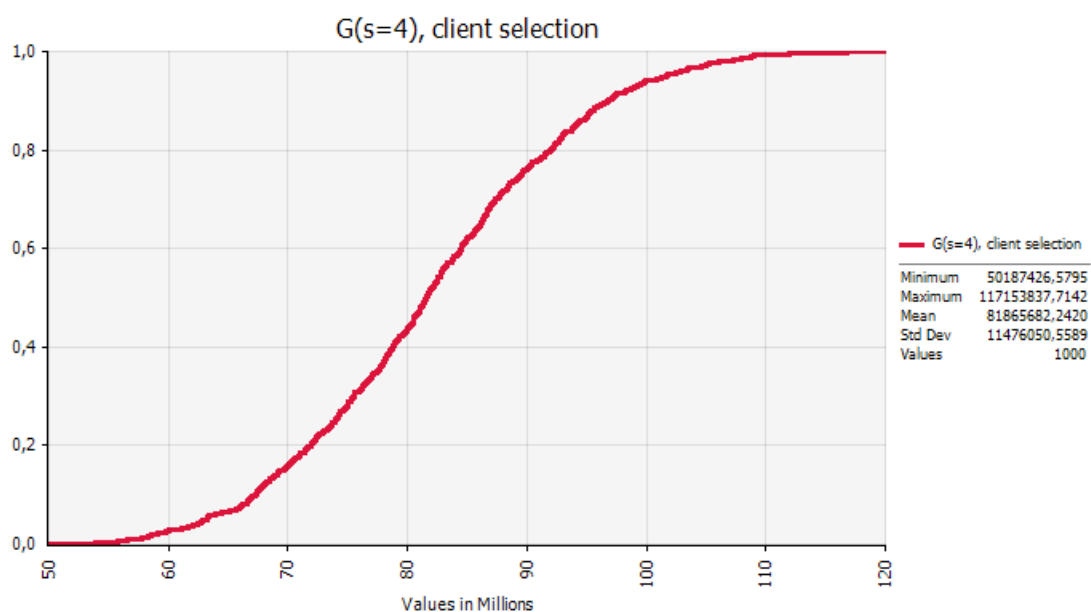
$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{N}{360}}{24h} = \frac{N \left[\bar{W}_{trans} + \frac{\bar{Q}_{LNG}}{313.55 \frac{m^3}{h}} \right]}{8640h}$$

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με τέσσερις σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 35.



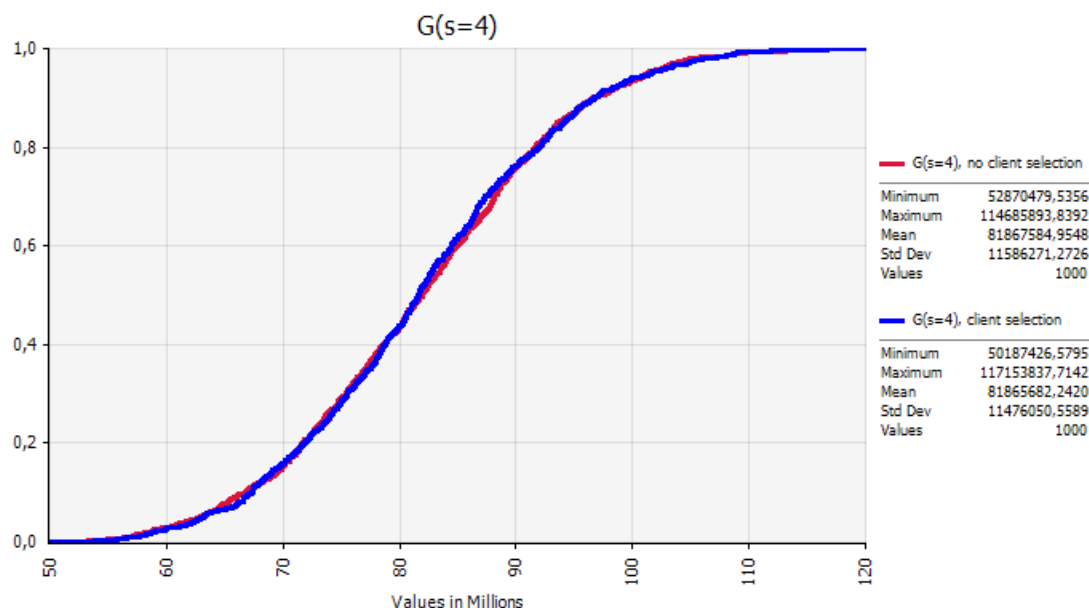
Εικόνα 35: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=4)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 99.99%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με τέσσερις σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 36: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=4)

Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 37.



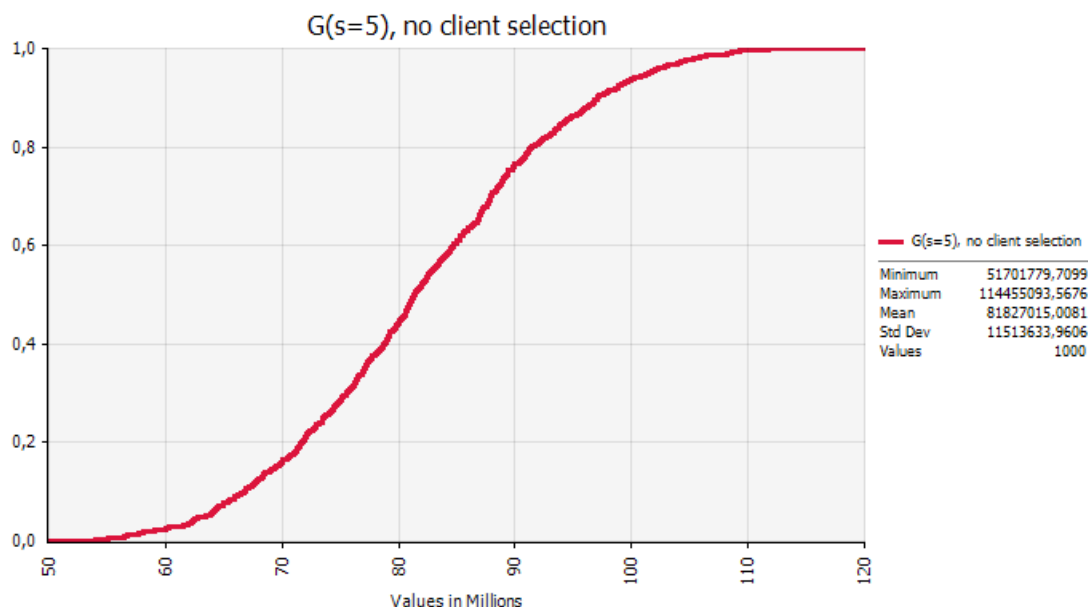
Εικόνα 37: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=4)

Στην περίπτωση, που επιλεγθεί να χρησιμοποιηθούν τέσσερις σταθμοί εξυπηρέτησης, η μέση τιμή του κέρδους μεγιστοποιείται αν δεν υπάρξει αποκλεισμός κατηγορίας πελατών από το σύστημα.

7.3.5 ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

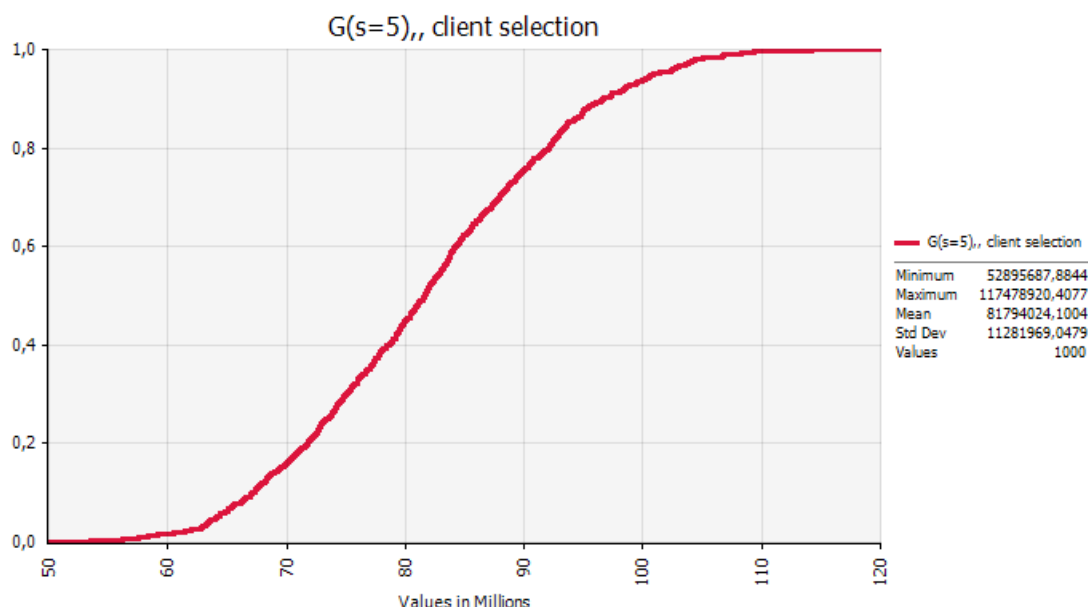
Αν συνεχίσουν να προστίθενται σταθμοί εξυπηρέτησης στο σύστημα αναμονής $s > 4$, η μέση τιμή του κέρδους θα μειώνεται λόγω του σταθερού κόστους διαθέσεως του συστήματος.

