



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιωτίδης Δανιήλ - Αβραάμ

Επιβλέπων: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιωτίδης Δανιήλ - Αβραάμ

Επιβλέπων: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις:

Θ. Μιχαλακόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής

Γ. Παναγιώτου, Καθηγητής

Κ. Αδάμ, Επίκουρος Καθηγήτρια

---

---

---

---

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2014

.....

Δανιήλ Αβραάμ Παναγιωτίδης

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

Copyright © Δανιήλ Αβραάμ Παναγιωτίδης, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>v</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xii</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Προσομοίωση και μεταλλευτική βιομηχανία .....	1
1.2 Στόχοι της παρούσας εργασίας .....	1
1.3 Δομή εργασίας .....	2
1.4 Περιορισμοί εργασίας .....	3
<b>2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ – ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ</b> .....	<b>4</b>
2.1 Συστήματα εξόρυξης – φόρτωσης – μεταφοράς .....	4
2.1.1 Συστήματα καδοφόρου εκσκαφέα .....	4
2.1.1 Ταινιόδρομοι .....	6
2.2 Μέθοδος εκμετάλλευσης λιγνιτικών κοιτασμάτων Ελλάδας .....	8
2.2.1 Μέθοδος εκμετάλλευσης Terrace mining .....	9
2.3 Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας .....	12
2.3.1 Κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά ΛΚΔΜ .....	15
2.3.2 Ορυχείο Καρδιάς .....	16
<b>3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ</b> .....	<b>22</b>
3.1 Η προσομοίωση ως μέσο μελέτης συστημάτων .....	22
3.2 Εφαρμογές της προσομοίωσης σε εξορυκτικές δραστηριότητες .....	22
3.3 Κατηγορίες προσομοίωσης .....	23

3.4	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα προσομοίωσης.....	25
3.5	Συνήθειες αστοχίες στην προσομοίωση .....	26
3.6	Προσομοίωση διακριτών γεγονότων συνεχών συστημάτων .....	27
3.7	Βασικές έννοιες στην προσομοίωση.....	28
3.8	Στάδια μελέτης προσομοίωσης.....	29
3.9	Εργαλεία προσομοίωσης.....	32
3.10	Το λογισμικό προσομοίωσης Arena.....	32
<b>4</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ.....</b>	<b>36</b>
4.1	Στοιχεία πιθανοτήτων και στατιστικής.....	36
4.1.1	Τυχαίες μεταβλητές .....	36
4.2	Προσαρμογή κατανομών πιθανοτήτων .....	39
4.2.1	Παραμετροποίηση συνεχών κατανομών .....	40
4.3	Συνεχείς θεωρητικές κατανομές .....	41
4.3.1	Κατανομή Erlang.....	41
4.3.2	Κατανομή Lognormal.....	43
4.3.3	Κατανομή Weibull.....	45
4.3.4	Τριγωνική κατανομή .....	47
4.4	Εμπειρικές κατανομές.....	48
4.5	Έλεγχος ανεξαρτησίας δειγμάτων .....	49
<b>5</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΚΑΡΔΙΑΣ.....</b>	<b>50</b>
5.1	Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης .....	50
5.2	Η δομή του μοντέλου.....	56
5.2.1	Κύριο πλαίσιο .....	56
5.2.2	Υπομοντέλο αρχικοποίησης αποθετών .....	57
5.2.3	Υπομοντέλα ελέγχου αποθετών .....	57
5.2.4	Υπομοντέλα αρχικοποίησης εκσκαφών.....	57
5.2.5	Υπομοντέλα ελέγχου παραγωγής .....	58

5.2.6	Υπομοντέλα μεταφοράς υλικού προς τον κόμβο .....	59
5.2.7	Υπομοντέλα μεταφοράς υλικού επί του κόμβου .....	59
5.2.8	Υπομοντέλα αλλαγής προορισμού .....	60
5.2.9	Υπομοντέλο μεταφοράς προς τον τελικό προορισμό .....	62
5.2.10	Υπομοντέλα ελέγχου κόμβων .....	62
5.2.11	Υπομοντέλα ελέγχου T/Δ κλάδων παραγωγής.....	62
5.2.12	Υπομοντέλα ελέγχου πορείας K/E – Υπομοντέλα μεταφορέων K/E.....	63
5.2.13	Υπομοντέλο προγραμματισμού ετήσιων συντηρήσεων πόρων συστήματος	64
5.2.14	Υπομοντέλο συλλογής στατιστικών .....	65
5.2.15	Έλεγχος βλαβών και προγραμματισμένων συντηρήσεων πόρων συστήματος. .....	66
5.3	Καταγραφή κρατήσεων στο Ορυχείο Καρδιάς.....	66
5.4	Επεξεργασία κρατήσεων εξοπλισμού Ορυχείου Καρδιάς.....	67
5.4.1	Διάκριση κρατήσεων ανά κλάδο .....	69
5.4.2	Διάκριση ανά αιτιολογία κράτησης και μη λειτουργίας .....	70
5.4.3	Προσδιορισμός διάρκειας συμβάντων και χρόνων μεταξύ της εμφάνισης των διαδοχικών συμβάντων.....	71
5.4.4	Απόρριψη μη αποδεκτών τιμών .....	72
5.4.5	Περιγραφική στατιστική.....	74
5.4.6	Υπολογισμός εκατοστημορίων - Διαμόρφωση εμπειρικών κατανομών .....	74
5.4.7	Δημιουργία αρχείων κειμένου με τα δεδομένα .....	75
5.4.8	Υπολογισμός παραμέτρων θεωρητικών κατανομών.....	76
5.4.9	Έλεγχος της προσαρμογής των θεωρητικών κατανομών.....	77
5.5	Επαλήθευση του μοντέλου – Verification .....	78
<b>6</b>	<b>ΕΚΤΕΛΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	<b>80</b>
6.1	Κατηγορίες κατανομών .....	80
6.2	Εισαγωγή των κατανομών στο μοντέλο .....	80
6.3	Ρυθμίσεις εκτελέσεων της προσομοίωσης.....	83

6.4	Επικύρωση του μοντέλου – Validation .....	84
6.5	Παραγωγικές εκτελέσεις και αποτελέσματα .....	86
6.5.1	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	86
6.5.2	Προσομοίωση με χρήση σύνθετων εμπειρικών κατανομών .....	87
6.5.3	Προσομοίωση με χρήση απλοποιημένων εμπειρικών κατανομών .....	97
6.5.4	Προσομοίωση με χρήση θεωρητικών κατανομών .....	100
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>106</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>108</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Πίνακες στοιχείων περιγραφικής Στατιστικής .....</b>	<b>I</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Πίνακες τιμών παραμέτρων θεωρητικών κατανομών.....</b>	<b>VIII</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Αποτελέσματα των επιμέρους επαναλήψεων κάθε προσομοίωσης ...</b> <b>.....</b>	<b>XII</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Παράλληλη προχώρηση, χωρίς κόμβο (πάνω), με κόμβο (κάτω) .....	11
Σχήμα 2.2 Στροφική λειτουργία ορυχείου.....	12
Σχήμα 2.3 Ετήσιες παραγωγές λιγνίτη στην Ελλάδα .....	14
Σχήμα 2.4 Τοπογραφική αποτύπωση Ορυχείου Καρδιάς το έτος 2006.....	20
Σχήμα 2.5 Κλάδοι Ορυχείου Καρδιάς.....	21
Σχήμα 3.1 Τρόποι μελέτης ενός συστήματος.....	24
Σχήμα 3.2 Μεταβλητές συνεχούς και διακριτού συστήματος συναρτήσει του χρόνου.....	25
Σχήμα 3.3 Συνεχής και διακριτή συμπεριφορά μεταφοράς υλικού. ....	28
Σχήμα 3.4 Βήματα μια μελέτης προσομοίωσης .....	31
Σχήμα 4.1 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Erlang για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος, $k$ , και παραμέτρου κλίμακας, $\theta$ .....	42
Σχήμα 4.2 Γραφική παράσταση αθροιστικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της κατανομής Erlang για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος, $k$ , και παραμέτρου κλίμακας, $\theta$ .....	42
Σχήμα 4.3 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Lognormal για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος, $\sigma$ , και παράμετρο κλίμακας $\mu=0$ ..	44
Σχήμα 4.4 Γραφική παράσταση αθροιστικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της κατανομής Lognormal για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος, $\sigma$ .....	44
Σχήμα 4.5 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος, $k$ , και παράμετρο κλίμακας $\lambda=1$ .....	46
Σχήμα 4.6 Γραφική παράσταση αθροιστικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος, $k$ , και παράμετρο κλίμακας $\lambda=1$ .....	46
Σχήμα 4.7 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της τριγωνικής κατανομής.....	47
Σχήμα 4.8 Εμπειρική αθροιστική κατανομή και θεωρητική αθροιστική κατανομή .....	48
Σχήμα 5.1 Διάταξη του υπό μελέτη συστήματος .....	51
Σχήμα 5.2 Τομή Ορυχείου Καρδιάς όπως προσομοιώνεται.....	52
Σχήμα 5.3 Ατέρμονη κυκλική κίνηση οντότητας ελέγχου παραγωγής.....	54
Σχήμα 5.4 Σχέση υπομοντέλων ελέγχου κίνησης και μεταφορέων εκσκαφών.....	64
Σχήμα 5.5 Επικαλυπτόμενα και διαδοχικά γεγονότα και η αντιμετώπιση τους .....	73



Σχήμα 5.6 Ιστόγραμμα συνόλου δεδομένων για την κατανομή DISTR_E4 BWE_maintenance_UP_time και προσαρμογές θεωρητικών μοντέλων .....	78
Σχήμα 6.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων δοκιμαστικής προσομοίωσης με την πραγματικότητα για τις καταστάσεις του E2.....	85
Σχήμα 6.2 Σύγκριση κατάστασης εκσκαφής – μη εκσκαφής E2 για την δοκιμαστική προσομοίωση.....	85
Σχήμα 6.3 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών E1-E3, προσομοίωση EMP1 .....	90
Σχήμα 6.4 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών E4-E6, προσομοίωση EMP1 .....	91
Σχήμα 6.5 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα, προσομοίωση EMP1 .....	92
Σχήμα 6.6 Μεταβολή θέσης εκσκαφών κατά μήκος βαθμίδων, 1 <sup>η</sup> επανάληψη προσομοίωσης EMP1 .....	93
Σχήμα 6.7 Ιστόγραμμα ρυθμών άφιξης λιγνίτη και στείρου στον κόμβο .....	95
Σχήμα 6.8 Ιστόγραμμα ρυθμών άφιξης αθροίσματος λιγνίτη και στείρων στον κόμβο .....	95
Σχήμα 6.9 Ο απαιτούμενος ρυθμός μεταφοράς λιγνίτη και στείρου, 8 <sup>η</sup> επανάληψη προσομοίωσης EMP1 για την περίοδο Μαΐου – Αυγούστου.....	96
Σχήμα 6.10 Ο ρυθμός απόθεσης στείρων, αποθέτης A1, όλες οι επαναλήψεις προσομοίωσης EMP1 για την περίοδο 1/1-10/1 .....	96
Σχήμα 6.11 Η εναλλαγή καταστάσεων του T/Δ του κλάδου E6, όλες οι επαναλήψεις προσομοίωσης EMP1 για την περίοδο 1/1-10/1 .....	96
Σχήμα 6.12 Τύποι συναρτήσεων εμπειρικών κατανομών.....	97
Σχήμα 6.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με εμπειρικές κατανομές (E1-E3) .....	98
Σχήμα 6.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με εμπειρικές κατανομές (E4-E6) .....	99
Σχήμα 6.15 Αναλυτικό ιστόγραμμα κατάστασης KE E/3 – GAMM/10 επαναλήψεις .....	101
Σχήμα 6.16 Συγκριτικό ιστόγραμμα κατάστασης KE E/3: πραγματικότητα – μέση τιμή προσομοίωσης GAMM .....	101
Σχήμα 6.17 Επιμέρους διαφορές πραγματικότητας – μέσης τιμής προσομοίωσης GAMM, K/E E3 .....	101
Σχήμα 6.18 Αυξανόμενη σύγκλιση αποτελεσμάτων με την αύξηση του αριθμού επαναλήψεων.....	102
Σχήμα 6.19 Συγκριτικό ιστόγραμμα κατάστασης K/E E6: πραγματικότητα – μέση τιμή προσομοίωσης GAMM .....	102

Σχήμα 6.20 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα (E1 και E2), προσομοιώσεις με χρήση θεωρητικών κατανομών .....	103
Σχήμα 6.21 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα (E3 και E4), προσομοιώσεις με χρήση θεωρητικών κατανομών .....	104
Σχήμα 6.22 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα (E5 και E6), προσομοιώσεις με χρήση θεωρητικών κατανομών .....	105

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Καδοφόρος εκσκαφέας .....	7
Εικόνα 2.2 Δορυφορική εικόνα ΛΚΔΜ .....	13
Εικόνα 2.3 Πολυστρωματικότητα λιγνιτικών κοιτασμάτων ΛΚΔΜ .....	16
Εικόνα 3.1 Περιβάλλον εργασίας Arena με τα πλαίσια των δομικών μονάδων (modules)	33
Εικόνα 5.1 Η οργάνωση του μοντέλου σε υπομοντέλα. ....	53
Εικόνα 5.2 Animation και πίνακας κατάστασης του συστήματος .....	57
Εικόνα 5.3 Δομή υπομοντέλου αλλαγής προορισμού .....	61
Εικόνα 5.4 Υπομοντέλο ελέγχου κίνησης εκσκαφέων.....	63
Εικόνα 5.5 Υπομοντέλο μεταφορέων εκσκαφέων .....	64
Εικόνα 5.6 Προγραμματισμός ετήσιων συντηρήσεων .....	65
Εικόνα 5.7 Συλλογή τελικών στατιστικών στοιχείων παραγωγής .....	66
Εικόνα 5.8 Η ψηφιακή μορφή του «σεντονιού» καταγραφών κρατήσεων έτους 2006 .....	70
Εικόνα 5.9 Καθορισμός συνόλων δεδομένων με τη χρήση βοηθητικών στηλών .....	74
Εικόνα 5.10 Η μακροεντολή δημιουργίας αρχείων κειμένου .....	76
Εικόνα 5.11 Η χρήση module dispose για την καταγραφή εξαιρέσεων.....	79
Εικόνα 5.12 Η προβολή τιμών μεταβλητών κατάστασης .....	79
Εικόνα 6.1 Μακροεντολή εισαγωγής επιθυμητών κατανομών .....	81
Εικόνα 6.2 Ρυθμίσεις παραγωγικών εκτελέσεων .....	84

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 ΑΗΣ ΛΚΔΜ και εγκατεστημένη ισχύς .....	15
Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά Κ/Ε.....	51
Πίνακας 5.2 Ονομασία εκφράσεων κατανομών (expressions) .....	68
Πίνακας 5.3 Ετήσιες συντηρήσεις και κρατήσεις μεγάλης συνολικής διάρκειας.....	73
Πίνακας 5.4 Συγκρότηση εμπειρικών κατανομών .....	75
Πίνακας 6.1 Κωδικοποίηση των αναλύσεων .....	86

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, η υλοποίηση της οποίας ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2014, εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου «Συστήματα Φόρτωσης – Μεταφοράς σε Τεχνικά Έργα και Μεταλλεία». Η ολοκλήρωσή της, τον Ιούλιο του ίδιου έτους, σημαίνει το τέλος της πενταετούς φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών. Νιώθω μεγάλη υπερηφάνεια και τιμή που υπήρξα μέλος αυτού του ιστορικού Ιδρύματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Επ. Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Θ. Μιχαλακόπουλο, για την ανάθεση του θέματος, τις συμβουλές και διορθώσεις του, καθώς και για την γενικότερη καθοδήγηση που μου παρείχε τον τελευταίο χρόνο των σπουδών μου. Επίσης, ευχαριστώ θερμά την Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ, κα. Κ. Αδάμ, για τις πάντα πολύτιμες συμβουλές της και τον Καθηγητή ΕΜΠ και Διευθυντή του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων, κ. Γ. Παναγιώτου. Η αίσθηση επικοινωνίας και συνεργασίας με όλα τα μέλη του Εργαστηρίου ήταν καθοριστική για την πορεία και ολοκλήρωση της εργασίας. Ευχαριστίες οφείλω και στον Δρ. Χ. Ρούμπο, Τομεάρχη Σχεδιασμού και Μελετών Ορυχείων της ΔΕΗ Α.Ε. και Επ. Καθηγητή στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την παραχώρηση των δεδομένων από το Ορυχείο Καρδιάς της ΔΕΗ Α.Ε. που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια μου για την στήριξή της, χωρίς την οποία, τίποτα δεν θα ήταν εφικτό.