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με πέντε σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 38.



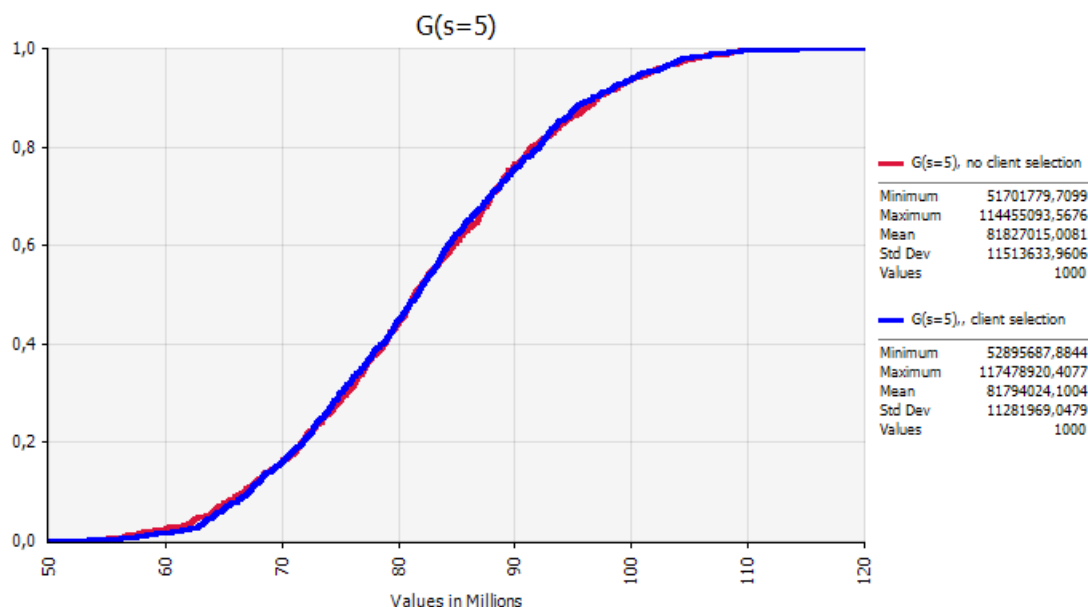
Εικόνα 38: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό χρηστών (s=5)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 99.99%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με πέντε σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=5)

Η αντιπαράβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=5)

Στην περίπτωση, που επιλεχθεί να χρησιμοποιηθούν πέντε σταθμοί εξυπηρέτησης, η μέση τιμή του κέρδους μεγιστοποιείται αν δεν υπάρξει αποκλεισμός κατηγορίας πελατών από το σύστημα.

7.4 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Για την εξαγωγή των αθροιστικών κατανομών της προηγούμενης παραγράφου και τη λήψη απόφασης για το πλήθος των πλοίων bunkers, θεωρήθηκε πως ο ζητούμενος αριθμός ανεφοδιασμών θα είναι αυτός, που παρέχεται από τον Πίνακα αναμενόμενης ζήτησης (παράγραφος 7.2.2). Στο σενάριο αυξημένης ζήτησης, εξετάζεται η αυξημένη ζήτηση ανεφοδιασμών, η οποία μπορεί να προέλθει από την αύξηση της κίνησης κρουαζιέρας και εμπορευματοκιβωτίων στο λιμένα Πειραιώς.

Συγκεκριμένα, θα υποθεθούν:

- Αύξηση του αριθμού αφίξεων μικρών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, από 0% έως 100%
- Αύξηση του αριθμού αφίξεων μεγάλων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, από 0% έως 100%
- Αύξηση του αριθμού αφίξεων μικρών πλοίων κρουαζιέρας από 0% έως 50%
- Αύξηση του αριθμού αφίξεων μεγάλων πλοίων κρουαζιέρας από 0% έως 50%
- Αύξηση των μικρών πλοίων μεταφοράς αυτοκινήτων από 0% έως 20%
- Αύξηση των αφίξεων όλων των κατηγοριών ΕΓ/ΟΓ κατά 0% έως 20%

Οι ανωτέρω αυξήσεις θα μοντελοποιηθούν ως ομοιόμορφες πιθανοτικές κατανομές. Δηλαδή:

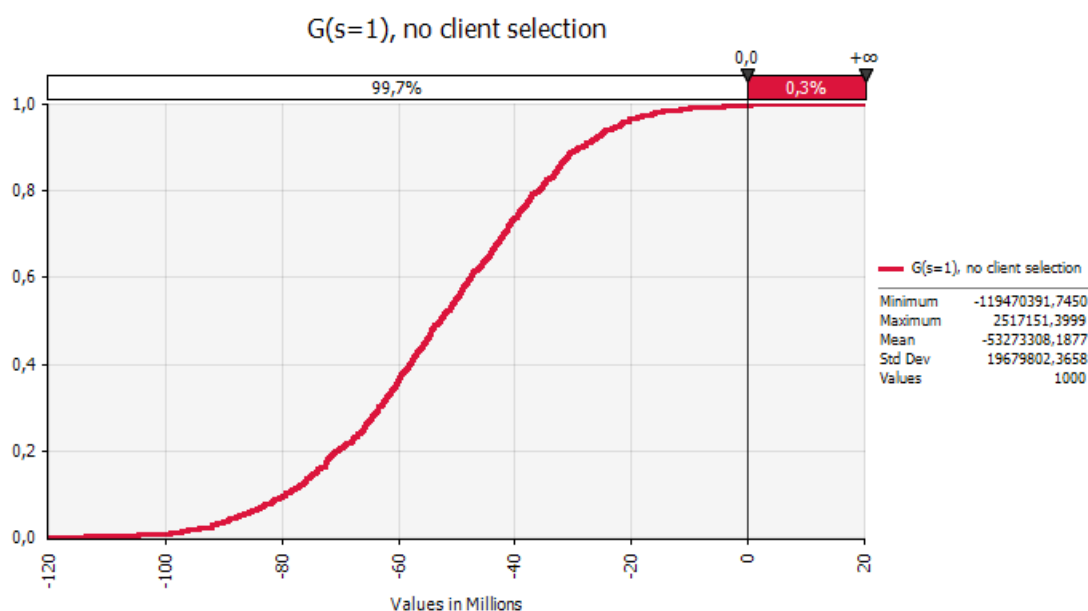
- αριθμός αφίξεων μικρών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων: $uniform(314, 628)$
- αριθμός αφίξεων μεγάλων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων: $uniform(201, 402)$
- αριθμός αφίξεων μικρών πλοίων κρουαζιέρας: $uniform(84, 126)$
- αριθμός αφίξεων μεγάλων πλοίων κρουαζιέρας: $uniform(202, 303)$
- αριθμός αφίξεων μικρών πλοίων μεταφοράς αυτοκινήτων: $uniform(125, 150)$
- αριθμός αφίξεων κάθε κατηγορίας ΕΓ/ΟΓ πλοίων: $uniform(N_{ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ_ΠΛΟΙΟΥ}, 1.20 * N_{ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ_ΠΛΟΙΟΥ})$

Επίσης, ισχύουν οι υποθέσεις του βασικού σεναρίου ζήτησης:

- $\overline{P_{LNG}} = triang(220 \$/m^3, 270 \$/m^3, 320 \$/m^3)$
- $\overline{c_{aLNG}} = uniform(67 \$/m^3, 83 \$/m^3)$
- $\overline{Q_{LNG}} = uniform(90\% * \overline{Q_{ANAMENOMENHS\ ZHTHSHS}}, 110\% * \overline{Q_{ANAMENOMENHS\ ZHTHSHS}})$
- $\overline{W_{trans}} = 0.5h$

7.4.1 ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με ένα σταθμό εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, δίνεται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=1)

Όπως φαίνεται, αν επιλεχθεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων, υπάρχει πιθανότητα ζημίας για το σύστημα ανεφοδιασμού, ίση με περίπου 99.7%.

Αυτό οφείλεται στο ότι η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι περίπου 78% και επομένως, περίπου 1 στα 5 πλοία θα αποχωρεί από το σύστημα ανεφοδιασμού.