Αθήνα, Ιούλιος 2014.  
Δανιήλ Αβραάμ Παναγιωτίδης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων της Ελλάδας επιτυγχάνεται, κατά κανόνα, με τη χρήση συνεχών συστημάτων εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης, τα οποία συνίστανται από καδοφόρους εκσκαφείς, ταινιόδρομους και αποθέτες (Γερμανική Μέθοδος). Κύριο χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων υπό εκμετάλλευση είναι η συγκρότηση τους από εναλλαγές λιγνιτικών ενστρώσεων και ενστρώσεων στείρων αργιλικών, μαργαϊκών και αμμούχων σχηματισμών. Η ιδιαίτερη αυτή γεωλογία επιβάλλει την εφαρμογή εκλεκτικής εξόρυξης. Οι συχνές αλλαγές του υλικού που εξορύσσεται, συνδυαζόμενες με τις κρατήσεις του πάγιου εξοπλισμού, ενισχύουν την πολυπλοκότητα και στοχαστική φύση της λειτουργίας των ορυχείων. Η ρεαλιστική προσομοίωση των παραπάνω μεταλλευτικών συστημάτων μπορεί να αποτελέσει ισχυρό εργαλείο επιχειρησιακής έρευνας, παρέχοντας εκτιμήσεις για την παραγωγή, τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και τη διακίνηση του υλικού.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων του συστήματος εξόρυξης-φόρτωσης και μεταφοράς του Ορυχείου Καρδιάς της ΔΕΗ Α.Ε. Συγκεκριμένα, στόχος της εργασίας είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης στα αποτελέσματα της μελέτης, που επιφέρει η χρήση διαφορετικών κατανομών πιθανοτήτων για την περιγραφή των τυχαίων μεταβλητών εισόδου (random input variables) και η συνολική αξιολόγηση του ρεαλισμού του μοντέλου.

Αρχικά πραγματοποιείται μια αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση των λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων στην Ελλάδα, στην παραγωγική διαδικασία του υπό εξέταση ορυχείου, στις βασικές έννοιες της προσομοίωσης και στις διαδικασίες προσδιορισμού των κατανομών τυχαίων μεταβλητών εισαγωγής (input modeling). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του ορυχείου που αναπτύχθηκε, οι διαδικασίες διαμόρφωσης των κατανομών και ακολουθεί η επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μελέτης.

Για τη μοντελοποίηση των παραγωγικών συστημάτων του ορυχείου εφαρμόζεται στοχαστική προσέγγιση, δηλαδή χρησιμοποιείται η μέθοδος προσομοίωσης διακριτών γεγονότων που υλοποιείται στο λογισμικό Arena Simulation της Rockwell Automation. Τα

δεδομένα εισόδου προκύπτουν από την επεξεργασία των διαθέσιμων καταγραφών και κρατήσεων του εξοπλισμού του πραγματικού συστήματος για ένα έτος λειτουργίας (2006).

Πραγματοποιούνται δυο κατηγορίες αναλύσεων για το ίδιο μοντέλο προσομοίωσης. Η πρώτη αφορά σε εμπειρικές κατανομές πιθανοτήτων για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών εισόδου ενώ η δεύτερη στη χρήση θεωρητικών κατανομών.

# ABSTRACT

Greece is currently the 3<sup>rd</sup> largest producer of lignite in Europe, with an average annual production of over 60 Mt. The operating lignite mines of the Public Power Corporation S.A. (PPC) use continuous mining systems consisting of bucket-wheel excavators, conveyors and stackers. The most distinctive geological characteristic of the lignite deposits under exploitation, is the existence of multiple intermediate waste layers of sandy and clayey material. These layers are of thickness varying from just a few centimeters up to several meters, requiring frequent changes of the excavating material on each bench. The intense level of selective mining applied by the BWEs combined with random equipment breakdowns is a factor that adds to the complexity and stochastic nature of the mining system. These sources of randomness render the material flow a critical performance parameter.

A successful implementation of a simulation model that represents the above-mentioned mining system, can become a powerful operational research tool providing information regarding production estimates, equipment availability and the presence of possible bottlenecks.

In this thesis, entitled “Output analysis of a simulation model of continuous mining systems in multi-layer lignite deposits”, a discrete-event simulation model is used to perform multiple runs. The simulated mining system that is being represented is the Kardias Mine, owned and operated by the PPC. The use of different types of empirical and theoretical distributions for the input modeling in each run, evaluates its overall validity.

The empirical and theoretical distributions used to model input variables are derived by an extensive statistical analysis of recorded operational data for a period of one calendar year (2006). The simulation model uses the information available regarding the geological model of the deposit under review. The main output variables of interest are the distribution of material flow at the belt conveyor hub, production estimates and equipment availability.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Προσομοίωση και μεταλλευτική βιομηχανία

Οι εξορυκτικές δραστηριότητες χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μεγάλη κλίμακά τους, την πολυετή χρονική διάρκειά τους και από τις υψηλές επενδύσεις που απαιτούν. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με την άμεση επίδραση της εγγενούς γεωλογικής ανομοιογένειας που εμφανίζουν κοιτάσματα μεταλλικών και ενεργειακών ορυκτών, καθώς και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την εκμετάλλευσή τους, ενισχύει τη δυσκολία πρόβλεψης της παραγωγής και οδηγεί στη λήψη σημαντικών αποφάσεων υπό αβεβαιότητα. Η επιτυχημένη προσομοίωση ενός μεταλλευτικού συστήματος μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο επιχειρησιακής έρευνας με στόχο τη λήψη αποφάσεων πλέον υπό ρίσκο. Με τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης προκύπτουν στοιχεία που αφορούν στην παραγωγή του μεταλλείου/ορυχείου, στη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και αποκαλύπτονται οι αιτίες ενδεχόμενων καθυστερήσεων. Επίσης, προσφέρεται η δυνατότητα εξέτασης της επίδρασης εναλλακτικών σχεδιασμών στη συμπεριφορά του συστήματος. Τέλος, μπορεί να μελετηθεί λεπτομερώς μια εξορυκτική δραστηριότητα στη φάση του σχεδιασμού της.

## 1.2 Στόχοι της παρούσας εργασίας

Πρώτος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός επαρκώς ρεαλιστικού μοντέλου προσομοίωσης ενός λιγνιτωρυχείου συνεχούς εκμετάλλευσης, όπου χρησιμοποιούνται καδοφόροι εκσκαφείς, ταινιόδρομοι και αποθέτες. Δεύτερος στόχος είναι η ανάλυση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στις κατανομές που περιγράφουν τις τυχαίες μεταβλητές εισόδου (random input variables). Οι μεταβλητές αυτές αφορούν στη διάρκεια των γεγονότων (event duration) που προσομοιώνονται και στο χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης αυτών (interarrival times). Το ορυχείο υπό μελέτη είναι το Ορυχείο Καρδιάς του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας της ΔΕΗ Α.Ε. και εξετάζεται η λειτουργία του για το χρονικό διάστημα ενός έτους (2006).

Η κύρια μεταβλητή εξόδου (output variable) που μελετάται είναι η κατανομή του ρυθμού άφιξης λιγνίτη και στείρων στον κόμβο ταινιοδρόμων. Το μέγεθος μετράται σε  $m^3/min$  και είναι αυτό που καθορίζει την απαιτούμενη δυναμικότητα των ταινιοδρόμων που



μεταφέρουν τα στείρα στους αποθέτες και το λιγνίτη στον ΑΗΣ και στις θέσεις αποθήκευσης (bunker).

Τα λιγνιτικά κοιτάσματα της Δυτικής Μακεδονίας χαρακτηρίζονται ως πολυστρωματικά (multi-layer deposits), γεγονός που δυσκολεύει και επιβραδύνει τη συνεχή εξόρυξη που επιτελείται από καδοφόρους εκσκαφείς. Επίσης, οι καδοφόροι εκσκαφείς παρουσιάζουν σχετικά με άλλους εκσκαφείς χαμηλό δείκτη διαθεσιμότητας, λόγω του συνεχούς χαρακτήρα του συστήματος, ο οποίος δημιουργεί απόλυτες εξαρτήσεις μεταξύ των μονάδων που συγκροτούν τους επιμέρους κλάδους εξόρυξης και μεταφοράς. Το κύριο, όμως, πρόβλημα είναι ότι ο πολυστρωματικός χαρακτήρας των κοιτασμάτων οδηγεί σε ιδιαίτερα συχνές αλλαγές του υλικού (στείρα/λιγνίτης) που εξορύσσεται από κάθε καδοφόρο εκσκαφέα, καθιστώντας ευμετάβλητο το συνδυασμένο ρυθμό άφιξης υλικού στον κόμβο ταινιοδρόμων.

Συνεπώς, οι λιγνιτικές εκμεταλλεύσεις της περιοχής εμφανίζουν ιδιαίτερα στοχαστική φύση και πολύπλοκη λειτουργία, της οποίας η αναλυτική ή αριθμητική μελέτη παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, καθιστώντας την προσομοίωση κατάλληλο εργαλείο για τη μελέτη της.

### 1.3 Δομή εργασίας

Η εργασία συγκροτείται από 7 κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

**Κεφάλαιο 1:** Είναι το παρόν κεφάλαιο και η εισαγωγή στο θέμα της εργασίας.

**Κεφάλαιο 2:** Αναφέρονται οι γενικές αρχές και τα χαρακτηριστικά της εκμετάλλευσης των ορυχείων του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας. Επίσης παρουσιάζεται η κατάσταση του Ορυχείου Καρδιάς κατά την περίοδο που μελετάται σε αυτή την εργασία, δηλαδή κατά το έτος 2006.

**Κεφάλαιο 3:** Παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσομοίωσης συστημάτων και συγκεκριμένα η προσομοίωση διακριτών γεγονότων (discrete-event system simulation). Παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες που ακολουθούνται στη συνέχεια.

**Κεφάλαιο 4:** Αρχικά αναφέρονται βασικές έννοιες σχετικές με τη Στατιστική και ιδιαίτερα με τις συναρτήσεις κατανομών πιθανοτήτων. Στη συνέχεια περιγράφεται η

μεθοδολογία διαμόρφωσης κατανομών πιθανοτήτων για τη μοντελοποίηση των τυχαίων μεταβλητών εισόδου (input modeling) σε μια μελέτη προσομοίωσης.

**Κεφάλαιο 5:** Περιγράφεται η δομή και λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης που αναπτύχθηκε. Αναλύεται η διαδικασία με την οποία διαμορφώθηκαν οι κατανομές για την προσομοίωση του Ορυχείου Καρδιάς.

**Κεφάλαιο 6:** Περιγράφονται οι δοκιμαστικές και παραγωγικές εκτελέσεις του μοντέλου προσομοίωσης. Ακολουθούν η επεξεργασία και η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

**Κεφάλαιο 7:** Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης.

**Παράρτημα:** Παρέχονται αναλυτικοί πίνακες δεδομένων και αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν.

## 1.4 Περιορισμοί εργασίας

Με την παρούσα εργασία δεν επιχειρείται να απαντηθούν όλα τα ερωτήματα που τίθενται για το συνολικό προγραμματισμό μιας συνεχούς εκμετάλλευσης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε, αν και προσομοιώνει επαρκώς ρεαλιστικά τη λειτουργία του Ορυχείου Καρδιάς, εστιάζεται στην εξαγωγή αποτελεσμάτων για τη μελέτη του στοχαστικού χαρακτήρα του ρυθμού άφιξης υλικού στον κόμβο ταινιοδρόμων. Ωστόσο, μπορεί να αποτελέσει βάση για τη μελέτη και άλλων προβλημάτων με κατάλληλες προσαρμογές των μεταβλητών εξόδου που καταγράφονται.

Επίσης, παρέχει το πλαίσιο για την προσομοίωση στο μέλλον και άλλων ορυχείων όπου χρησιμοποιείται η συνεχής μέθοδος εξόρυξης και μεταφοράς.

## **2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ – ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

### **2.1 Συστήματα εξόρυξης – φόρτωσης – μεταφοράς**

Κάθε μεταλλευτική δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από βασικές εργασίες, των οποίων η τακτική και επαναλαμβανόμενη εκτέλεση συνιστά το μεταλλευτικό κύκλο. Οι βασικές εργασίες που συγκροτούν μια δραστηριότητα ονομάζονται μοναδιαίες λειτουργίες (unit operations). Στο μεταλλευτικό κύκλο οι παραγωγικές μοναδιαίες λειτουργίες είναι η εξόρυξη, η φόρτωση και η μεταφορά.

Στην Ελλάδα η υπαίθρια εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με συνεχή συστήματα, τα οποία συνίστανται από καδοφόρους εκσκαφείς, ταινιόδρομους και αποθέτες. Η μέθοδος συνεχούς εκμετάλλευσης, ή αλλιώς Γερμανική Μέθοδος, έχει καθιερωθεί ως ο πλέον κατάλληλος και αποδοτικός τρόπος εξόρυξης λιγνιτικών κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης (Παναγιώτου 1990).

Το πλεονέκτημα των συνεχών έναντι των ασυνεχών συστημάτων είναι η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων που παρατηρούνται κατά τη μετάβαση από μια μοναδιαία λειτουργία στην επόμενη. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους αποτελεί η αξιοπιστία του συστήματος, η οποία ταυτίζεται με την αξιοπιστία του πλέον αναξιόπιστου «κρίκου». Δηλαδή, η παύση οποιασδήποτε λειτουργίας προκαλεί την παύση ολόκληρου του συστήματος (Παναγιώτου 1990).

#### **2.1.1 Συστήματα καδοφόρου εκσκαφέα**

Ο καδοφόρος εκσκαφέας (Κ/Ε) είναι ένα από τα πλέον ογκώδη και σύνθετα μηχανήματα της μεταλλευτικής βιομηχανίας, του οποίου η προέλευση εντοπίζεται για πρώτη φορά σε σχέδια του Leonardo Da Vinci. Τα αρχικά σχέδια κατασκευής Κ/Ε που χρονολογούνται στο τέλος του 18<sup>ου</sup> αιώνα, αντιμετώπισαν τις τεχνολογικές προκλήσεις της εξέλιξης των ατμοκίνητων μετωπικών εκσκαφών. Έτσι η πρώτη πρακτική εφαρμογή του ως μηχανήμα εκσκαφής έλαβε χώρα σε λιγνιτωρυχεία της Γερμανίας κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο (SME 2011).

Το σύστημα εκμετάλλευσης με Κ/Ε παρουσιάζει υψηλό κόστος κτήσης, χαμηλό λειτουργικό κόστος και περιορισμένη ευελιξία για ένα περιορισμένο εύρος λειτουργικών εφαρμογών. Επίσης μπορεί να εκτελέσει εκλεκτική εξόρυξη, δυνατότητα ιδιαίτερα κρίσιμη για την εκμετάλλευση πολυστρωματικών κοιτασμάτων.

Οι Κ/Ε χαρακτηρίζονται από μεγάλο περιθώριο προσαρμογής και ποικιλίας σε σχεδιασμό και προδιαγραφές καθιστώντας κάθε μηχανήμα μοναδικό. Οι μεγάλης δυναμικότητας, κατασκευάζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αγοραστή – χρήστη, ούτως ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις μιας εκμετάλλευσης (job – tailored machines) (Παναγιώτου 1990).

Χαρακτηρίζονται από στιβαρό σχεδιασμό που τους προσδίδει μεγάλη διάρκεια ζωής. Το πιο σύνηθες πεδίο εφαρμογής αποτελούν μη συνεκτικά υπερκείμενα και λιγνιτικά στρώματα, καθώς και η διαχείριση υλικού αποθέσεων.

Υπάρχουν τρεις τύποι Κ/Ε σε εξορυκτικές δραστηριότητες:

- I. Συστήματα άμεσης τροφοδότησης σε μετακινούμενο σύστημα μεταφορικών ταινιών που συνδέεται με σειρά ταινιοδρόμων και σύστημα απόθεσης. Τέτοια μηχανήματα ζυγίζουν έως και 12500 t και εξορύσσουν υλικό με ρυθμούς άνω των 10000 m<sup>3</sup>/h.
- II. Συστήματα με προβόλους μεγάλου μήκους άμεσης απόθεσης.
- III. Μικρότερα συστήματα για ύψος βαθμίδων 10-15 m και ρυθμούς παραγωγής 1000-2000 m<sup>3</sup>/h.

Η τυποποίηση των Κ/Ε ακολουθεί μια λογική προσέγγιση. Σύμφωνα με αυτήν, ένα τυπικό, γερμανικής κατασκευής μοντέλο ονομάζεται ως εξής (Thyssen Krupp Foerdertechnik 2005)

$$SchRs \frac{1600}{2.5} - 28 \times 12$$

Όπου:

- Sch = Schaufelradbagger (ή απλώς Bagger), η γερμανική ονομασία Κ/Ε
- R = auf Raupen, που σημαίνει ότι το σύστημα πορείας συγκροτείται από ερπύστριες
- 1600 = Η ονομαστική χωρητικότητα κάδου (lt)

- 2,5 = Το βάθος κάτω από το επίπεδο πορείας που έχει δυνατότητα να εξορύξει (m)
- 28 = Το ύψος άνω του επιπέδου πορείας που έχει δυνατότητα να εξορύξει (m)
- 12 = Το μήκος επιμήκυνσης του βραχίονα καδοτροχού

Συγκριτικά με άλλους εκσκαφείς οι Κ/Ε παρουσιάζουν μικρή κατανάλωση ειδικής ενέργειας εκσκαφής. Η απουσία ανάπτυξης μεγάλων δυναμικών φορτίων στα δομικά στοιχεία τους κατά την εξόρυξη πετρωμάτων είναι ένα ακόμα πλεονέκτημά τους (SME 2011).

Επίσης, αφιερώνουν μικρό ποσοστό του διαθέσιμου χρόνου στις μετακινήσεις τους σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μηχανήματα. Οι Κ/Ε, όμως, παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό καθυστερήσεων, που οφείλονται κυρίως στην πολύπλοκη συγκρότηση των μηχανημάτων και στις βλάβες που παρουσιάζουν, τη χρονοβόρο συντήρησή τους, καθώς και στην εξάρτηση της λειτουργίας τους από το δίκτυο ταινιοδρόμων, που αποτελούν το κύριο μέσο μεταφοράς του προϊόντος της εξόρυξης.

Όπως αναφέρθηκε, ο Κ/Ε προσφέρει τη δυνατότητα να εξορύσσει εκλεκτικά διάφορα στρώματα σχηματισμών. Το γεγονός αυτό τον καθιστά κατάλληλο για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων στα οποία παρατηρείται εναλλαγή στρωμάτων αγόνων και χρήσιμων υλικών, φαινόμενο σύνηθες στις λιγνιτικές εκμεταλλεύσεις. Ο λιγνίτης και οι υπερκείμενες ή ενδιάμεσες ενστρώσεις αγόνων μπορούν να εξορυχθούν ξεχωριστά από τον Κ/Ε και με το δίκτυο ταινιοδρόμων να μεταφερθούν στις πλατείες συγκέντρωσης λιγνίτη ή στους χώρους απόθεσης των αγόνων αντίστοιχα, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα μόλυνσης του λιγνίτη από τα άγονα. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η ικανότητα του Κ/Ε να εξορύσσει λεπτά στρώματα, μέχρι και 100mm όμως με παράλληλη μείωση της απόδοσης του (Παναγιώτου 1990). Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται καδοφόρος εκσκαφέας.

### 2.1.1 Ταινιόδρομοι

Από την πρώτη εφαρμογή τους, στο πρώτο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι ταινιόδρομοι (Τ/Δ), εξαιτίας της απλότητας και αξιοπιστίας που παρουσιάζουν έχουν καταστεί αναπόσπαστο τμήμα εγκαταστάσεων μετακίνησης, αποθήκευσης ή επεξεργασίας υλικών. Επιτρέπουν τη βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου χώρου και προσφέρουν ευελιξία στο σχεδιασμό της διαδικασίας ροής υλικού. Το κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με χωματουργικά αυτοκίνητα εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Το λειτουργικό, όμως, κόστος των Τ/Δ είναι πολύ χαμηλότερο. Γενικά όσο μεγαλύτερο το σύστημα, τόσο μεγαλύτερη η εξοικονόμηση

λειτουργικών δαπανών σε σύγκριση με το ισοδύναμο ασυνεχές σύστημα χωματουργικών αυτοκινήτων. Η σύγχρονη τεχνολογία επιτρέπει τη λειτουργία Τ/Δ δεκάδων χιλιομέτρων. Η ταχύτητα τους ποικίλει από μικρότερη του 1 m/s έως 8,5 m/s, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνει μέχρι και 15 m/s για συστήματα μεγαλύτερης εξάπλωσης που διαχειρίζονται 40000 t/h. Το μέγιστο πλάτος των μεταφορικών ταινιών περιορίζεται στα 3.2 m χρησιμοποιώντας συμβατικές κατασκευαστικές τεχνικές. Το πλάτος των ταινιόδρομων καθορίζεται από τη δυναμικότητα, τη λειτουργική ταχύτητα και το μέγιστο όγκο μεταφερόμενων τεμαχίων (SME 2011).



*Εικόνα 2.1 Καδοφόρος εκσκαφέας (ιστότοπος ThyssenKrupp AG)*

Τα συστήματα μεταφοράς που συνίστανται από Τ/Δ εμφανίζουν τα εξής πλεονεκτήματα (Atkinson 1985):

- Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και μείωση κατανάλωσης καυσίμων
- Δεν απαιτούνται ελαστικά
- Η λειτουργία τους απαιτεί μικρότερο αριθμό εργαζομένων
- Απλά σε σχεδιασμό και λειτουργία, δίχως την ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού
- Δυνατότητα χωριστής διακίνησης διαφόρων ποιοτήτων/περιεκτικοτήτων και στείρων

Ταυτόχρονα όμως η εφαρμογή συστημάτων Τ/Δ συνοδεύεται και από τα εξής μειονεκτήματα (Atkinson 1985):

- Το σύστημα είναι λιγότερο ευέλικτο σε σχέση με συστήματα μεταφοράς που συνίστανται από χωματουργικά αυτοκίνητα
- Απαιτείται σύνθετος εξοπλισμός για την απόθεση υλικού σε αντίθεση με την απλή ανατροπή των φορτηγών
- Παρουσιάζουν υψηλό κόστος κτήσης και επομένως αρμόζουν σε εκμεταλλεύσεις μεγάλου μεγέθους και μακράς διάρκειας ζωής
- Απαιτείται η μείωση την κοκκομετρίας του υλικού
- Η εμφάνιση βλάβης σε οποιοδήποτε τμήμα ακινητοποιεί το σύνολο του συστήματος (παρόλο που ο συντελεστής διαθεσιμότητας του εξοπλισμού αγγίζει συνήθως το 80 %)

## 2.2 Μέθοδος εκμετάλλευσης λιγνιτικών κοιτασμάτων Ελλάδας

Οι επιφανειακές εκμεταλλεύσεις μπορούν να διακριθούν σε τρεις βασικούς τύπους:

- Επιφανειακή εκμετάλλευση κοιτασμάτων κατά λωρίδες (Strip mining).
- Επιφανειακή εκμετάλλευση με βαθμίδες για κοιτάσματα μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης (Terrace mining).
- Επιφανειακή εκμετάλλευση χονοειδούς μορφής (Open pit mining)

Η επιλογή του τύπου εκμετάλλευσης εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του κοιτάσματος.

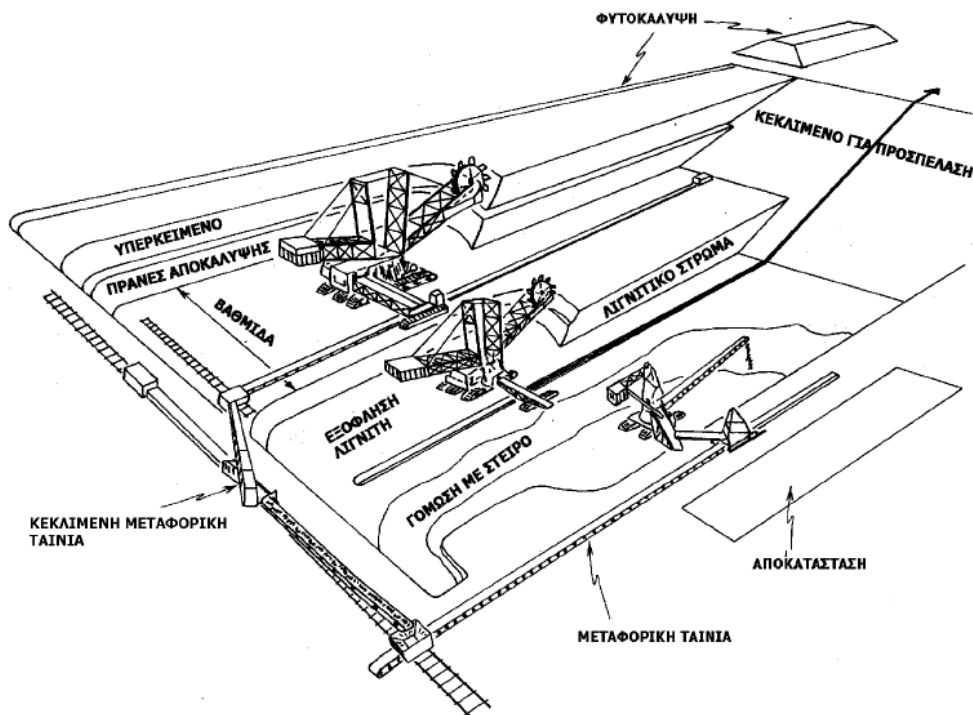
Τα χαρακτηριστικά των λιγνιτικών πολυστρωματικών κοιτασμάτων Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης σε συνδυασμό με τους αναγκαίους υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, επέβαλαν από την έναρξη της εξορυκτικής δραστηριότητας, την επιλογή της επιφανειακής εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων με την εφαρμογή της συνεχούς εκσκαφής, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα ορθών βαθμίδων (Terrace mining).

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τη χρησιμοποίηση ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων συνεχούς λειτουργίας μεγάλης δυναμικότητας για την εκσκαφή (καδοφόροι εκσκαφείς), τη μεταφορά (ταινιόδρομοι) και απόθεση (αποθέτες). Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου είναι οι επιφανειακές εκμεταλλεύσεις κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης και μεγάλου πάχους που καλύπτονται από γεωλογικά νεώτερους και μεγάλου πάχους υπερκείμενους σχηματισμούς, ενώ παράλληλα οι σχηματισμοί αυτοί είναι χαλαρά συνδεδεμένοι, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξόρυξή τους με καδοφόρους εκσκαφείς συνεχούς λειτουργίας και

η μεταφορά τους με ταινιόδρομους. Τα άγωνα μεταφέρονται περιφερειακά, παράλληλα δηλαδή της τάφρου εκμετάλλευσης, και αποτίθενται στον κενό εξοφλημένο χώρο του ορυχείου (Καβουρίδης 2005). Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται αναλυτικότερα η εν λόγω μέθοδος εκμετάλλευσης.

### 2.2.1 Μέθοδος εκμετάλλευσης Terrace mining

Η επιφανειακή εξόρυξη κατά βαθμίδες σε συνδυασμό με την πλευρική προχώρηση ονομάζεται terrace mining. Η εν λόγω τεχνική συναντάται κυρίως στα λιγνιτωρυχεία της Γερμανίας, της Πολωνίας, της Ελλάδας και της Τσεχίας. Εξαιτίας της σχετικά χαμηλής θερμογόνου δύναμης του λιγνίτη είναι απαραίτητη η επίτευξη οικονομίας κλίμακας για τη διατήρηση της βιωσιμότητας της εξορυκτικής δραστηριότητας (Atkinson 1980). Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η εκμετάλλευση λιγνιτικού κοιτάσματος με τη μέθοδο terrace mining.



Σχήμα 2.1 Εκμετάλλευση λιγνιτικού κοιτάσματος με τη μέθοδο terrace mining (Μενεγάκη 2010)

Τα ορυχεία στα οποία εφαρμόζεται η τεχνική χαρακτηρίζονται από:

- Μεγάλου πάχους κοιτάσματα
- Μικρές κλίσεις, αλλά και μεγαλύτερες για μεγάλου πάχους κοιτάσματα
- Μεγάλο ύψος υπερκειμένων



- Μικρής γεωλογικής ηλικίας οροφή με χαμηλής συνεκτικότητας σχηματισμούς που μπορεί να εξορυχθεί από Κ/Ε και να μεταφερθεί από υψηλής ταχύτητας Τ/Δ.
- Δυσμενείς συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα (Rheinland Γερμανία, Morwell Αυστραλία, Neyveli Ινδία, Μεγαλόπολη Ελλάδα)
- Προβλήματα ευστάθειας πρανών
- Εκτεταμένη απαλλοτρίωση επιφανειών και δημιουργία μεγάλων εξωτερικών αποθέσεων

Επειδή τα υπερκείμενα ή και το κοιτάσμα έχουν πολύ μεγάλο πάχος, δεν είναι εφικτή η άμεση απόθεση των στείρων εγκάρσια προς την τάφρο εκμετάλλευσης ακόμα και αν χρησιμοποιούνται μεγάλα εκσκαπτικά μηχανήματα. Στην περίπτωση αυτή, τα υπερκείμενα στείρα πρέπει να μεταφέρονται περιφερειακά γύρω από την τάφρο εκμετάλλευσης με ταινιόδρομους, τραίνα ή φορτηγά αυτοκίνητα και να αποτίθενται στον κενό εξοφλημένο χώρο του ορυχείου (Μενεγάκη 2010).