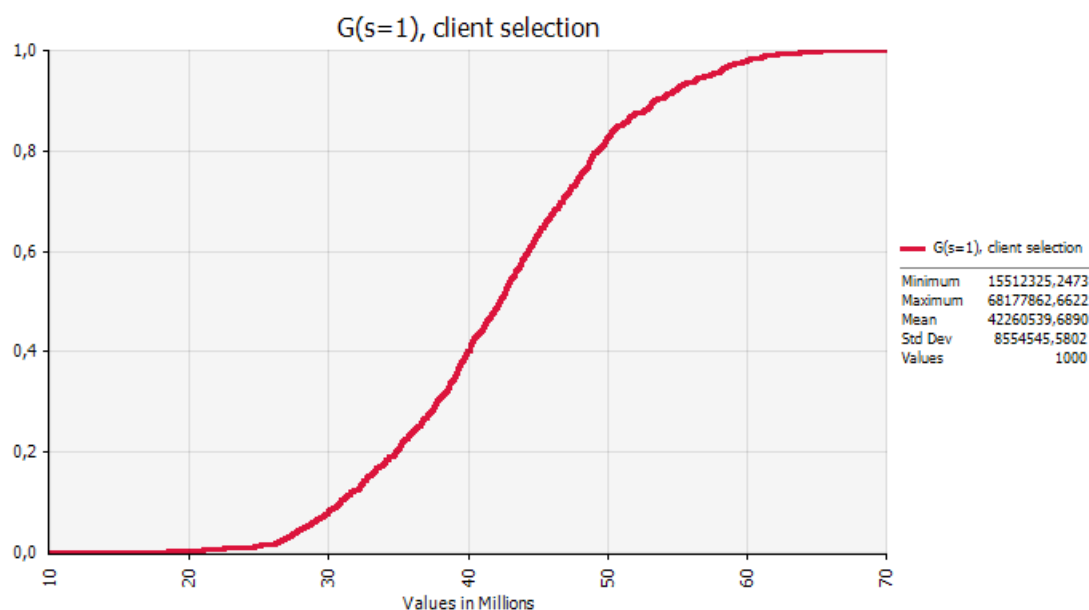
Η στοχαστική βελτιστοποίηση υποδεικνύει πως η μέση τιμή του κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού μπορεί να μεγιστοποιηθεί αν αποκλειστούν από αυτό:

- τα μικρά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
- τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
- τα μικρά πλοία κρουαζιέρας
- τα μικρά πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων
- τα μικρά ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τις Κυκλάδες

και εξυπηρετούνται μόνο:

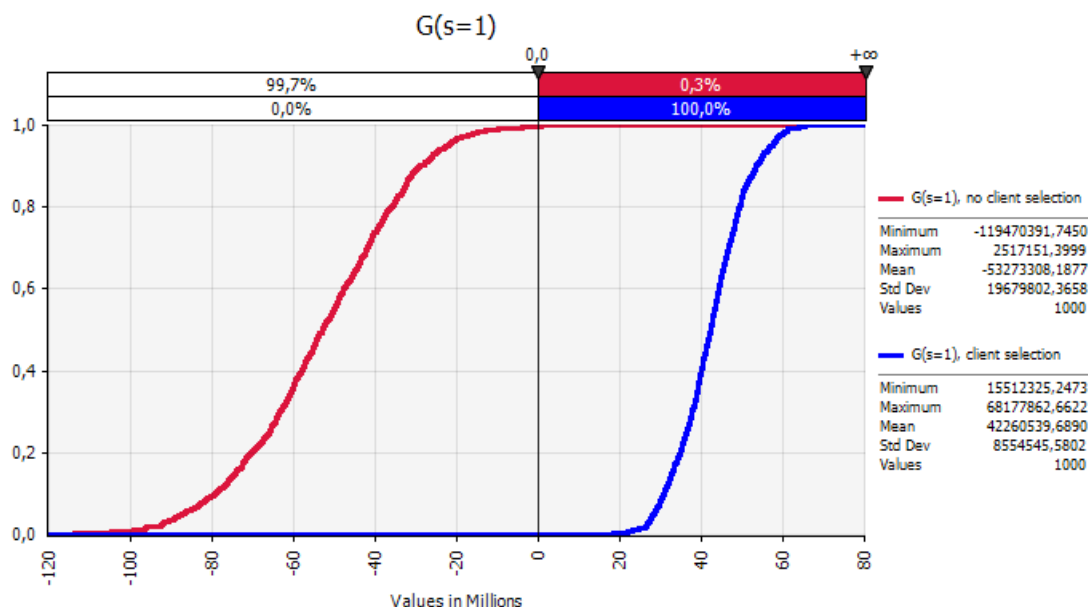
- τα μεγάλα πλοία κρουαζιέρας
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό την Κρήτη
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό το Βόρειο Αιγαίο
- τα μεγάλα ΕΓ/ΟΓ με προορισμό τα Δωδεκάνησα

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με ένα σταθμό εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=1)

Φαίνεται πως, μετά την επιλογή των συγκεκριμένων κατηγοριών πελατών προς εξυπηρέτηση από το σύστημα ανεφοδιασμού, δεν υπάρχει πιθανότητα ζημίας για το σύστημα ανεφοδιασμού, ενώ το μέσο προσδοκώμενο κέρδος είναι περίπου 42260000\$. Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=1)

Σε σύγκριση με το βασικό σενاريو ζήτησης ανεφοδιασμών, φαίνεται πως επιλέγονται οι ίδιες κατηγορίες προς εφοδιασμό πλοίων. Η αύξηση του μέσου προσδοκώμενου κέρδους είναι μόλις της τάξεως του 1.83%, παρά την αρκετά μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στη ζήτηση ανεφοδιασμών.

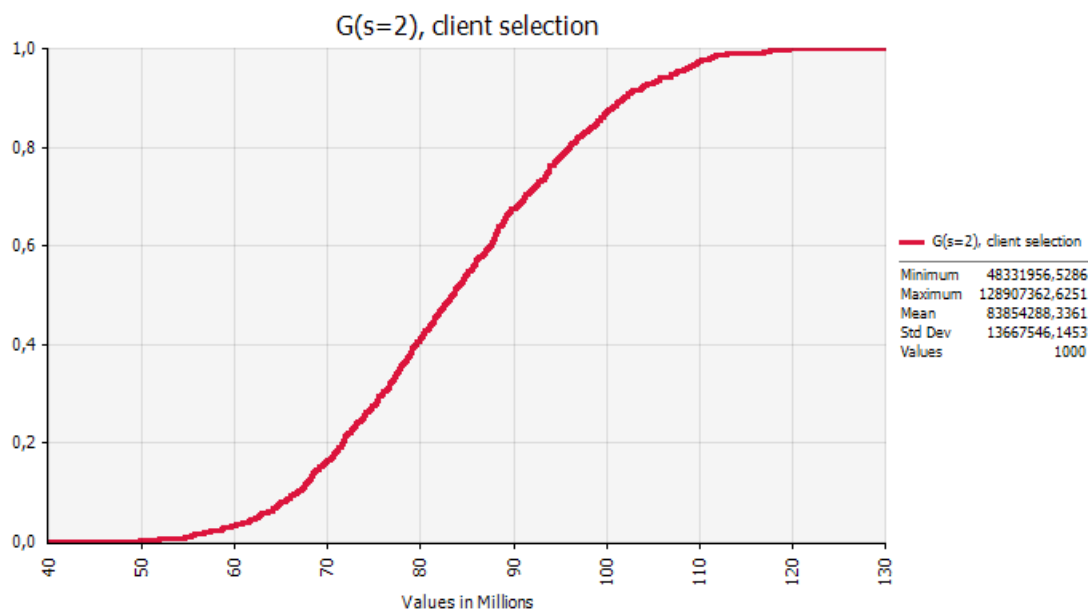
7.4.2 ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 44.



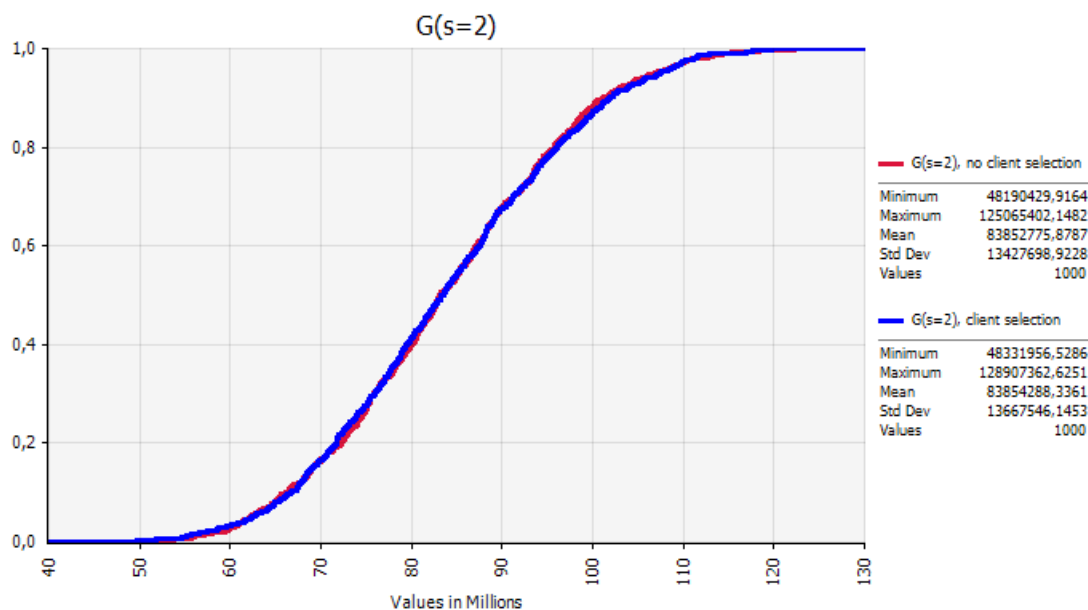
Εικόνα 44: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=2)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 98.00%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=2)

Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 46.