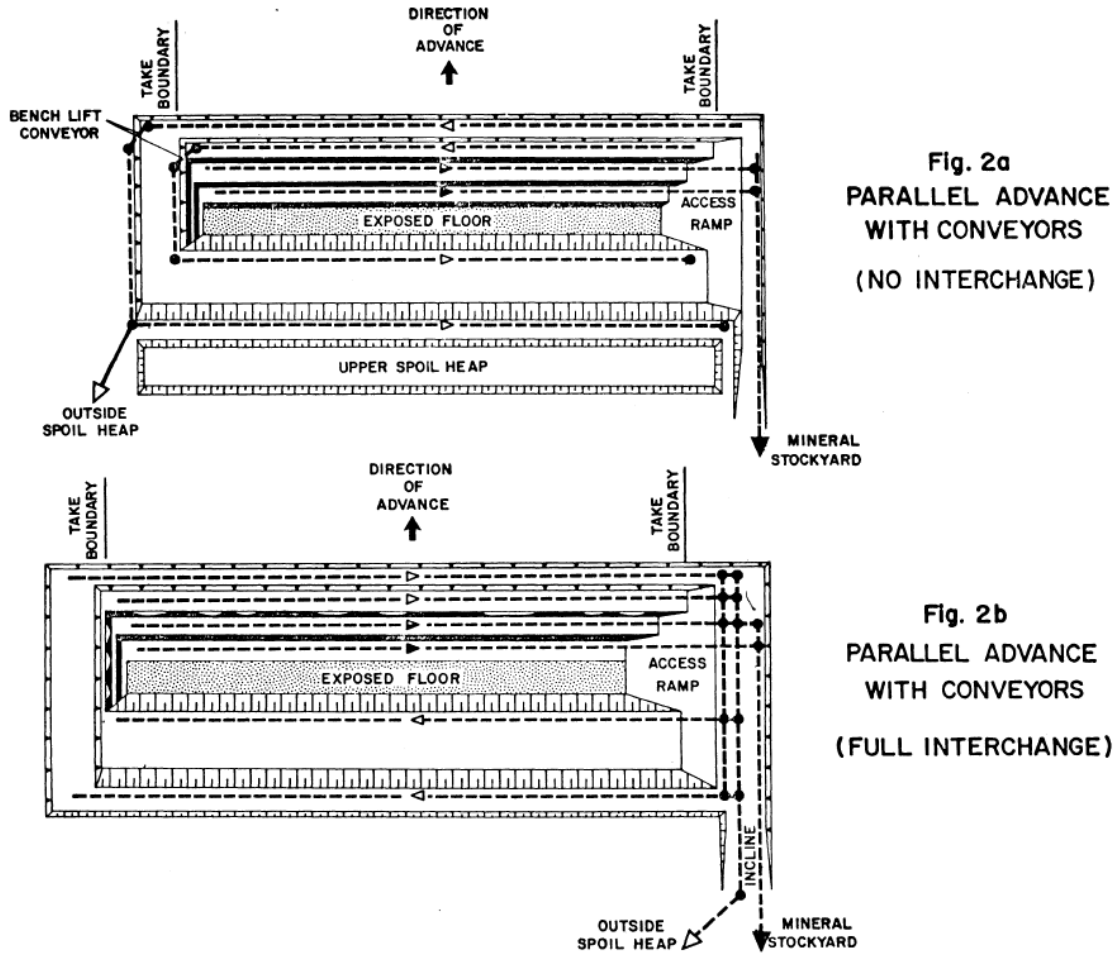
Η προχώρηση μιας συνεχούς εκμετάλλευσης με τη μέθοδο terrace mining πραγματοποιείται με δύο διαφορετικές τεχνικές:

1. Παράλληλη προχώρηση
2. Στροφική λειτουργία ορυχείου

Η εκμετάλλευση κοιτασμάτων ενδέχεται να επιτυγχάνεται με συνδυασμό των δύο τεχνικών.

#### Παράλληλη προχώρηση:

Το Σχήμα 2.2 (πάνω) δείχνει την εκμετάλλευση κοιτάσματος το οποίο δεν εμφανίζει ενδιάμεσες στείρες ενστρώσεις και επομένως δεν απαιτείται κόμβος Τ/Δ για τη δρομολόγηση του μεταφερόμενου υλικού (λιγνίτης - στείρα). Ταινιόδρομοι ανελκύουν τα στείρα σε κατάλληλες βαθμίδες απόθεσης. Με αυτό το σύστημα παρέχεται έλεγχος του δημιουργούμενου ανοίγματος για περιβαλλοντικούς λόγους (“void control”). Όμως δεν παρέχεται η δυνατότητα επιλεκτικής απόληψης για βελτίωση της ευστάθειας. Στην περίπτωση φακοειδών κοιτασμάτων, σχηματισμών με ακανόνιστη επιφάνεια ή παρουσίας στείρων ενδιάμεσων ενστρώσεων απαιτείται κόμβος Τ/Δ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (κάτω). Αυτό το σύστημα υψηλής εκλεκτικής απόθεσης μπορεί να δημιουργήσει σταθερότερους σωρούς απόθεσης.



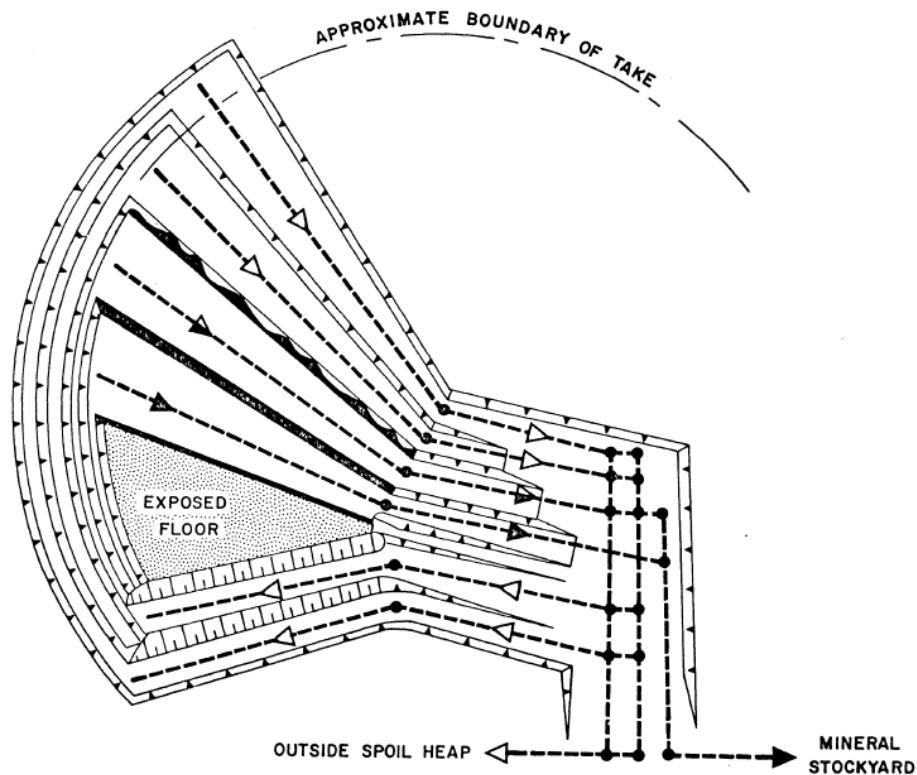
Σχήμα 2.1 Παράλληλη προχώρηση, χωρίς κόμβο (πάνω), με κόμβο (κάτω) (Atkinson and Carter 1980)

### Στροφική λειτουργία:

Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν τα όρια του κοιτάσματος ακολουθούν περίπου ένα κυκλικό τόξο. Για την αποφυγή εκτεταμένων επιμηκύνσεων/επιβραχύνσεων των Τ/Δ, τα σημεία περιστροφής τους πρέπει να συγκεντρώνονται σε μικρή απόσταση. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται οριζοντιογραφία εκμετάλλευσης ορυχείου με στροφική λειτουργία.

Η απόθεση των αγόνων διενεργείται μέσω των αποθετών, με κατάλληλο σχεδιασμό έτσι ώστε να εναρμονίζεται με το γενικότερο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Αρχικά, κατά την εξωτερική απόθεση αγόνων, επιλέγονται κενοί χώροι άλλων εξοφλημένων ορυχείων ή άλλες κατάλληλες περιοχές ενώ στη συνέχεια, όταν δημιουργείται κενός χώρος εντός του ορυχείου, η απόθεση διενεργείται εσωτερικά, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ εκσκαφής και απόθεσης να είναι η ελάχιστη δυνατή. Η εσωτερική απόθεση αγόνων

ακολουθεί τις εκσκαφές του ορυχείου για λόγους ευστάθειας των πρανών αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης.



**Fig. 3**  
**ROTATING PIT WITH CONVEYORS**  
**(FULL INTERCHANGE)**

*Σχήμα 2.2 Στροφοική λειτουργία ορυχείου (Atkinson and Carter 1980)*

### 2.3 Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας

Στη Δυτική Μακεδονία και συγκεκριμένα σε μια μεγάλη περιοχή με κέντρο την επαρχία Εορδαίας του νομού Κοζάνης, εκτείνεται η λιγνιτοφόρος λεκάνη Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας, όπου βρίσκονται τα μεγαλύτερα αποθέματα λιγνίτη που διαθέτει ο ελληνικός χώρος. Η περιοχή αυτή αποτελεί το Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ) της ΔΕΗ Α.Ε. Η γεωγραφική θέση του ΛΚΔΜ διακρίνεται στην Εικόνα 2.2.

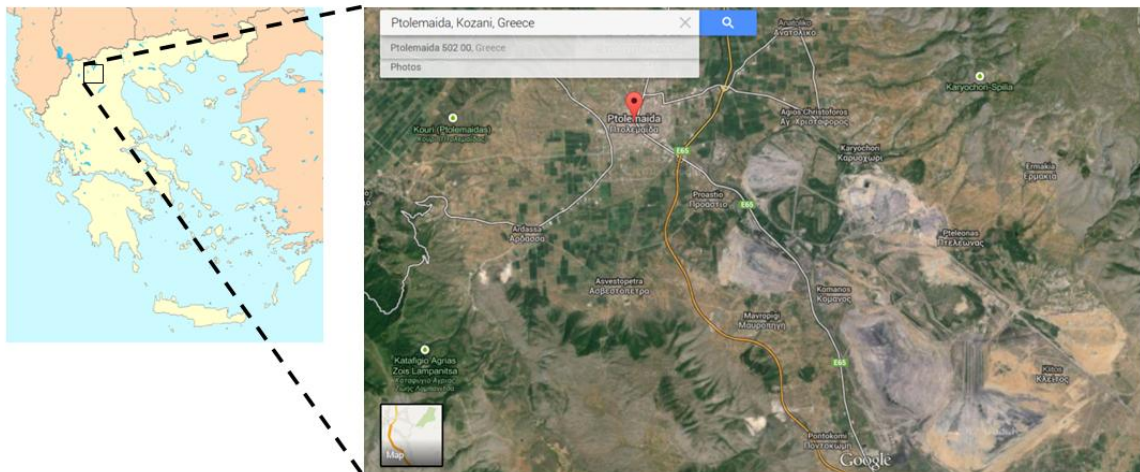
Στο ΛΚΔΜ εξορύσσεται το 80 % του συνολικά παραγόμενου λιγνίτη της χώρας. Η ετήσια παραγωγή λιγνίτη ξεπερνάει τους 50 Mt και οι συνολικές εκσκαφές τα 300 εκατομμύρια  $m^3$ . Από τα αρχικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα της περιοχής, που ανέρχονται σε 2,6 δισ. τόνους λιγνίτη, μέσα σε 50 χρόνια έχουν εξορυχθεί 1,3 δισ. τόνοι λιγνίτη (ΔΕΗ Α.Ε. 2010).

Το ΛΚΔΜ αποτελείται από τα εξής Λιγνιτωρυχεία:

- Λιγνιτωρυχείο ΚΥΡΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ
- Λιγνιτωρυχείο ΚΑΡΔΙΑΣ
- Λιγνιτωρυχείο ΝΟΤΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ
- Λιγνιτωρυχείο ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

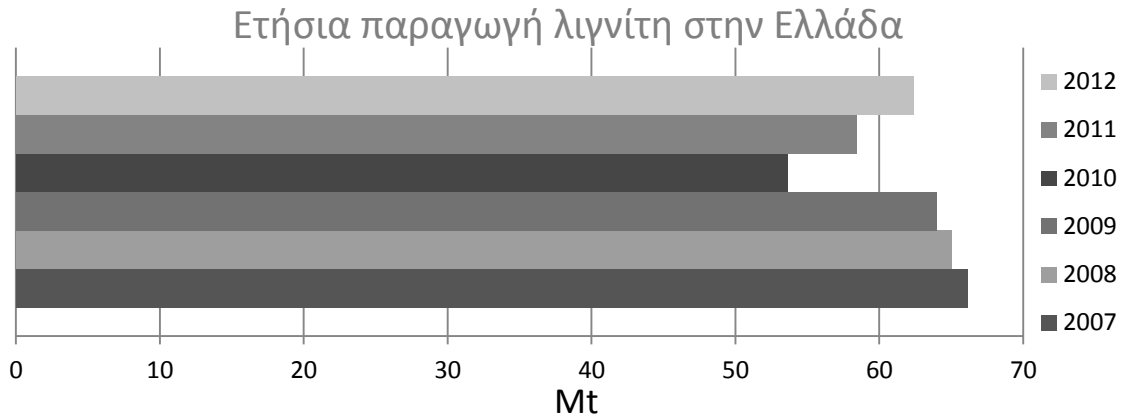
Στα παραπάνω ορυχεία λειτουργούν τα εξής μηχανήματα (ΔΕΗ Α.Ε. 2010):

- 43 ηλεκτροκίνητοι εκσκαφείς διαφόρων δυναμικοτήτων
- 21 ηλεκτροκίνητοι αποθέτες
- 270 km περίπου ταινιοδρόμων
- 1200 περίπου δηζελοκίνητα μηχανήματα (φορτωτές, προωθητές, οχήματα κ.α.)



Εικόνα 2.2 Δορυφορική εικόνα ΛΚΔΜ (Google Maps 2014)

Το Σχήμα 2.4 παρουσιάζει τις ετήσιες παραγωγές λιγνίτη στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια σύμφωνα με στοιχεία του Συνδέσμου Μεταλλευτικών Επιχειρήσεων (2013).



Σχήμα 2.3 Ετήσιες παραγωγές λιγνίτη στην Ελλάδα (ΣΜΕ 2013)

Σύμφωνα με τη Γενική Διεύθυνση Ορυχείων της ΔΕΗ Α.Ε., η οποία μετέχει στο ΣΜΕ, η παραγωγή λιγνίτη το 2012 αυξήθηκε σε σχέση με αυτήν του 2011 κατά 8,6%. Συγκεκριμένα, στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας, στο οποίο ανήκουν τα Ορυχεία Μαυροπηγής (Κύριο Πεδίο), Νοτίου Πεδίου (Νότιο Πεδίο), Νοτιοδυτικού Πεδίου-Υψηλάντη (Πεδίο Καρδιάς) και Αμυνταίου (Πεδίο Αμυνταίου) εξορύχθηκαν 52,1 εκ. τόνοι λιγνίτη έναντι των 47,4 εκ. τόνων του 2011, ενώ στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης, στο οποίο ανήκει το συγκρότημα Ορυχείων Μεγαλόπολης εξορύχθηκαν 9,6 εκ. τόνοι λιγνίτη έναντι των 9,4 εκ. τόνων του 2011. Επίσης από το Ορυχείο Αχλάδας και τη ΛΑΡΚΟ στα Σέρβια Κοζάνης παρήχθησαν 668.000 τον. που διατέθηκαν στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής της Δ. Μακεδονίας.

Η Ελλάδα συνεχίζει να διατηρεί τις υψηλές θέσεις που κατέχει τα τελευταία χρόνια μεταξύ των λιγνιτοπαραγωγών χωρών (3η θέση στην Ε.Ε. και μέσα στις 10 πρώτες παγκοσμίως).

Το 2012, η συμμετοχή του λιγνίτη στο ενεργειακό μίγμα καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας ήταν 54,1%, ενώ η αντίστοιχη συμμετοχή στο σύνολο της Επικράτειας (συμπεριλαμβανομένων και των νησιών) ήταν 47,6%. Οι ενεργειακές μονάδες που τροφοδοτούνται με λιγνίτη από το Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου παρατίθενται στον Πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1 ΑΗΣ ΛΚΔΜ και εγκατεστημένη ισχύς (ΔΕΗ 2014)

Σταθμός	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)
ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ	10+33=43
ΑΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	70+2x125+300=620
ΑΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ	2x300+2x325=1250
ΑΗΣ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	2x300+2x310+375=1595
ΑΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	2x300=600
ΑΗΣ ΜΕΛΙΤΗΣ - ΑΧΛΑΔΑΣ	330
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>4438</b>

### 2.3.1 Κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά ΛΚΔΜ

Ο λιγνίτης Πτολεμαΐδας σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης χρονικής περιόδου (10 εκατομμύρια χρόνια περίπου) και εκτιμάται ότι οι διεργασίες τελείωσαν πριν 1 εκατομμύριο χρόνια. Η ευρύτερη λεκάνη Μοναστηρίου, Φλώρινας, Αμυνταίου, Πτολεμαΐδας, Κοζάνης και Σερβίων καλύπτονταν την εποχή εκείνη από αβαθείς λίμνες και έλη. Οι κλιματολογικές συνθήκες ευνόησαν τη μεγάλη βλάστηση υδροχαρών φυτών (βρύα, καλάμια κ.α.) σε διάφορες θέσεις της λεκάνης. Με το χρόνο τα φυτά αυτά συγκεντρώθηκαν σε μεγάλες ποσότητες στον πυθμένα των λιμνών. Στη συνέχεια η βλάστηση καλύφθηκε από γαιώδη υλικά. Οι οργανικές ύλες των φυτών, ευρισκόμενες υπό πίεση και με την επίδραση διαφόρων μικροοργανισμών, μετατράπηκαν με το χρόνο σε στρώματα λιγνίτη. Αυτό επαναλήφθηκε πολλές φορές και τέλος πάνω από τα νεώτερα στρώματα λιγνίτη επικάθισαν άλλα γαιώδη υλικά, σχηματίζοντας το στρώμα υπερκειμένων. Έτσι προέκυψαν τα λιγνιτικά κοιτάσματα. Το πάχος των υπερκειμένων υλικών κυμαίνεται από 12 μέχρι 230 μέτρα για τα Ορυχεία που βρίσκονται σε λειτουργία στην περιοχή Πτολεμαΐδας. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως άμμος, αμμοχάλικα, μαλακός ασβεστόλιθος και άργιλος. Το κοιτάσμα του λιγνίτη χαρακτηρίζεται ως πολυστρωματικό (τύπου «ζέβρας») διότι μεταξύ των λιγνιτικών στρωμάτων παρεμβάλλονται λεπτές ενστρώσεις από γαιώδη υλικά τα οποία ονομάζονται «ενδιάμεσα». Το μέσο πάχος των απολήξιμων στρωμάτων λιγνίτη ανέρχεται σε 2 μέτρα περίπου, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται από 20 έως 30 (ΔΕΗ Α.Ε. 2014). Μια τυπική μορφή πολυστρωματικού λιγνιτικού κοιτάσματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2.3.

Το μεγαλύτερο λιγνιτικό δυναμικό της χώρας είναι συγκεντρωμένο σε τρεις περιοχές - λεκάνες κατά μήκος του άξονα Φλώρινα - Αμύνταιο - Πτολεμαΐδα - Κοζάνη - Σέρβια. Σταδιακά στην περιοχή Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου δημιουργήθηκε ένα από τα μεγαλύτερα Λιγνιτικά Κέντρα στον κόσμο (ΔΕΗ Α.Ε. 2014).



*Εικόνα 2.3 Πολυστρωματικότητα λιγνιτικών κοιτασμάτων ΛΚΔΜ (Galetakis et al. 2005)*

### 2.3.2 Ορυχείο Καρδιάς

Το Ορυχείο Καρδιάς αποτελεί μια από τις εκμεταλλεύσεις του ΛΚΔΜ, η λειτουργία του οποίου ξεκίνησε το 1971. Από την αρχή της εκμετάλλευσης μέχρι σήμερα η μορφή του ορυχείου έχει αλλάξει δύο φορές αναλόγως με την εξόφληση των λιγνιτικών πεδίων υπό εκμετάλλευση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η λειτουργία του Τομέα 6, ο οποίος αποτελεί τη διάδοχη εκμετάλλευση του εξοφλημένου αρχικού Πεδίου Καρδιάς. Η διάνοιξη του ορυχείου του Τομέα 6 πραγματοποιήθηκε το 1987 και η εξορυκτική δραστηριότητα ξεκίνησε το 1996. Όπως σε όλα τα ορυχεία του ΛΚΔΜ η εξόρυξη λιγνίτη επιτυγχάνεται με τη μέθοδο συνεχούς λειτουργίας εκσκαφής, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα πολλών βαθμίδων (terrace mining). Η μελέτη εκμετάλλευσης του Τομέα 6 έγινε

από τους Κ. Καβουρίδη και Τ. Παπαδόπουλο το 1987. Ο εξορυσσόμενος λιγνίτης τροφοδοτεί τον ισχύος 1250 MW ΑΗΣ Καρδιάς.

Σύμφωνα με τη μελέτη εκμετάλλευσης του ορυχείου το εν λόγω κοίτασμα χωρίζεται σε τρεις στιβάδες:

Υπερκείμενη στιβάδα: Περιλαμβάνει τους νεογενείς σχηματισμούς που υπέρκεινται του ανωτέρου λιγνιτικού στρώματος. Συνίσταται από αργίλους αμμούχους, ασβεστούχους, μάργες, χουμώδεις μάργες, κυρίως πλησίον της λιγνιτοφόρου στιβάδας, καθώς και λεπτόκοκκους άμμους εντός των οποίων παρατηρούνται κατά τόπους φακοειδείς ενστρώσεις ψαμμιτών ή πηλιτών μικρού πάχους. Το χρώμα των ιζημάτων είναι τεφροπράσινο έως τεφρό. Το πάχος της στιβάδας κυμαίνεται ευρύτατα. Στη διακύμανση του πάχους της καθοριστικό ρόλο διαδραμάτισαν οι προπλειστοκαινικές μεταπτώσεις που βύθισαν ή ανύψωσαν επί μέρους τμήματα της περιοχής, δημιουργώντας στη μεν πρώτη περίπτωση συνθήκες νεώτερης ιζηματογένεσης στη δε δεύτερη, διάβρωσης και αποκομιδής μέρους ή όλης της υπερκείμενης νεογενούς στιβάδας. Μερικές φορές μάλιστα η διάβρωση έχει προχωρήσει και μέσα στη λιγνιτοφόρο στιβάδα αποκομίζοντας μεγάλο μέρος της. Έτσι συμβαίνει να παρουσιάζονται σαν υπερκείμενη στιβάδα άγονα ιζήματα τα οποία ουσιαστικά ανήκουν στη λιγνιτοφόρο στιβάδα.

Λιγνιτοφόρος στιβάδα: Η λιγνιτοφόρος στιβάδα αρχίζει με το ανώτερο λιγνιτικό στρώμα και τελειώνει με το κατώτερο. Το πάχος της δεν είναι ενιαίο αλλά μεταβάλλεται. Οι μεταβολές αυτές του πάχους της στιβάδας στα διάφορα τμήματα της περιοχής οφείλονται στις ανωμαλίες του υποβάθρου και στη συνιζηματογενή τεκτονική, ενώ σπουδαίο ρόλο έπαιξε και η διάβρωση που έχει αφαιρέσει, κατά τόπους, μεγάλο μέρος της λιγνιτοφόρου στιβάδας. Η λιγνιτοφόρος στιβάδα αποτελείται από στρώματα λιγνίτη και ενδιάμεσες στείρες ενστρώσεις. Το πάχος και ο αριθμός των λιγνιτικών στρωμάτων κυμαίνεται ευρύτατα από θέση σε θέση και γενικά ακολουθεί τις μεταβολές του πάχους της λιγνιτοφόρου στιβάδας. Το ίδιο συμβαίνει και με τις ενδιάμεσες στείρες ενστρώσεις, οι οποίες συνίστανται κυρίως από γκριζοπράσινες χουμώδεις μάργες, ασβεστούχους, αμμούχους αργίλους, λεπτόκοκκους άμμους, μεταξύ αυτών και ο ορίζοντας της χαρακτηριστικής άμμου, και κιτρινότεφρες μάργες, οι οποίες περιέχουν κατά θέσεις λεπτές φακοειδείς ενστρώσεις μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Γενικά οι ενδιάμεσες στείρες ενστρώσεις εναλλάσσονται με τα λιγνιτικά στρώματα εκτός από το νότιο τμήμα του πεδίου στην περιοχή της Ποντοκόμης, όπου μια ικανού πάχους απόθεση στείρων, στο



μέσον περίπου της στιβάδας, τη χωρίζει σε δύο τμήματα, ανώτερη και κατώτερη λιγνιτοφόρος στιβάδα, όπως συμβαίνει και στο κοιτάσμα του Νοτίου Πεδίου.

Υποκείμενη στιβάδα: Περιλαμβάνει τα νεογενή ιζημάτα, που υπόκεινται του εκάστοτε τελευταίου λιγνιτικού στρώματος, δηλαδή του βαθύτερου λιγνιτικού στρώματος που συναντήθηκε σε κάθε γεώτρηση. Όπως προκύπτει από τις γεωτρήσεις το πάχος των ιζημάτων της στιβάδας δεν είναι σταθερό, αλλά κυμαίνεται από λίγα μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα. Η ανομοιόμορφη αυτή ανάπτυξη της στιβάδας οφείλεται αφενός μεν στις ανωμαλίες του υποβάθρου, αφετέρου στη μη ενιαία εξάπλωση του βαθύτερου λιγνιτικού στρώματος. Κατά κανόνα η υποκείμενη στιβάδα αρχίζει, από πάνω προς τα κάτω με μια λευκότερη μάργα, την «τελική μάργα», η οποία σε συνδυασμό με τον ορίζοντα της χαρακτηριστικής άμμου αποτελεί οδηγό για τη διακοπή των γεωτρήσεων. Σε μερικές γεωτρήσεις η λευκότερη μάργα δεν υπόκειται αμέσως του τελευταίου λιγνιτικού στρώματος, αλλά μεταξύ τους παρεμβάλλεται μια ανοικτότερη απολιθωματοφόρος μάργα, αρκετές φορές χουμώδης. Κάτω από τη λευκότερη αυτή μάργα ακολουθούν ανοικτότερες αργιλούχες μάργες, που συνοδεύονται κατά τόπους από ιλύ και λεπτόκοκκη άμμο. Ακολουθεί μια σειρά από τειροπράσινες αμμούχες αργίλους με παρεμβολές άμμων και η σειρά των ιζημάτων της υποκείμενης στιβάδας τελειώνει με την απόθεση μιας σειράς από ερυθρόπυλους με κροκάλες και αργίλους ερυθροπράσινες με χαλίκια και άμμο. Η τελευταία αυτή σειρά ιζημάτων παρατηρείται κυρίως προς τα κράσπεδα, στα δυτικά όρια του κοιτάσματος.

Στο Ορυχείο Καρδιάς είναι εγκατεστημένος ο εξής πάγιος μηχανικός εξοπλισμός:

- 2 εκσκαφείς KRUPP SchRs 2300
- 4 εκσκαφείς KRUPP SchRs 600
- 1 εκσκαφέας KRUPP SchRs 500
- 2 αποθέτες KRUPP-OK A2Rs 1800
- 1 αποθέτης TAKRAF A2Rs-B6700-60
- 1 αποθέτης FAM B2400
- 40 km ταινιόδρομων (Τ/Δ) πλάτους 1,2-1,8 m

Το ορυχείο Καρδιάς διαθέτει αυλή προσωρινής αποθήκευσης λιγνίτη. Στις εξορυκτικές δραστηριότητες απαιτείται συνήθως η κατασκευή αυλής προσωρινής αποθήκευσης υλικού. Οι αυλές προσωρινής αποθήκευσης γαιάνθρακα είναι εν γένει γνωστές με το

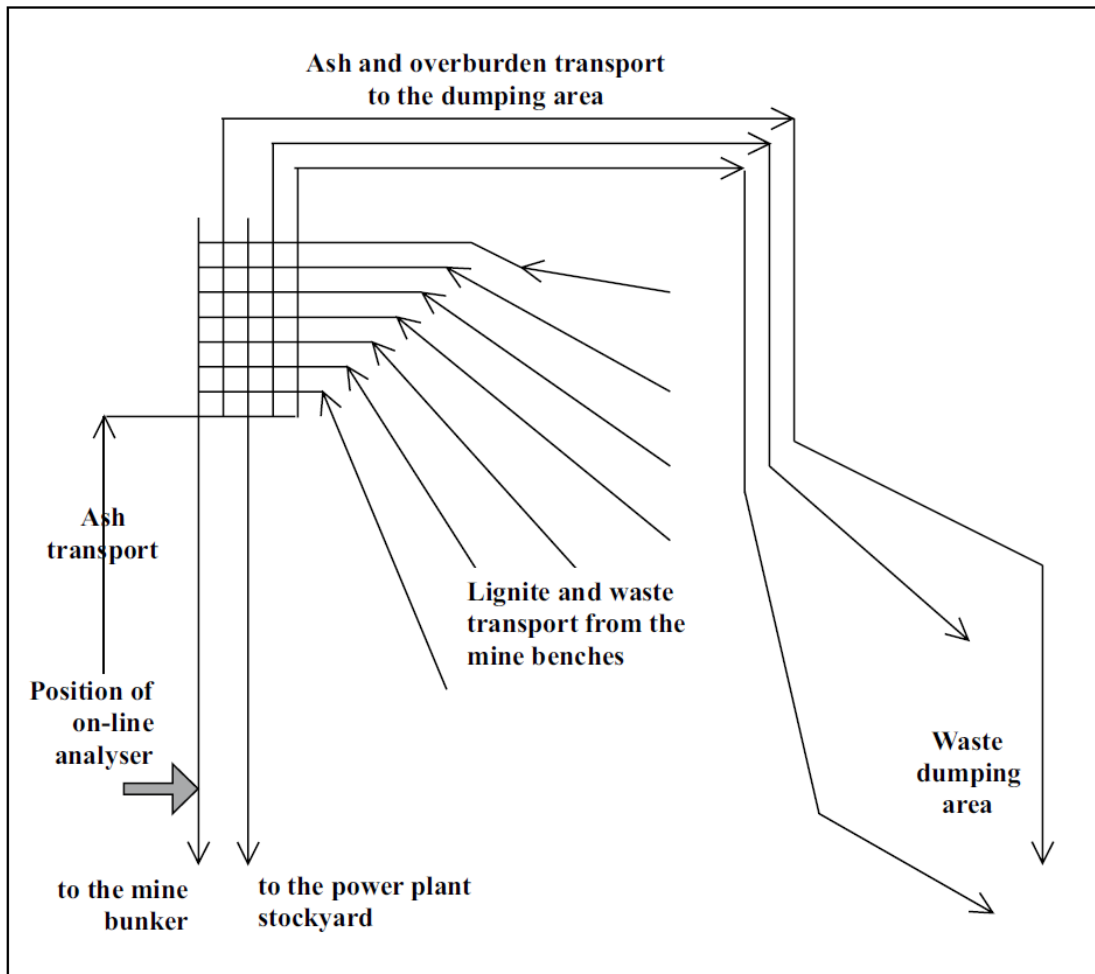
γερμανικό όρο *Bunker*. Οι κύριες λειτουργίες ενός *Bunker* προσωρινής αποθήκευσης λιγνίτη είναι η εξασφάλιση τροφοδοσίας των ΑΗΣ, η μη απώλεια παραγωγής και η ανάμιξη ποιοτήτων (Κολοβός 2010).