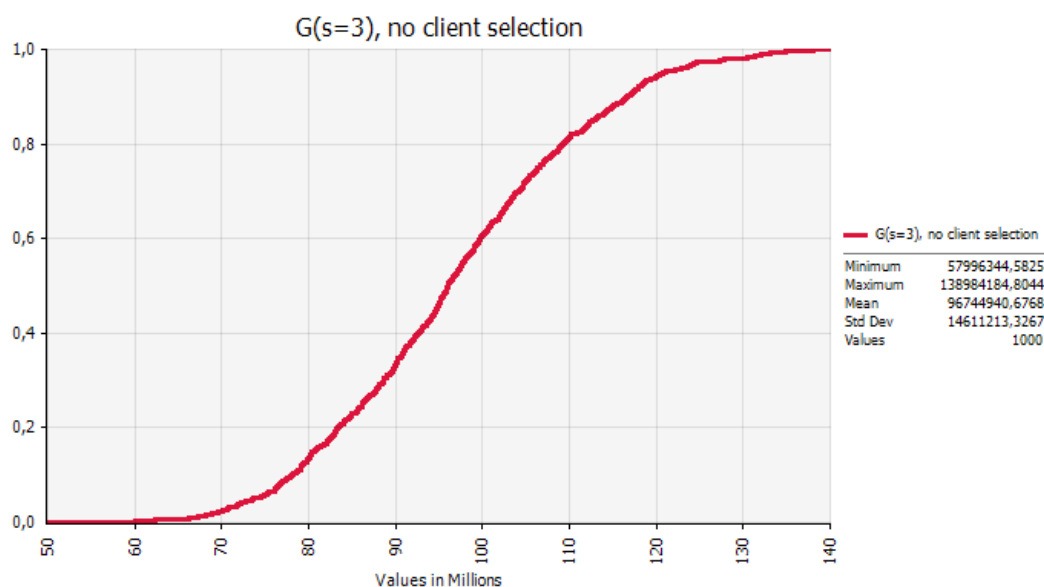


Εικόνα 46: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=2)

Σε σύγκριση με το βασικό σενاريو ζήτησης ανεφοδιασμών, φαίνεται πως επιλέγονται πάλι όλες οι κατηγορίες πλοίων προς εφοδιασμό. Η αυξημένη ζήτηση αποφέρει αύξηση του μέσου προσδοκώμενου κέρδους είναι της τάξεως του 11.75%.

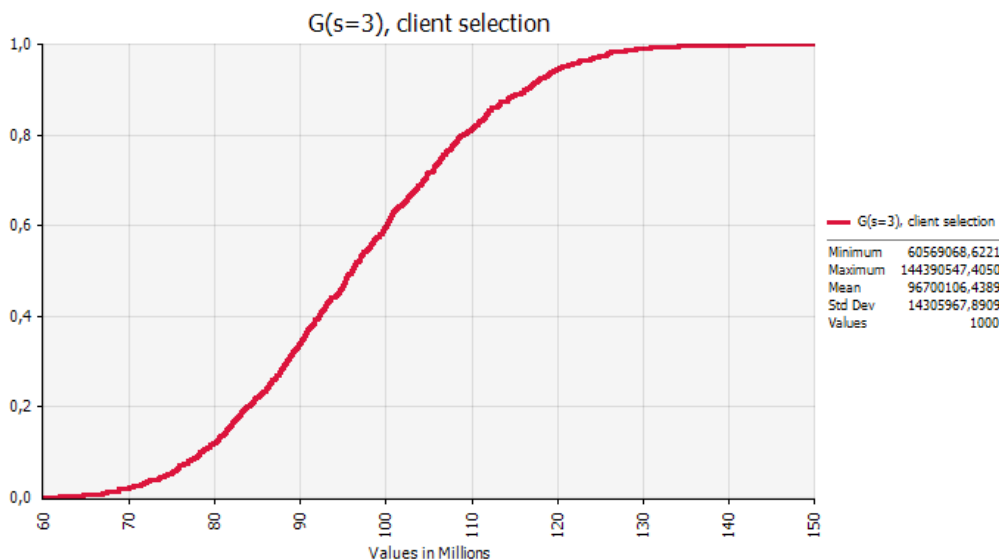
7.4.3 ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με τρεις σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 47.



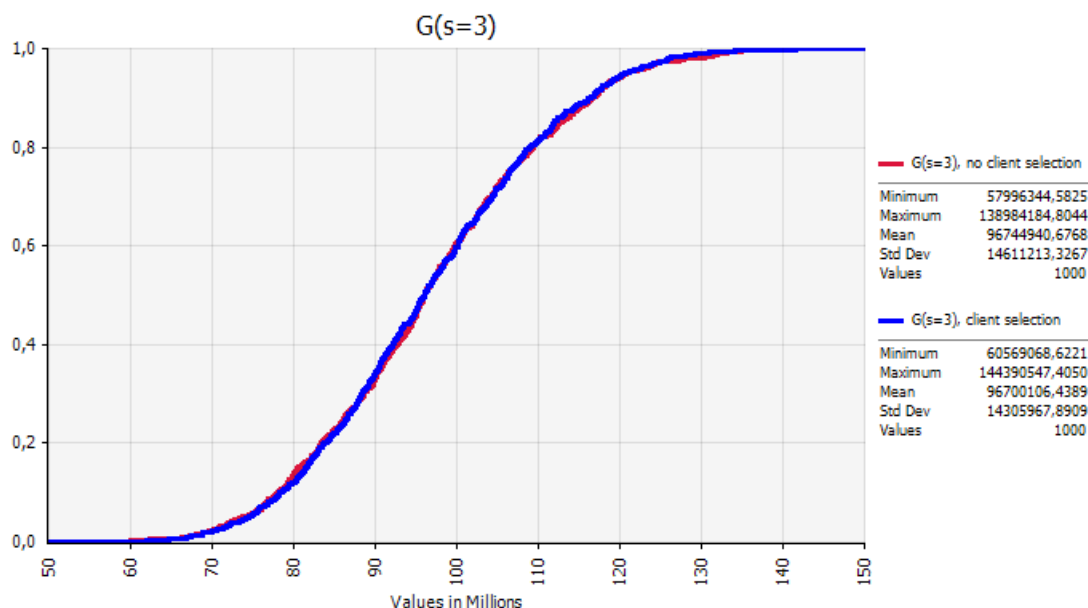
Εικόνα 47: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=3)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 99.81%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 48.



Εικόνα 48: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=3)

Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 49.

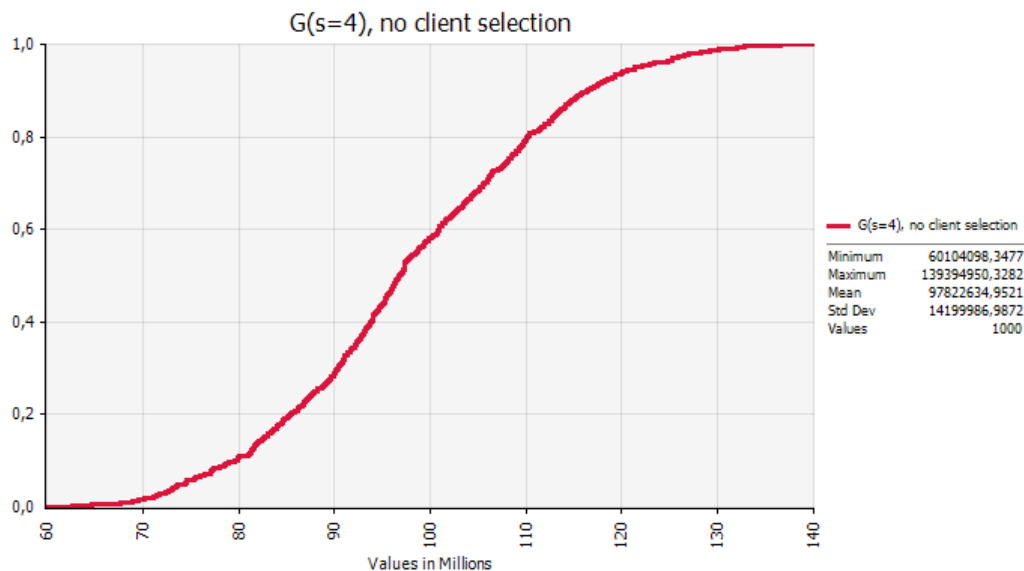


Εικόνα 49: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=3)

Σε σύγκριση με το βασικό σενاريو ζήτησης ανεφοδιασμών, φαίνεται πως επιλέγονται πάλι όλες οι κατηγορίες πλοίων προς εφοδιασμό. Η αυξημένη ζήτηση αποφέρει αύξηση του μέσου προσδοκώμενου κέρδους, είναι μόλις της τάξεως του 18.75%.