Το ορυχείο λειτουργεί σε 24ωρη βάση, 7 ημέρες την εβδομάδα. Η προγραμματισμένη συντήρηση πραγματοποιείται σε εβδομαδιαία βάση και η ετήσια συντήρηση έχει διάρκεια περίπου ενός μήνα και διενεργείται σε περιόδους χαμηλής ενεργειακής ζήτησης.

Ακολουθούν τοπογραφική αποτύπωση του ορυχείου κατά την περίοδο που εξετάζεται στην παρούσα εργασία στο Σχήμα 2.4 και σχεδιάγραμμα των κλάδων παραγωγής και απόθεσης στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4 Τοπογραφική αποτύπωση Ορυχείου Καρδιάς το έτος 2006.



Σχήμα 2.5 Κλάδοι Ορυχείου Καρδιάς (Kavourides and Pavloudakis 2003)

### **3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ**

#### **3.1 Η προσομοίωση ως μέσο μελέτης συστημάτων**

Η προσομοίωση αποτελεί μια αναπαράσταση της εξέλιξης στο χρόνο της λειτουργίας ενός συστήματος. Συγκεκριμένα, αφορά στη δημιουργία και παρακολούθηση ενός τεχνητού ιστορικού της λειτουργίας του συστήματος, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται. Αποτελεί μια μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων και χρησιμοποιείται για να περιγράψει και να αναλύσει τη συμπεριφορά του συστήματος, για τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων αλλά και ως μέσο σχεδιασμού (Banks 1999).

#### **3.2 Εφαρμογές της προσομοίωσης σε εξορυκτικές δραστηριότητες**

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο ως εργαλείο για τη μελέτη εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Η εξορυκτική βιομηχανία απαιτεί υψηλές επενδύσεις, η απόσβεση των οποίων εκτείνεται σε περιόδους πολλών ετών. Η δυνατότητα εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων σχετικά με το σχεδιασμό των εκμεταλλεύσεων, την επιλογή του εξοπλισμού και του προσωπικού είναι κρίσιμη κατά τα αρχικά στάδια ενός έργου. Επίσης, η παραπάνω δυνατότητα ακόμα και για εξορυκτικές δραστηριότητες σε παραγωγική φάση είναι εξίσου σημαντική για την πρόληψη λήψης λανθασμένων αποφάσεων. Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση, προσφέρεται η δυνατότητα για αποτελεσματική λήψη αποφάσεων, που αφορούν σε επενδύσεις, στην οργάνωση και στον προγραμματισμό της παραγωγής, χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία ενός πραγματικού, σε λειτουργία συστήματος (Greberg and Sundqvist 2011).

Η πρώτη στοχαστική προσομοίωση μεταλλευτικής δραστηριότητας πραγματοποιήθηκε το 1961. Από τότε, σε πληθώρα εργασιών παρουσιάζεται η δυνατότητα εφαρμογής της προσομοίωσης σε υπόγειες και υπαίθριες εκμεταλλεύσεις. Κατά τη δεκαετία του 1990 η προσομοίωση εφαρμόστηκε ευρέως, υπογραμμίζοντας τα πλεονεκτήματα της για την εξορυκτική βιομηχανία όχι μόνο ως μέσο προγραμματισμού και οργάνωσης, αλλά και για τη λήψη και υποστήριξη κρίσιμων αποφάσεων, καθώς και για την καλύτερη κατανόηση του συστήματος. Οι αρχικές μελέτες προσομοίωσης είχαν αντικείμενο επιμέρους τμήματα εξορυκτικών διαδικασιών, όπως η επιλογή εξοπλισμού των προπαρασκευαστικών έργων.

Σήμερα το αντικείμενο μελετών διευρύνεται, με την προσομοίωση ενός ολόκληρου μεταλλείου να είναι πλέον εφικτή (Greberg and Sundqvist 2011).

### 3.3 Κατηγορίες προσομοίωσης

Η *αναπαράσταση ενός συστήματος* ορίζεται ως ένα *μοντέλο* αυτού. Εάν οι λογικές και μαθηματικές σχέσεις που το συγκροτούν είναι αρκετά απλές τότε δύναται να χρησιμοποιηθούν μαθηματικές μέθοδοι μελέτης ώστε να προκύψουν οι πληροφορίες που αναζητούνται. Αυτό αποτελεί μια *αναλυτική επίλυση* (Law and Kelton 1991).

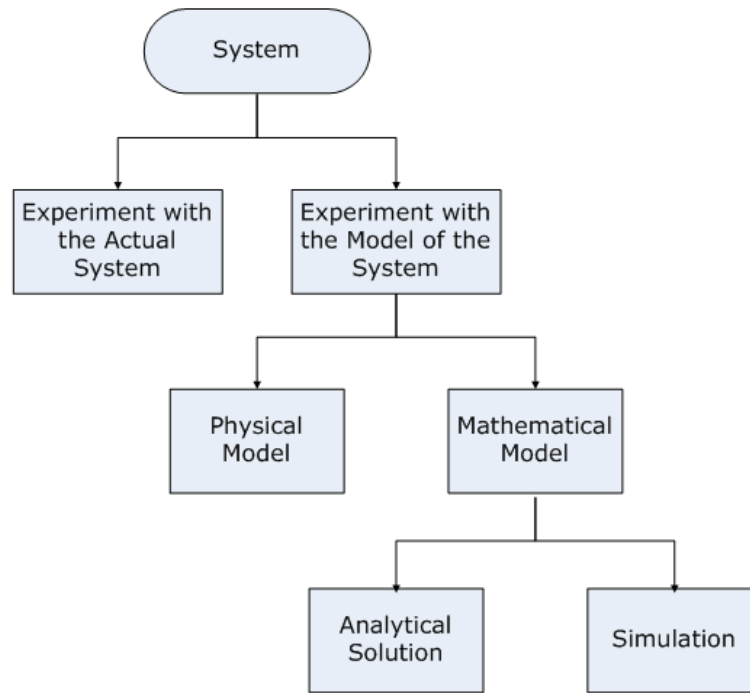
Τα *πραγματικά συστήματα*, όμως, είναι πολύ πιο σύνθετα ώστε να επιτρέψουν ρεαλιστικά μοντέλα να αξιολογηθούν αναλυτικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η *προσομοίωση* (Law and Kelton 1991).

Ένα *σύστημα* ορίζεται ως μια συλλογή οντοτήτων οι οποίες δρουν και αλληλεπιδρούν μαζί ως προς την επίτευξη ενός λογικού στόχου (Schmidt and Taylor 1970). *Κατάσταση του συστήματος* ορίζεται ως η *συλλογή μεταβλητών* που απαιτούνται για την περιγραφή του σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα διακριτά και τα συνεχή.

*Διακριτό σύστημα* είναι αυτό στο οποίο οι μεταβλητές κατάστασης αλλάζουν τιμή μόνο σε συγκεκριμένες, διακριτές χρονικές στιγμές. Αντίθετα, ένα *συνεχές σύστημα* είναι αυτό κατά το οποίο παρουσιάζεται *συνεχής μεταβολή* της κατάστασής του στο χρόνο (Law and Kelton 1991).

Είναι σύνηθες, στην πράξη, πολλά συστήματα να συνδυάζουν στοιχεία και από τις δυο κατηγορίες, αλλά επειδή ένας τύπος αλλαγών υπερτερεί, για τα περισσότερα είναι δυνατή η ταξινόμησή τους ως είτε διακριτά είτε συνεχή.

Η μελέτη ενός συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, μπορεί να επιτευχθεί είτε με πειραματισμό στο πραγματικό σύστημα είτε με πειραματισμό σε μοντέλο του συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση το μοντέλο μπορεί να είναι φυσικό ή μαθηματικό. Ένα μαθηματικό μοντέλο με τη σειρά του μπορεί να μελετάται μέσω αναλυτικών επιλύσεων ή μέσω διαδικασίας προσομοίωσης.



Σχήμα 3.1 Τρόποι μελέτης ενός συστήματος (Law and Kelton 1991)

Ένα μαθηματικό μοντέλο που μελετάται με προσομοίωση (μοντέλο προσομοίωσης) κατατάσσεται σύμφωνα με τρία κριτήρια ως εξής:

Στατικό ή Δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης:

Στατικό μοντέλο ονομάζεται μια αναπαράσταση ενός συστήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αντίθετα, ένα δυναμικό μοντέλο αποτελεί αναπαράσταση συστήματος κατά την εξέλιξη στο χρόνο.

Ντετερμινιστικό ή Στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης:

Ντετερμινιστικό μοντέλο αποκαλείται αυτό που δεν βασίζεται σε τυχαία μεγέθη. Τα στοχαστικά μοντέλα αφορούν σε τυχαία δεδομένα εισόδου, που περιγράφονται στο χρόνο ή/και το χώρο με χρήση της Θεωρίας Πιθανοτήτων.

Συνεχές ή Διακριτό μοντέλο προσομοίωσης:

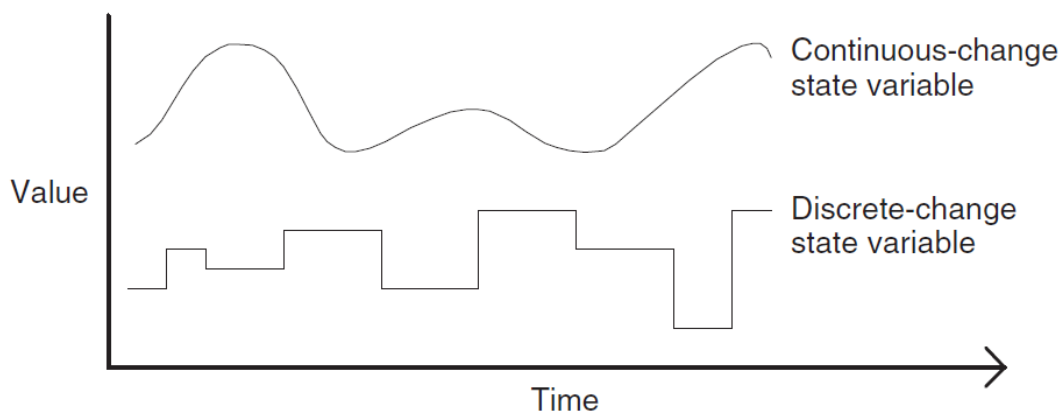
Το διακριτό μοντέλο προσομοίωσης αφορά στη μοντελοποίηση συστημάτων που εξελίσσονται στο χρόνο μέσω αναπαράστασης κατά την οποία οι μεταβλητές κατάστασης αλλάζουν τιμή σε διακριτές χρονικές στιγμές. Σε μαθηματικούς όρους, το σύστημα δύναται να μεταβληθεί σε συγκεκριμένο, μετρήσιμο αριθμό σημείων στο χρόνο. Σε αυτά

τα χρονικά σημεία συμβαίνει ένα γεγονός, το οποίο ορίζεται ως συμβάν που μπορεί να μεταβάλλει την κατάσταση του συστήματος.

Ένα συνεχές μοντέλο αφορά στη μοντελοποίηση στο χρόνο ενός συστήματος, μέσω αναπαράστασης κατά την οποία οι μεταβλητές κατάστασης μεταβάλλονται χρονικά συνεχώς. Συνήθως χρησιμοποιούνται διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση των ρυθμών αλλαγής των μεταβλητών κατάστασης με το χρόνο.

Ένα διακριτό/συνεχές μοντέλο δεν χρησιμοποιείται πάντα για την αναπαράσταση ενός διακριτού/συνεχούς συστήματος. Η απόφαση για την κατηγορία που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τα ειδικά αντικείμενα κάθε μελέτης. Στο Σχήμα 3.2 εμφανίζεται η διαφοροποίηση των μεταβλητών των συνεχών και διακριτών συστημάτων συναρτήσει του χρόνου.

Ένα διακριτό, δυναμικό και στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης χαρακτηρίζεται ως μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων.



Σχήμα 3.2 Μεταβλητές συνεχούς και διακριτού συστήματος συναρτήσει του χρόνου (Harrell et al. 2004)

### 3.4 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση ως μέσο μελέτης συστημάτων παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα (Law and Kelton 1991):

- Η αδυναμία μελέτης σύνθετων πραγματικών συστημάτων με στοχαστικά στοιχεία μέσω αναλυτικής επίλυσης μαθηματικών μοντέλων καθιστά την προσομοίωση ως τον μοναδικό τρόπο διερεύνησης.
- Η προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης ενός υπάρχοντος συστήματος υπό εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας



- Σύγκριση εναλλακτικών σχεδιασμών ώστε να αξιολογηθεί αυτός που συμβαδίζει με τις απαραίτητες προδιαγραφές.
- Αποφυγή πειραματισμών με το πραγματικό σύστημα
- Μελέτη σε μακροπρόθεσμα πλάνο

Η προσομοίωση χαρακτηρίζεται από τα εξής μειονεκτήματα (Law and Kelton 1991):

- Κάθε εκτέλεση στοχαστικής προσομοίωσης παράγει μόνο εκτιμήσεις των υπό μελέτη πραγματικών χαρακτηριστικών, για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Έτσι απαιτούνται πολλές ανεξάρτητες αναλύσεις για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου.
- Παρουσιάζει μεγάλο κόστος και η ανάπτυξή της κρίνεται χρονοβόρα.
- Ο μεγάλος όγκος αριθμών που παράγεται σε μια μελέτη και η πειστική επίδραση μιας οπτικοποίησης αυτών συχνά δημιουργεί μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα από αυτή που δικαιολογείται. Εάν ένα μοντέλο δεν είναι έγκυρη αναπαράσταση του υπό εξέταση συστήματος, τότε τα αποτελέσματα θα παρέχουν μικρής χρησιμότητας πληροφορίες.

Επίσης, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη με την ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Ισχύει ο κανόνας GIGO (Garbage In Garbage Out). Συνεπώς ένα ακριβές μοντέλο προσομοίωσης δεν αποδίδει ορθά αποτελέσματα εάν δεν χρησιμοποιούνται ποιοτικά δεδομένα που αφορούν στις μεταβλητές εισόδου.