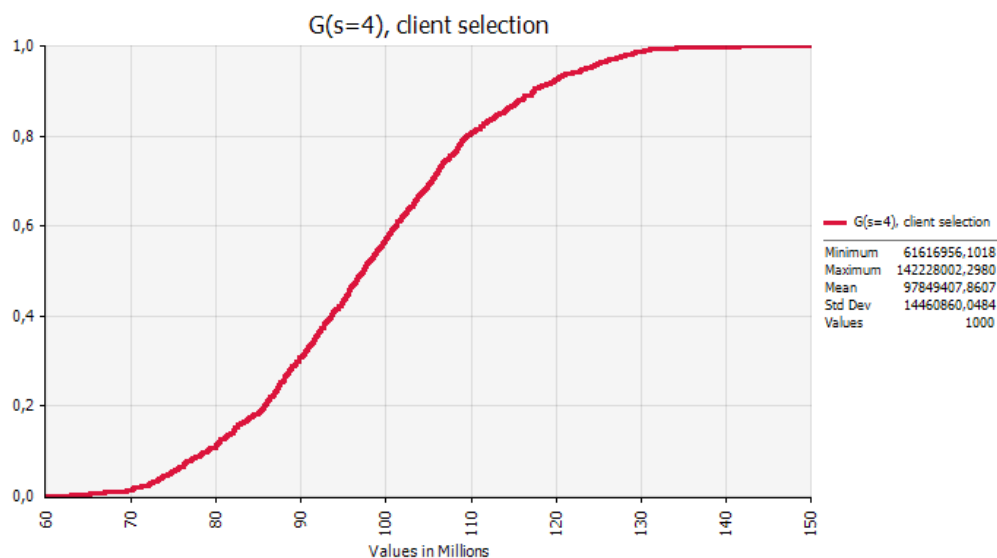
7.4.4 ΧΡΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με τέσσερις σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 50.



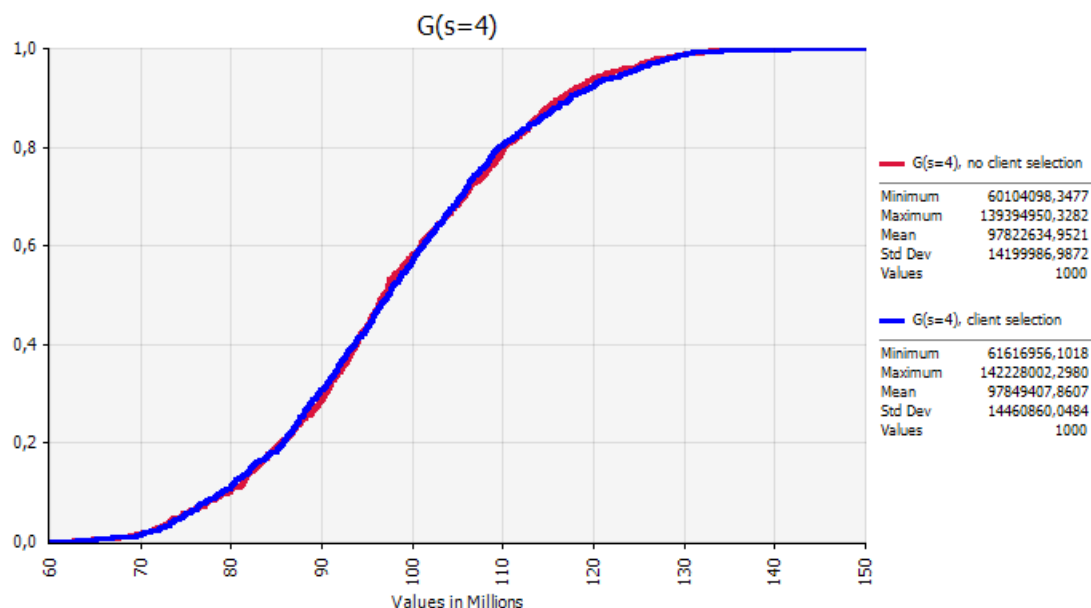
Εικόνα 50: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=4)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 99.98%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 51.



Εικόνα 51: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, μετά την επιλογή πελατών (s=4)

Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 52.

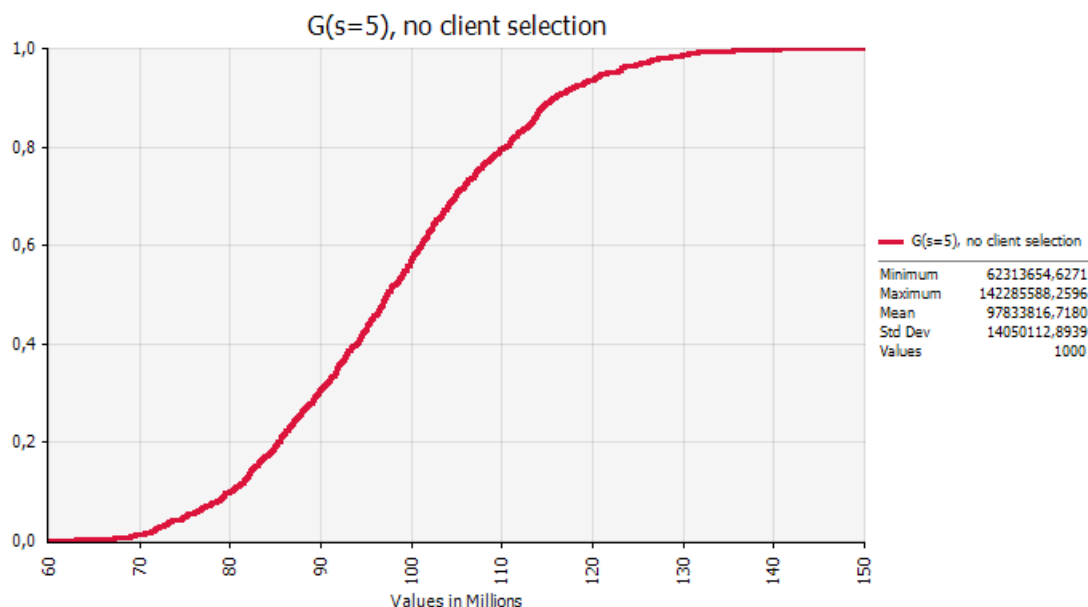


Εικόνα 52: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=4)

Σε σύγκριση με το βασικό σενاريو ζήτησης ανεφοδιασμών, φαίνεται πως επιλέγονται πάλι όλες οι κατηγορίες πλοίων προς εφοδιασμό. Η αυξημένη ζήτηση αποφέρει αύξηση του μέσου προσδοκώμενου κέρδους, είναι μόλις της τάξεως του 19.50%.

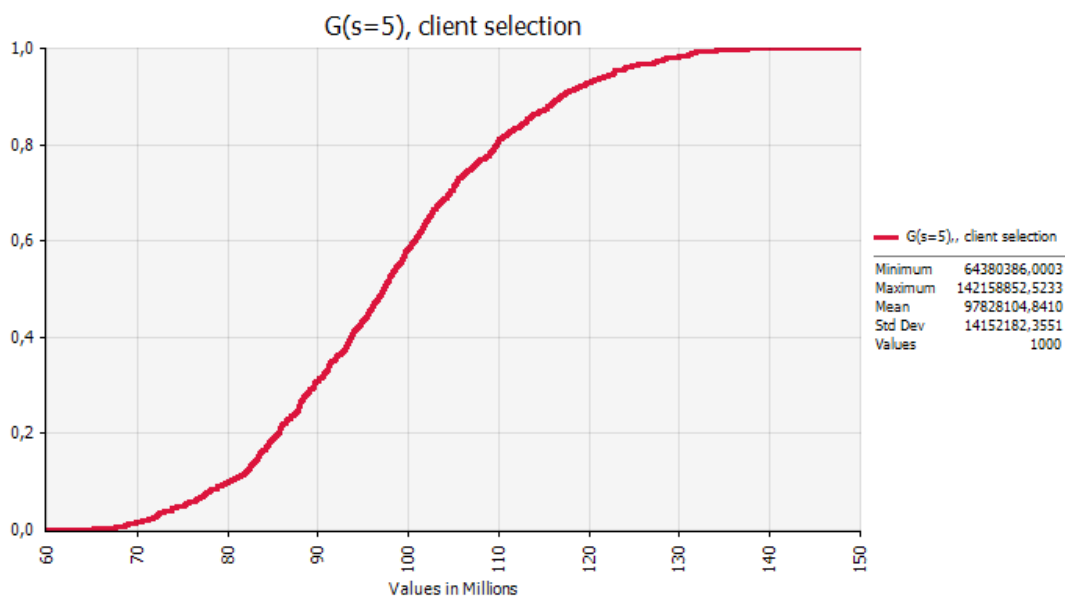
7.4.5 ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με πέντε σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, και χωρίς αποκλεισμό κατηγοριών πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 53.