### 3.5 Συνήθειες αστοχίες στην προσομοίωση

Οι συνήθειες αστοχίες, που παρατηρούνται κατά τις διαδικασίες προσομοίωσης, παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά (Law and Kelton 1991):

- Αποτυχία σαφούς προσδιορισμού του αντικειμένου της μελέτης κατά την αρχική φάση
- Ακατάλληλο επίπεδο λεπτομέρειας στη μοντελοποίηση
- Αδυναμία επικοινωνίας των ομάδων εργασίας
- Αντιμετώπιση της μελέτης ως σύνθετη προγραμματιστική άσκηση
- Έλλειψη γνώσεων επιχειρησιακής έρευνας και στατιστικής
- Λανθασμένη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης
- Αδυναμία αναγνώρισης όλων των πηγών τυχαιότητας

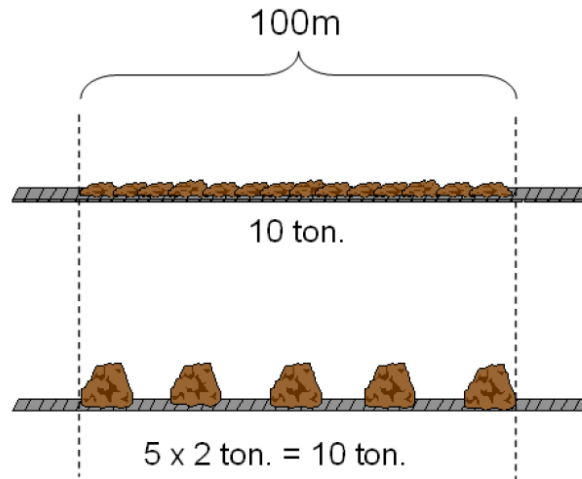
- Χρήση αυθαίρετων κατανομών
- Εκτέλεση μιας μόνης επανάληψης
- Σύγκριση μοντέλων με μια εκτέλεση για το καθένα
- Λανθασμένα μέτρα επίδοσης / απόδοσης.

### 3.6 Προσομοίωση διακριτών γεγονότων συνεχών συστημάτων

Όπως προαναφέρθηκε, σε ένα συνεχές μοντέλο, η κατάσταση του μεταβάλλεται συνεχώς σε σχέση με το χρόνο. Σε ένα διακριτό μοντέλο οι αλλαγές συμβαίνουν μόνο σε συγκεκριμένα, διακριτά σημεία στο χρόνο (Law and Kelton 1991).

Η μοντελοποίηση συστημάτων συνδυάζοντας συνεχή και διακριτή συμπεριφορά αποτελεί μια πρόκληση για τους αναλυτές. Ορισμένες φορές η επίδραση του συνεχούς τμήματος του συστήματος είναι μικρή στη λήψη αποφάσεων και η απαίτηση της χρήσης ειδικών εργαλείων και τεχνικών στο μοντέλο προκαλεί καθυστερήσεις στη υλοποίηση του έργου. Η έλλειψη γνώσης των εργαλείων προσομοίωσης είναι ένας από τους βασικότερους λόγους πρόκλησης λαθών. Υπάρχει, επομένως, η τεχνική μοντελοποίησης συνεχών συστημάτων με τη χρήση διακριτών στοιχείων (Fiorini and Furia 2007).

Σε ένα δίκτυο ταινιόδρομων (μεταφορικών ταινιών) που μεταφέρουν εξορυγμένο υλικό υπάρχουν πολλές πιθανές εναλλακτικές διαδρομές που μπορούν να ακολουθηθούν. Η διαδικασία επιλογής της βέλτιστης διαδρομής και η χρονική διάσταση των παραμέτρων μεταφοράς αποτελούν συνήθως πολυπλοκότερη λειτουργία από την ίδια τη συνεχή λειτουργία. Έτσι είναι δυνατή η μοντελοποίηση με την εφαρμογή διακριτών στοιχείων με μεγάλη ακρίβεια αναπαράστασης της συνεχούς συμπεριφοράς. Η τεχνική για την επίτευξη του παραπάνω στόχου είναι να μοντελοποιηθεί η ροή υλικού σε ποσότητες που αντιμετωπίζονται ως διακριτές οντότητες. Υπάρχει διαφορά μεταξύ μιας συνεχούς ροής υλικού και διακριτών ποσοτήτων μεταφερόμενου υλικού, αλλά αν και στις δύο περιπτώσεις όλο το υλικό φεύγει από την αφετηρία με τον ίδιο ρυθμό και φτάνει στον προορισμό στον ίδιο χρόνο, τότε το αποτέλεσμα είναι ακριβώς το ίδιο (Fiorini and Furia 2007). Στο Σχήμα 3.3 εμφανίζεται συνεχής και διακριτή συμπεριφορά κατά την μεταφορά υλικού με ταινιόδρομους.



Σχήμα 3.3 Συνεχής και διακριτή συμπεριφορά μεταφοράς υλικού (Fiorini and Furia 2007).

### 3.7 Βασικές έννοιες στην προσομοίωση

Κατά τις διαδικασίες προσομοίωσης συναντώνται οι παρακάτω έννοιες για τις οποίες ακολουθούν οι ορισμοί τους σύμφωνα με τους Banks, Carson και Nelson (1996) και Banks (1999):

- Σύστημα (System):  
Ένα σύστημα ορίζεται ως ένα σύνολο αντικειμένων που συνδέονται μεταξύ τους με κάποια αλληλεπίδραση, με στόχο την επίτευξη ενός σκοπού.
- Μοντέλο (Model):  
Ένα μοντέλο αποτελεί αναπαράσταση ενός συστήματος. Σχετικά με τα όρια του μοντέλου, πρέπει να είναι αρκετά σύνθετο ώστε να μπορεί να δίνει απαντήσεις για τα ζητήματα υπό εξέταση, αλλά όχι υπερβολικά πολύπλοκο.
- Γεγονότα (events):  
Ως γεγονός ορίζεται ένα συμβάν που μπορεί να αλλάξει την κατάσταση του συστήματος. Υπάρχουν δυο κατηγορίες γεγονότων που αλλάζουν την κατάσταση του συστήματος. Πρόκειται για τα ενδογενή και εξωγενή γεγονότα, τα οποία διακρίνονται μεταξύ τους σε σχέση με το αν πραγματοποιούνται μέσα ή έξω από τα όρια του μοντέλου.
- Μεταβλητές κατάστασης (State Variables):  
Μεταβλητές κατάστασης του συστήματος είναι η συλλογή πληροφοριών που περιγράφει το σύστημα σε κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή

- **Οντότητες (Entities):**  
Οι οντότητες αναπαριστούν αντικείμενα τα οποία απαιτούν σαφή προσδιορισμό. Διακρίνονται σε δυναμικές οντότητες που κινούνται εντός του συστήματος ή σε στατικές, οι οποίες εξυπηρετούν άλλες οντότητες.
- **Ιδιότητες οντοτήτων (Attributes):**  
Είναι οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν κάθε συγκεκριμένη οντότητα.
- **Πόροι (Resources):**  
Ένας πόρος είναι μια οντότητα ειδικού τύπου, η οποία εξυπηρετεί τις δυναμικές οντότητες. Η εξυπηρέτηση μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα για πολλές οντότητες. Μια δυναμική οντότητα μπορεί να απαιτεί μια ή περισσότερες μονάδες ενός πόρου. Εάν ο πόρος είναι ήδη κατειλημμένος, οι οντότητες εισέρχονται σε ουρά αναμονής (queue). Όταν επιτραπεί η δέσμευση του πόρου, η οντότητα παραμένει σε αυτόν για ορισμένο χρονικό διάστημα, μέχρι την ολοκλήρωση της εξυπηρέτησης και την αποδέσμευση του.
- **Πίνακας μελλοντικών γεγονότων (Future Event List):**  
Είναι η ακολουθία των προγραμματισμένων, μελλοντικών γεγονότων, ταξινομημένων σε χρονική σειρά εμφάνισης.
- **Ρολόι της προσομοίωσης (Simulation Clock):**  
Είναι ο μηχανισμός που υλοποιεί την εξέλιξη του χρόνου και προκαλεί την εμφάνιση των προγραμματισμένων, μελλοντικών γεγονότων.

### 3.8 Στάδια μελέτης προσομοίωσης

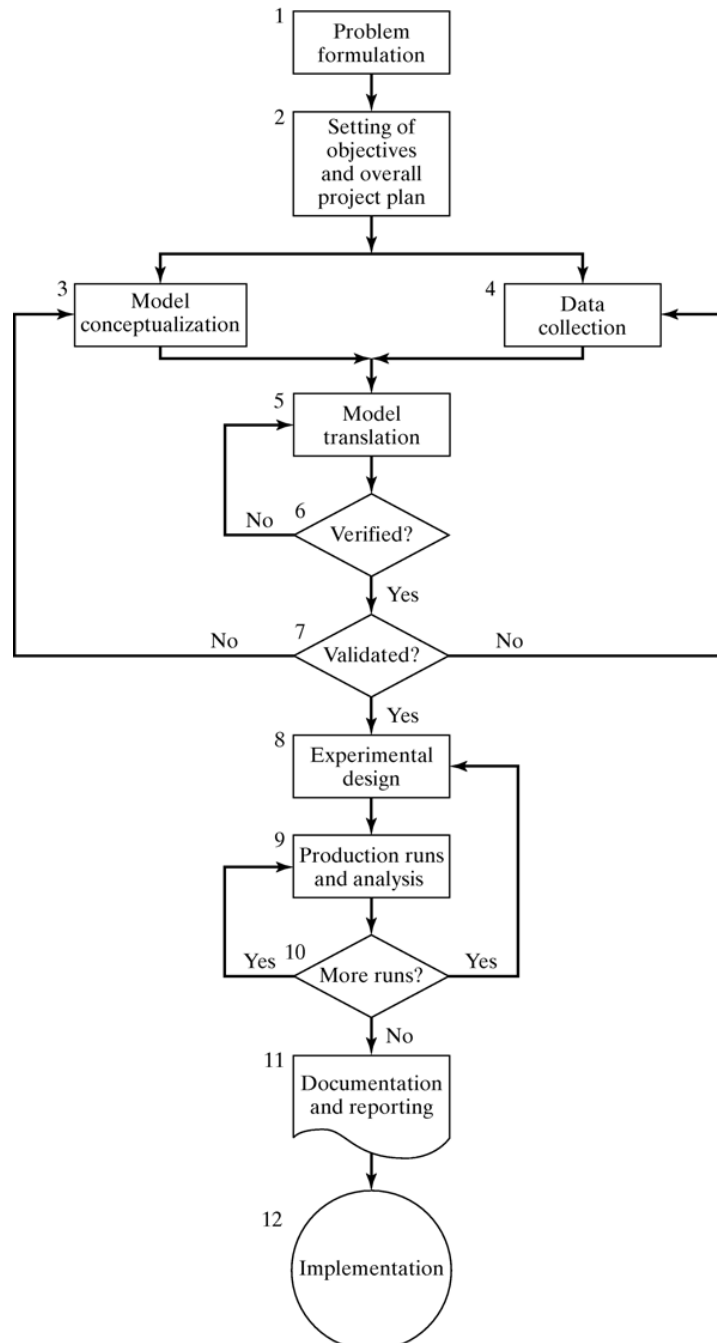
Η διαδικασία προσομοίωσης ενός συστήματος με στόχο την κατανόηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του περιλαμβάνει τα εξής κύρια στάδια, σύμφωνα με τους Banks, Carson και Nelson (1996):

1. Διατύπωση προβλήματος (Problem formulation). Κάθε μελέτη με τη χρήση μεθόδων προσομοίωσης έχει αφετηρία τον προσδιορισμό του προβλήματος που εντοπίζεται σε ένα σύστημα.
2. Οργάνωση προγράμματος και στόχων (Setting of objectives). Επόμενο βήμα αποτελεί ο καθορισμός των επιμέρους ερωτημάτων, των οποίων η απάντηση είναι ο στόχος της μελέτης. Ο προγραμματισμός του έργου (Project Plan) πρέπει να περιλαμβάνει την οριοθέτηση των διάφορων σεναρίων που θα ακολουθηθούν και θα διερευνηθούν. Έτσι πρέπει να προσδιορίζονται οι αναγκαίοι πόροι που θα

- απαιτηθούν για την υλοποίηση της μελέτης, το χρονοδιάγραμμα και τα οποιαδήποτε κόστη εάν υφίστανται.
3. Κατάστρωση δομής μοντέλου (Model Conceptualization). Το υπό εξέταση πραγματικό σύστημα περιγράφεται από ένα συνοπτικό μοντέλο, δηλαδή ένα σύνολο μαθηματικών και λογικών σχέσεων που αφορούν στα μέρη και στη δομή του συστήματος. Προτείνεται η μοντελοποίηση να αρχίζει με μια απλή προσέγγιση και να αναπτύσσεται μέχρι να φτάσει στον καταλληλότερο βαθμό πολυπλοκότητας.
  4. Συλλογή δεδομένων (Data collection). Ακολουθεί με την αποδοχή του προγράμματος που έχει καταστρωθεί. Πρόκειται για τη συγκέντρωση όλων των πληροφοριών που απαιτεί η προσομοίωση. Το στάδιο αυτό εκτελείται παράλληλα με την κατάστρωση του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.
  5. Ανάπτυξη κώδικα μοντέλου (Model translation). Το στάδιο αυτό αφορά στη μεταφορά του μοντέλου είτε σε ένα κατάλληλο λογισμικό, είτε σε μια γλώσσα προγραμματισμού ή προσομοίωσης.
  6. Επαλήθευση και επικύρωση (Verification and Validation). Η επαλήθευση του μοντέλου (Verification) είναι η διαδικασία με την οποία εξασφαλίζεται ότι ο κώδικας και η υλοποίηση του μοντέλου είναι ορθά (Sargent 1999). Ως επικύρωση του μοντέλου (Validation) ορίζεται η απόδειξη ότι το ψηφιακό μοντέλο παρέχει εντός του πεδίου εφαρμογής του έναν ικανοποιητικό βαθμό ακρίβειας που συνάδει με την προοριζόμενη εφαρμογή του μοντέλου (Schesinger et al. 1979)
  7. Σχεδιασμός της προσομοίωσης (Experimental design). Για κάθε εναλλακτικό σενάριο που πρόκειται να προσομοιωθεί, αποφασίζεται η διάρκεια της προσομοίωσης, ο αριθμός των επαναλήψεων (πολλαπλές εκτελέσεις του ίδιου μοντέλου) και ο τρόπος αρχικοποίησης (initialization), όπως απαιτούνται.
  8. Παραγωγικές εκτελέσεις και ανάλυση αποτελεσμάτων (Production runs and analysis). Πρόκειται για τις παραγωγικές εκτελέσεις της προσομοίωσης που μαζί με την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μέτρων επίδοσης των διαφορετικών σεναρίων που εξετάζονται.
  9. Έλεγχος πληρότητας μελέτης. Σε αυτό το στάδιο κρίνεται η επάρκεια των προσομοιώσεων που έχουν ολοκληρωθεί.
  10. Σύνταξη εκθέσεων (Documentation and reporting). Αφορά στην καταγραφή της μεθοδολογίας της προσέγγισης που ακολουθήθηκε καθιστώντας έτσι δυνατή τη μεταγενέστερη μελέτη των μοντέλων.

11. Υλοποίηση (Implementation). Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθεί η λήψη αποφάσεων και η υλοποίησή τους.

Το Σχήμα 3.4 απεικονίζει τα παραπάνω στάδια μια μελέτης προσομοίωσης.