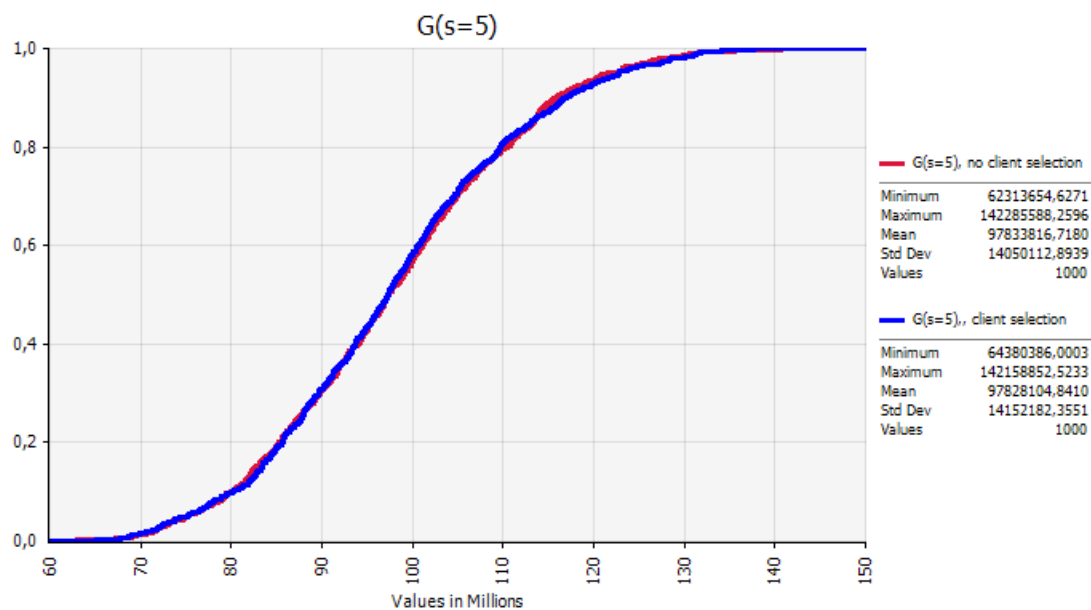
Εικόνα 53: Αθροιστική κατανομή κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, χωρίς αποκλεισμό πελατών (s=5)

Ο μη αποκλεισμός πελατών από το σύστημα ανεφοδιασμού υποδεικνύεται, από τη στοχαστική βελτιστοποίηση, ως εκείνη η επιλογή πελατών για την οποία μεγιστοποιείται η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης είναι 99.99%. Η αθροιστική πιθανοτική κατανομή για το κέρδος από τη χρήση του συστήματος αναμονής με δύο σταθμούς εξυπηρέτησης το 2020, μετά την επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα συμμετάσχουν στο σύστημα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 54.



Εικόνα 54: Αθροιστική κατανομή κέρδους από τη χρήση του συστήματος, μετά την επιλογή πελατών (s=4)

Η αντιπαραβολή των δύο αθροιστικών κατανομών, πριν και μετά την επιλογή πελατών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 55.



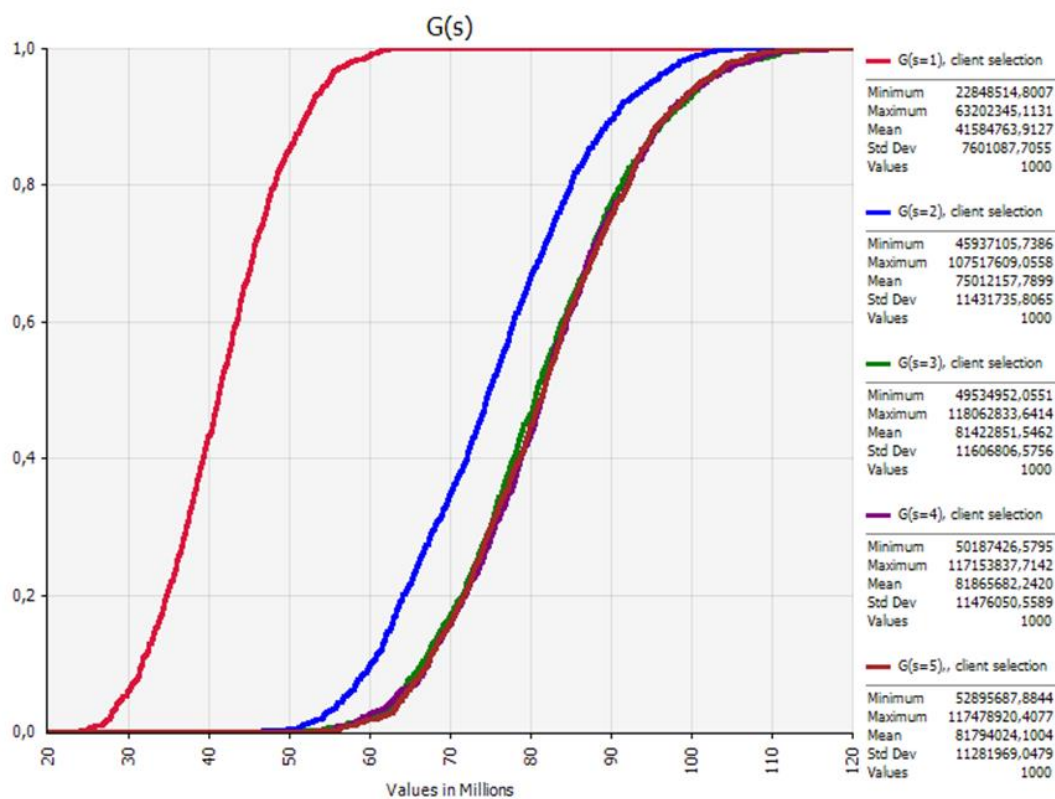
Εικόνα 55: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, πριν και μετά την επιλογή πελατών (s=5)

Σε σύγκριση με το βασικό σενاريو ζήτησης ανεφοδιασμών, φαίνεται πως επιλέγονται πάλι όλες οι κατηγορίες πλοίων προς εφοδιασμό. Η αυξημένη ζήτηση αποφέρει αύξηση του μέσου προσδοκώμενου κέρδους της τάξεως του 19.50%, όπως και στην περίπτωση χρήσης τεσσάρων σταθμών εξυπηρέτησης.

7.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΠΕΛΑΤΩΝ

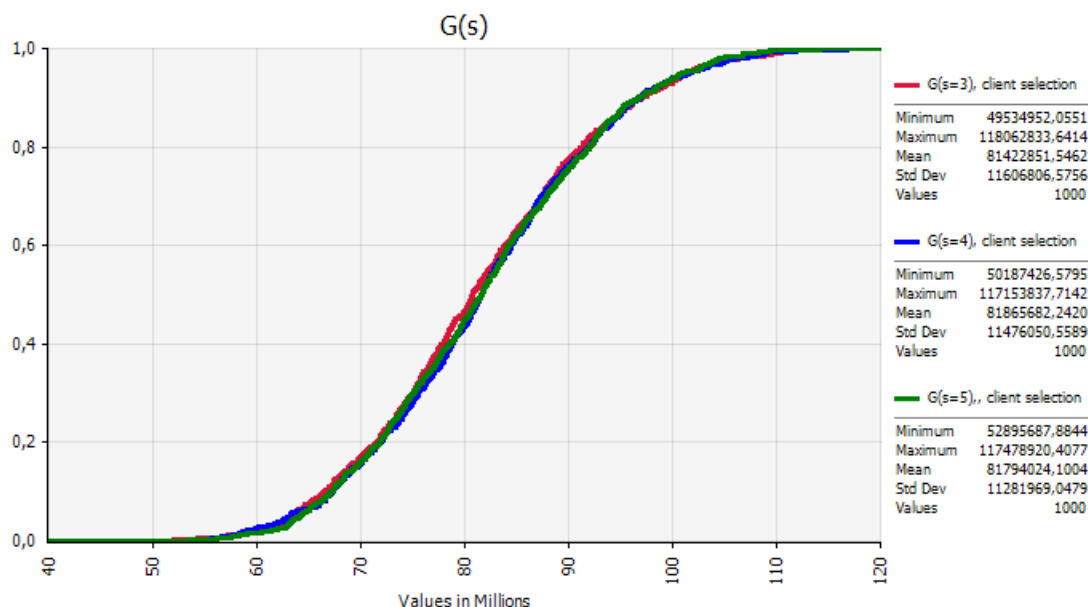
7.5.1 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΖΗΤΗΣΗΣ

Στην Εικόνα 56, παρουσιάζονται οι αθροιστικές κατανομές που προκύπτουν, μετά τη βέλτιστη επιλογή κατηγοριών προς ανεφοδιασμό πελατών, για το βασικό σενάριο ζήτησης.



Εικόνα 56: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, συναρτήσει των σταθμών εξυπηρέτησεως (s)

Φαίνεται πως οι αθροιστικές κατανομές για $s = 3$, $s = 4$ και $s = 5$ δεν είναι σημαντικά διαφορετικές. Αυτό παρουσιάζεται και στην Εικόνα 57, όπου έχουν υπερτεθεί οι τρεις αθροιστικές κατανομές.



Εικόνα 57: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, για $s = 3, 4$ και 5 σταθμούς εξυπηρέτησης

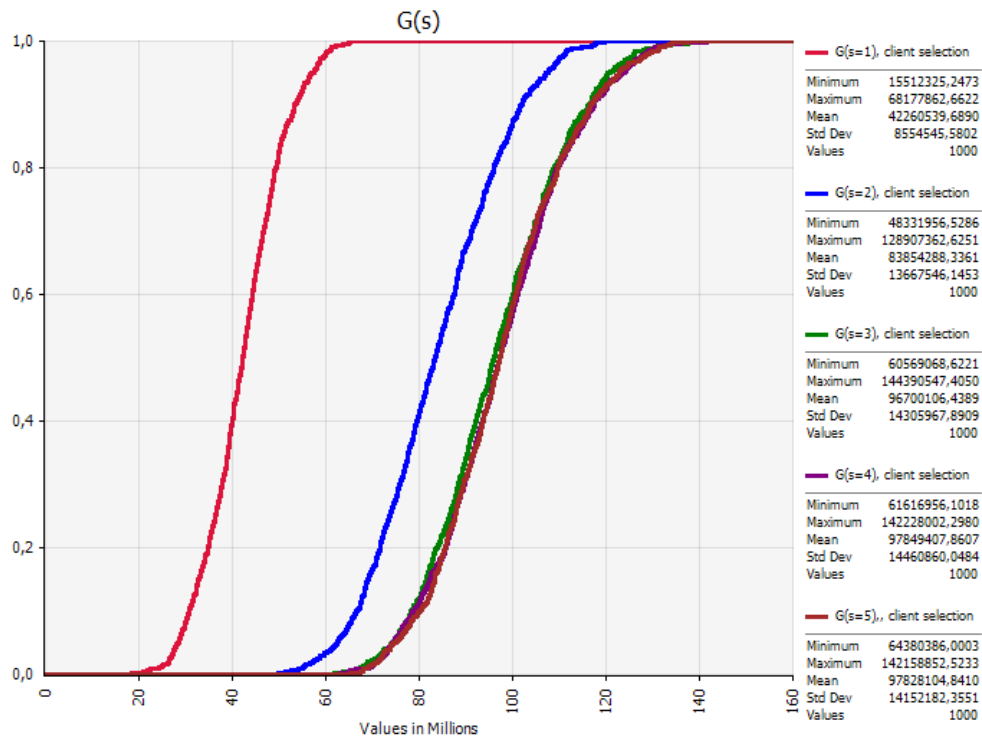
Ως κριτήριο της στοχαστικής βελτιστοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής των πιθανοτικών κατανομών κέρδους. Έτσι φαίνεται πως ο αποφασίζων θα διάλεγε τη λύση των τεσσάρων σταθμών εξυπηρέτησης $s = 4$. Όμως, η διαφορά με τη μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής, που παρέχεται για $s = 3$ σταθμούς εξυπηρέτησης είναι μόλις της τάξεως του 0.5%.

Η επιλογή για τον αριθμό των σταθμών εξυπηρέτησης ίσως εξαρτηθεί και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους της αρχικής επένδυσης ($s = 3$) ή η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας του συστήματος ($s = 5$). Στην περίπτωση επιλογής κάποιας από τις τρεις επιλογές ($s = 3, s = 4, s = 5$), θα επιλεχθεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων που ζητούν ανεφοδιασμό.

Σημειώνεται ότι κάθε σταθμός εξυπηρέτησης- πλοίο bunker έχει υποτεθεί πως κοστίζει 1500000\$, έχει διάρκεια ζωής 20 έτη και κόστη ετήσιας συντήρησης 150000\$. Η χωρητικότητα των δεξαμενών του είναι $500m^3$.

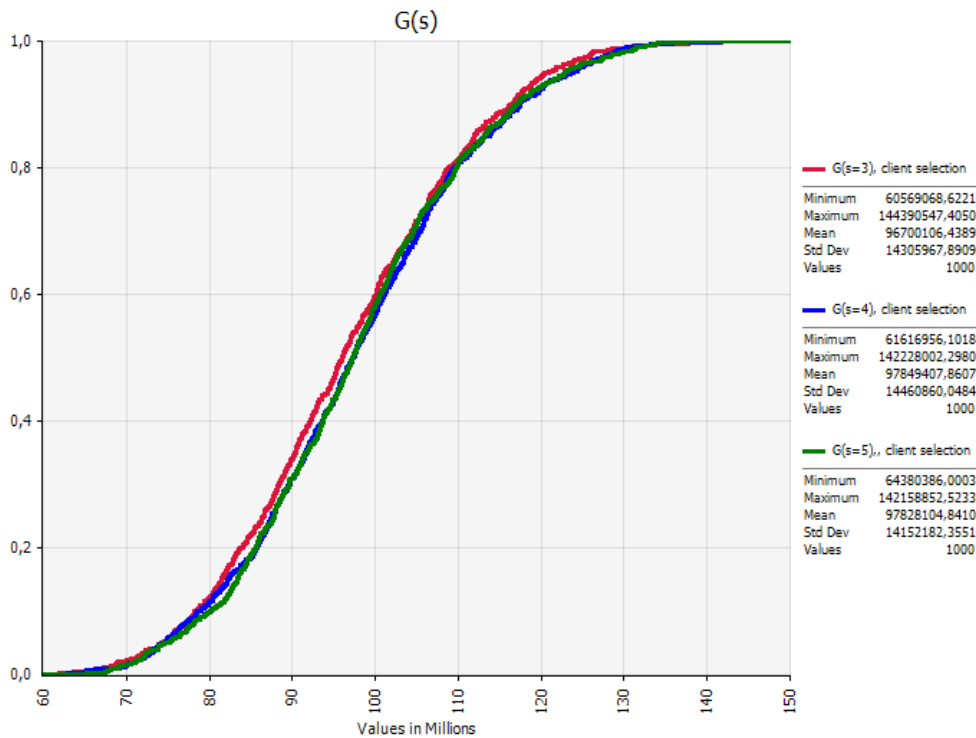
7.5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Στην Εικόνα 58, παρουσιάζονται οι αθροιστικές κατανομές που προκύπτουν, μετά τη βέλτιστη επιλογή κατηγοριών προς ανεφοδιασμό πελατών, για το σενάριο αυξημένης ζήτησης. Φάνηκε ότι για δεδομένο αριθμό σταθμών εξυπηρέτησης, επιλέχθηκαν οι ίδιες κατηγορίες προς εξυπηρέτηση πλοίων με εκείνες που είχαν επιλεγεί για τον ίδιο αριθμό σταθμών εξυπηρέτησης κατά το βασικό σενάριο ζήτησης.



Εικόνα 58: Πιθανοτικές κατανομές κέρδους, από το σύστημα ανεφοδιασμού, συναρτήσει των σταθμών εξυπηρέτησης (s)

Φαίνεται πως οι αθροιστικές κατανομές για $s = 3$, $s = 4$ και $s = 5$ δεν είναι σημαντικά διαφορετικές. Αυτό παρουσιάζεται και στην Εικόνα 59, όπου έχουν υπερτεθεί οι τρεις αθροιστικές κατανομές.



Εικόνα 59: Αθροιστικές κατανομές κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού, για $s=3$, $s=4$ και $s=5$ σταθμούς εξυπηρέτησης

Ως κριτήριο της στοχαστικής βελτιστοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής των πιθανοτικών κατανομών κέρδους. Έτσι φαίνεται πως ο αποφασίζων θα διάλεγε, όπως και στην περίπτωση του βασικού σεναρίου ζήτησης, τη λύση των τεσσάρων σταθμών εξυπηρέτησης $s = 4$. Η διαφορά με τη μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής, που παρέχεται για $s = 3$ σταθμούς εξυπηρέτησης είναι μόλις της τάξεως του 1.2%. Επίσης, σε σχέση με το σενάριο βασικής ζήτησης, η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους των τριών σταθμών εξυπηρέτησης μεταβλήθηκε κατά 18.75% ενώ η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους των τεσσάρων σταθμών εξυπηρέτησης μεταβλήθηκε κατά 19.50%.

Η επιλογή για τον αριθμό των σταθμών εξυπηρέτησης ίσως εξαρτηθεί και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους της αρχικής επένδυσης ($s = 3$) ή η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας του συστήματος ($s = 5$). Στην περίπτωση επιλογής κάποιας από τις τρεις επιλογές ($s = 3, s = 4, s = 5$), θα επιλεχθεί να εξυπηρετηθούν όλες οι κατηγορίες πλοίων που ζητούν ανεφοδιασμό.

Σημειώνεται ότι κάθε σταθμός εξυπηρέτησης- πλοίο bunker έχει υποτεθεί πως κοστίζει 1500000\$, έχει διάρκεια ζωής 20 έτη και κόστη ετήσιας συντήρησης 150000\$. Η χωρητικότητα των δεξαμενών του είναι $500m^3$.

Επιεδή το κριτήριο της στοχαστικής βελτιστοποίησης, ήταν η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής των πιθανοτικών κατανομών κέρδους συναρτήσε του αριθμού σταθμών εξυπηρέτησης- πλοίων bunker, s , επιλέγεται τελικά η λύση των τεσσάρων σταθμών εξυπηρέτησης και η εξυπηρέτηση όλων των κατηγοριών πλοίων. Η λύση αυτή θα επιτρέψει στο σύστημα να λειτουργήσει σε πολύ υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης, ακόμα και αν το ένα πλοίο υποστεί κάποια βλάβη, οπότε θα είναι διαθέσιμοι μόνο οι τρεις σταθμοί εξυπηρέτησης.

Για τα δύο διαφορετικά σενάρια ζήτησης που εξετάστηκαν, προσομοιώνοντας ως πιθανοτική κατανομή το ρυθμό εξυπηρέτησεως (μ), και για δεδομένο αριθμό σταθμών εξυπηρέτησεως (s), επιδιώχθηκε η βελτιστοποίηση του ρυθμού αφίξεων (λ), μέσω του αποκλεισμού κατηγοριών χρηστών. Φάνηκε πως και για τα δύο σενάρια, επιλέχθηκε ο αποκλεισμός των ίδιων χρηστών, για δεδομένο αριθμό σταθμών εξυπηρέτησεως (s). Όταν ο σταθμός εξυπηρέτησης ήταν μόνο ένας, έπρεπε να υπάρξει επιλογή των κατηγοριών πελατών που θα εξυπηρευτούν από το σύστημα ανεφοδιασμού, προκειμένου να επιτευχθεί κέρδος και να αποκλειστεί η πιθανότητα οικονομικής ζημίας.

Στη συνέχεια, για δεδομένο ρυθμό εξυπηρέτησεως (μ) και ρυθμό αφίξεων (λ), αυτόν που προήλθε από τη βέλτιστη επιλογή αποκλεισμού κατηγοριών πελατών, επιχειρήθηκε η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της πιθανοτικής κατανομής καθαρού κέρδους από το σύστημα ανεφοδιασμού. Η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της πιθανοτικής κατανομής θα μπορούσε να αντικατασταθεί από οποιαδήποτε άλλη μετρική, όπως είναι η μεγιστοποίηση του μέγιστου πιθανού κέρδους, κατά βούληση του αποφασίζοντα το σύστημα. Η στοχαστική βελτιστοποίηση θα απέφερε τότε, τη νέα βέλτιστη πρακτική, ως προς τον αποκλεισμό κατηγοριών πελατών και το βέλτιστο αριθμό σταθμών εξυπηρέτησης. Φάνηκε πως πάνω από κάποιο επίπεδο εξυπηρέτησης, η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής κέρδους αρχίζει να μειώνεται ως απόρροια του αυξημένου σταθερού κόστους διαθέσεως.

Τα δύο παραπάνω φαινόμενα θεωρούνται απόρροια του αρκετά μεγάλου επιπέδου εξυπηρέτησης του συστήματος ανεφοδιασμού. Η πιθανότητα εξυπηρέτησης, στην περίπτωση της μεγιστοποίησης της μέσης κατανομής της πιθανοτικής κατανομής κέρδους, είναι τουλάχιστον 99.90% αναδεικνύοντας τη σημασία του κόστους αποχωρήσεως κάποιου πλοίου από το σύστημα ανεφοδιασμού. Οι σταθμοί εξυπηρέτησης θεωρήθηκαν ίδιοι, ως απόρροια της ανάλυσης με μοντέλα Poisson. Θα ήταν ενδιαφέρουσα η εξειδίκευσή τους, ως προς τη χωρητικότητα δεξαμενών τους, ή η διερεύνηση του σεναρίου ανάθεσης ζωνών ευθύνης στα πλοία bunker.

Ο χρόνος μετάβασης του πλοίου bunker προς το ανεφοδιαζόμενο πλοίο θεωρήθηκε ίσος με μισή ώρα. Αν ήταν μεγαλύτερος, ο χρόνος παραμονής του πλοίου στο σύστημα θα ήταν μεγαλύτερος και επομένως, θα περιοριζόταν το κέρδος του συστήματος. Θεωρείται πως η μισή ώρα είναι χρόνος που μπορεί να επιτευχθεί από ελεύθερο πλοίο bunker κοντά στο λιμένα Πειραιώς. Θα ήταν ενδιαφέρουσα η παρατήρηση του χρόνου αυτού, κατά τη λειτουργία του συστήματος και η αντικατάσταση της αρχικής εκτίμησης από κάποια πιθανοτική κατανομή. Ενδιαφέρουσα θα ήταν επίσης, η αντικατάσταση των υπόλοιπων παραδοχών για τα μεγέθη της συνάρτησης κέρδους από πιθανοτικές κατανομές, που έχουν προέλθει από παρατηρήσεις κατά τη λειτουργία του συστήματος, ή από τη λειτουργία παρόμοιων συστημάτων ανεφοδιασμού.

- Alderton, P.M., 1995. *Sea transport: Operation and Economics*, 4th ed. Surrey: Thomas Reed Publications.
- Fathom shipping and Lloyd's Register, 2011. *Emission Control Areas; The Guide, Part 1*. n.d., s.l., s.n.
- Fishman, G.S. 1996. *Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications*, Springer, New York.
- Gentle, J.E. 1998. *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*, Springer, New York.
- Germanischer Lloyd and MAN (2013). *Costs and benefits of LNG as ship fuel for container vessels: Key results from a GL and MAN joint study*.
- IMO (International Maritime Organization), 2013a. *Prevention of Air Pollution from Ships*. [Online] Available at: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> [Accessed 31 July 2015].
- IMO (International Maritime Organization), 2013b. *Sulphur Oxides (SO_x)-Regulation 14*. [Online] Available at: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SO_x\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx) [Accessed 31 July 2015].
- IMO (International Maritime Organization), 2013c. *Nitrogen Oxides (NO_x)-Regulation 13*. [Online] Available at: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NO_x\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx) [Accessed 31 July 2015].
- Kochanski, G. 2005. *Monte Carlo Simulation*, [Online]. Available at: <http://kochanski.org/gpk/teaching/0501Oxford/MonteCarlo.pdf> [Accessed 31 July 2015].
- Lorenc, L., 2011. The best solution is LNG. *Baltic transport journal*, pp. 25-29.
- Mann Tek (n.d). *Dry Disconnect Couplings*. [Online]. Available at: <http://www.mann-tek.com/products/dry-disconnect-couplings/technical-information> [Accessed 31 July 2015].
- Pengelly, J. 2002. *Monte Carlo Methods*, [Online]. Available at: http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/monte_carlo.pdf [Accessed 31 July 2015].
- Rubinstein, R.Y. 1981. *Simulation and the Monte Carlo method*, John Wiley and Sons, New York.

- Rubinstein, R.Y. 1986. *Monte Carlo optimization, simulation and sensitivity of queuing networks*, John Wiley and Sons, New York.
- Stenersen, D., 2011. *Gas fuelled ships; LNG- Fuelled engines and Fuel systems for medium- speed engines in Maritime applications*. In: GTS technical seminar series.
- Vose, D. 2000. *Risk analysis: a quantitative guide*, 2nd edn, J. Wiley, Chichester.
- Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (n.d). *Το εθνικό σύστημα Φυσικού Αερίου*. [Online]. Available at: <http://www.desfa.gr/default.asp?pid=165&la> [Accessed 31 July 2015].
- Ζαχαριουδάκης, 2014. *The Costa Project- The financials of LNG “as fuel”*. In: SNAME (Society of Naval and Marine Engineers). *Greek section’s seventh technical meeting. 20 March 2014*.
- Κυρτάτος, Ν., 2013. *Διδασκαλία στη μείωση εκπομπής ρύπων από ναυτικούς κινητήρες. (23 Μαΐου 2013)*.
- Κυρτάτος, Ν., n.d. *Σημαντικά θέματα έρευνας και εξέλιξης στους ναυτικούς κινητήρες Diesel*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας.
- Κωσταράς, Γ. 2012. *Θεωρία Ουρών, Μελέτη και Σύγκριση μοντέλων μιας υπηρεσίας*. Διπλωματική Εργασία (ΔΠΜΣ Μαθηματικά των Υπολογιστών και των Αποφάσεων). Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Ξηροκόστας, Δ.Α. 1991. *Επιχειρησιακή Έρευνα: Εφαρμοσμένη θεωρία αναμονής*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Σιμόπουλος, Σ.Ε. 1989. *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*, 2η έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.