Σχήμα 3.4 Βήματα μια μελέτης προσομοίωσης (Banks et al. 1996)

### 3.9 Εργαλεία προσομοίωσης

Παρουσιάζεται μια πληθώρα εργαλείων που διατίθενται για σκοπούς προσομοίωσης. Διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τις γενικού σκοπού γλώσσες προγραμματισμού, τις γλώσσες προσομοίωσης και τα γενικού σκοπού λογισμικά προσομοίωσης.

Η πρώτη κατηγορία, των γενικού σκοπού γλωσσών προγραμματισμού όπως οι FORTRAN, C/C++ και Java, προσφέρει υψηλού βαθμού ευελιξία και πληθώρα υλοποιήσεων με χαμηλό κόστος, αλλά απαιτεί πολύ ισχυρές προγραμματιστικές δεξιότητες και κατά κανόνα μεγαλύτερο χρόνο ανάπτυξης.

Οι γενικής χρήσης γλώσσες προσομοίωσης, όπως οι Siman, GPSS και Slam, είναι αντικειμενοστραφείς γλώσσες προσομοίωσης διακριτών γεγονότων με υψηλή ευελιξία, ωστόσο απαιτούν καλή γνώση προγραμματισμού.

Τέλος, τα λογισμικά προσομοίωσης, μεταξύ των οποίων τα Arena, Automod, Promodel, Simul8, Witness και Simio, απαιτούν λιγότερες προγραμματιστικές δεξιότητες, αλλά προσφέρουν μικρότερη ευελιξία από τις δυο προηγούμενες κατηγορίες εργαλείων και συνήθως έχουν σημαντικό κόστος προμήθειας.

### 3.10 Το λογισμικό προσομοίωσης Arena

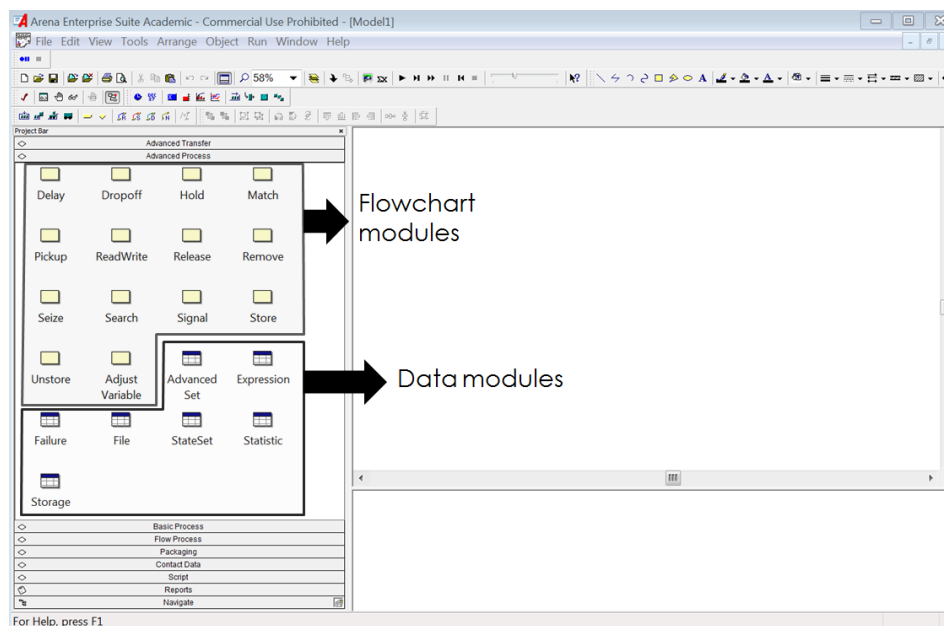
Το Arena Simulation της Rockwell Automation, αποτελεί λογισμικό γενικού σκοπού προσομοίωσης και βασίζεται στη γλώσσα προσομοίωσης Siman. Συνδυάζει την ευκολία χρήσης των υψηλού βαθμού προσομοιωτών και την ευελιξία των γλωσσών προσομοίωσης. Ακόμα προσφέρει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης γενικού σκοπού γλωσσών προγραμματισμού όπως είναι η Microsoft Visual Basic. Η λειτουργικότητα του προγράμματος επιτυγχάνεται με την παροχή εναλλακτικών πρότυπων δομικών μονάδων προσομοίωσης και ανάλυσης, τα modules. Με το συνδυασμό τους καλύπτεται ένα μεγάλο εύρος ειδών μοντέλων προσομοίωσης. Οι προαναφερθείσες δομές ομαδοποιούνται σε πλαίσια αναλόγως με τη χρήση τους. Για την καλύτερη αναπαράσταση ιδιαίτερων συστημάτων παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας και επεξεργασίας νέων modules χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Siman. Η ενσωμάτωση της Visual Basic προσφέρεται κυρίως για την επικοινωνία με εξωτερικές εφαρμογές. Επίσης, στο Arena υπάρχουν οι δυνατότητες, δισδιάστατης και τρισδιάστατης δυναμικής απεικόνισης (animation),

ανάλυσης δεδομένων εισόδου (input analyzer), αλλά και ανάλυσης αποτελεσμάτων (output analyzer).

Όπως προαναφέρθηκε, οι βασικές δομικές μονάδες των μοντέλων στο λογισμικό Arena ονομάζονται modules. Υπάρχουν δύο τύποι modules: τα flowchart modules (μονάδες διαγράμματος ροής) και τα data modules (δομές δεδομένων).

Οι μονάδες διαγράμματος ροής περιγράφουν τις δυναμικές διεργασίες. Αποτελούν τα σημεία μέσα από τα οποία οι οντότητες της προσομοίωσης δημιουργούνται, εισέρχονται στο σύστημα, διέρχονται προκαλώντας γεγονότα και εξέρχονται του συστήματος.

Οι δομές δεδομένων προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά των στοιχείων διεργασιών, όπως είναι οι ίδιες οι οντότητες, οι πόροι, οι ουρές αναμονής, οι μεταβλητές κατάστασης και οι μαθηματικές και λογικές εκφράσεις.



Εικόνα 3.1 Περιβάλλον εργασίας Arena με τα πλαίσια των δομικών μονάδων (modules)

Τα modules που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία ανήκουν στα πλαίσια basic process, advanced process και advanced transfer (βασικές διεργασίες, σύνθετες διεργασίες και σύνθετη μεταφορά). Στην Εικόνα 3.1 διακρίνεται το περιβάλλον εργασίας του Arena με τα πλαίσια των δομικών μονάδων. Ακολουθεί παρουσίαση και περιγραφή της χρήσης των βασικών δομικών μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν.



Δομικές μονάδες διαγράμματος ροής:

- Create: Δημιουργία οντοτήτων
- Dispose: Έξοδος οντοτήτων από το μοντέλο
- Assign: Ανάθεση ιδιοτήτων (attributes) στις οντότητες – Απόδοση τιμών μεταβλητών
- Decide : Διακλάδωση πορείας οντοτήτων βασιζόμενη σε κριτήρια
- Separate: Αντιγραφή οντοτήτων
- Record: Καταγραφή δεδομένων
- Seize: Δέσμευση πόρου
- Delay: Καθυστέρηση οντότητας
- Release: Αποδέσμευση πόρου
- Hold: Αναμονή οντότητας μέχρι την εκπλήρωση συνθήκης ή λήψη σήματος
- Signal: Εκπομπή σήματος
- Store: Είσοδος οντότητας σε αποθηκευτικό χώρο (storage)
- Unstore: Έξοδος οντότητας από αποθηκευτικό χώρο
- Station: Σταθμός οντοτήτων
- Route: Δρομολόγηση οντοτήτων προς σταθμό
- Access: Τοποθέτηση οντοτήτων σε ταινιόδρομο (conveyor)
- Convey: Μεταφορά οντοτήτων επί του ταινιόδρομου
- Exit: Έξοδος οντοτήτων από τον ταινιόδρομο
- Start: Έναρξη κίνησης ταινιοδρόμου
- Stop: Παύση κίνησης ταινιοδρόμου
- Allocate: Δέσμευση μεταφορέα (transporter) από οντότητα
- Move: Μετακίνηση οντότητας από μεταφορέα μεταξύ σταθμών ή εντός δικτύου
- Free: Αποδέσμευση μεταφορέα

Δομικές μονάδες δεδομένων:

- Entity: Προσδιορισμός τύπου οντοτήτων
- Attribute: Ιδιότητες οντοτήτων
- Queue: Ουρές αναμονής

- Resource: Προσδιορισμός πόρων
- Variable: Μεταβλητές μοντέλου
- Expression: Μαθηματικές και λογικές εκφράσεις
- Failure: Προσδιορισμός διάρκειας και συχνότητας βλαβών πόρων
- State Set: Προσδιορισμός συνόλων καταστάσεων πόρων
- Statistic: Συλλογή στατιστικών
- Storage: Αποθηκευτικός χώρος οντοτήτων
- Conveyor: Ταινιόδρομος
- Segment: Τμήματα ταινιόδρομου
- Transporter: Μεταφορέας
- Distance: Κλάδοι δικτύου μεταφοράς
- Network: Δίκτυο μεταφοράς

## 4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Η ολοκλήρωση μιας επιτυχούς διαδικασίας προσομοίωσης δεν εξαρτάται μόνο από τη μοντελοποίηση του συστήματος, τη μεταφορά του σε κατάλληλο λογισμικό και την εκτέλεση επαναλήψεων και αναλύσεων. Η χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων και της στατιστικής αποτελούν εξίσου σημαντικό μέρος της μελέτης. Συγκεκριμένα, απαιτείται για την επικύρωση του μοντέλου, την επιλογή κατανομών για τις τυχαίες μεταβλητές εισόδου, την παραγωγή τυχαίων δειγμάτων από τις κατανομές, την πραγματοποίηση στατιστικών αναλύσεων και το γενικότερο σχεδιασμό των πειραμάτων προσομοίωσης.

### 4.1 Στοιχεία πιθανοτήτων και στατιστικής

#### 4.1.1 Τυχαίες μεταβλητές

Μια διαδικασία της οποίας η έκβαση δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων ονομάζεται πείραμα. Το σύνολο όλων των δυνατών αποτελεσμάτων ενός πειράματος αποκαλείται δειγματοχώρος και συμβολίζεται με  $S$ . Τα πιθανά αποτελέσματα ενός πειράματος στον δειγματοχώρο ονομάζονται δειγματοσημεία.

Μια τυχαία μεταβλητή είναι μια συνάρτηση με την οποία αντιστοιχίζεται ένας πραγματικός αριθμός σε κάθε σημείο του δειγματοχώρου  $S$ .

Η συνάρτηση κατανομής (ή αθροιστική συνάρτηση κατανομής)  $F(x)$ , της τυχαίας μεταβλητής  $X$  ορίζεται για κάθε πραγματικό αριθμό  $x$  ως εξής:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad \text{για } -\infty < x < +\infty$$

Όπου  $P(X \leq x)$  είναι η πιθανότητα εμφάνισης του γεγονότος  $\{X \leq x\}$ . Επομένως,  $F(x)$ , είναι η πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή να έχει λάβει τιμή όχι μεγαλύτερη του αριθμού  $x$ .

Μια συνάρτηση κατανομής έχει τις εξής ιδιότητες:

1.  $0 \leq F(x) \leq 1$  για κάθε  $x$
2.  $F(x)$  είναι γνησίως αύξουσα [ $\text{αν } x_1 \leq x_2$ , τότε  $F(x_1) \leq F(x_2)$ ]
3.  $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$  και  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$

Μια τυχαία μεταβλητή ορίζεται ως διακριτή εάν το σύνολο των δυνατών τιμών της (πεδίο τιμών  $R_x$ ) είναι πεπερασμένο ή απείρως αριθμήσιμο.

Η πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή  $X$  να πάρει την τιμή  $x_i$  δίνεται από τη σχέση:

$$p(x_i) = P(X = x_i) \quad \text{για } i = 1, 2, \dots$$

Πρέπει:

$$\sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) = 1$$

Η συνάρτηση κατανομής  $F(x)$  για τη διακριτή τυχαία μεταβλητή  $X$  δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = \sum_{x_i} p(x_i) \quad \text{για κάθε } -\infty < x < +\infty$$

Μια τυχαία μεταβλητή, για την οποία υπάρχει μια μη αρνητική συνάρτηση  $f(x)$ , ορίζεται ως συνεχής όταν μπορεί να λάβει έναν άπειρο, μη μετρήσιμο, αριθμό δυνατών τιμών. Για τη συνάρτηση αυτή ισχύει:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

Εάν η τυχαία μεταβλητή  $X$  είναι μη αρνητική, όπως συνηθίζεται στις εφαρμογές προσομοίωσης, το ολοκλήρωμα παίρνει την μορφή:

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1$$

Η  $f(x)$  ονομάζεται συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $X$ .

Σε αντίθεση με την περίπτωση της διακριτής τυχαίας μεταβλητής, η  $f(x)$  δεν είναι η πιθανότητα μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $X$  να ισούται με μια τιμή  $x$ . Για κάθε πραγματικό αριθμό  $x$  ισχύει:

$$P(X = x) = P(\in [x, x]) = \int_x^x f(y) dy = 0$$

Συνεπώς εάν  $x$  αριθμός και  $\Delta x > 0$ , τότε:

$$P(\in [x, x + \Delta x]) = \int_x^{x+\Delta x} f(y) dy$$

το οποίο ισούται με το εμβαδό που περικλείεται από την  $f(x)$  για το διάστημα  $x, x + \Delta x$ .

Η συνάρτηση κατανομής  $F(x)$  για μια συνεχή τυχαία μεταβλητή δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = P(X \in [-\infty, x]) = \int_{-\infty}^x f(y)dy \quad \text{για κάθε } -\infty < x < +\infty$$

Ακόμη, εάν  $I = [a, b]$ , διάστημα για κάθε πραγματικό αριθμό  $a$  και  $b$ , με  $a < b$

$$P(X \in I) = \int_a^b f(y)dy = F(b) - F(a)$$

Η μέση τιμή (mean) ή αναμενόμενη τιμή (expected value) μιας τυχαίας μεταβλητής  $X_i$  (όπου  $i=1, 2, \dots, n$ ) συμβολίζεται με  $\mu$  ή  $E(X_i)$  και ορίζεται ως:

$$\mu_i = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} x_i p(x_i) & \text{εάν } X_i \text{ διακριτή τ.μ} \\ \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) & \text{εάν } X_i \text{ συνεχής τ.μ} \end{cases}$$

Ισχύουν, για  $c$  σταθερό αριθμό, οι εξής ιδιότητες για τη μέση τιμή:

1.  $E(cX_i) = cE(X_i)$
2.  $E(\sum_{i=1}^n c_i X_i) = \sum_{i=1}^n c_i E(X_i)$

Η διάμεσος (median  $x_{0.5}$ ) μιας τυχαίας μεταβλητής είναι ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της κεντρικής τάσης και ορίζεται ως η μικρότερη τιμή  $x$  για την οποία ισχύει:

$$F_X(x) \geq 0.5$$

Εάν η  $X_i$  είναι μια συνεχής τυχαία μεταβλητή, τότε ισχύει ότι  $F(x_{0.5}) = 0.5$ . Η διάμεσος μπορεί να λειτουργήσει καλύτερα ως μέτρο κεντρικής τάσης από τη μέση τιμή όταν η  $X_i$  λαμβάνει πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ακραίες τιμές επιδρούν ιδιαίτερα στη μέση τιμή ακόμα και αν έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης.

Η διακύμανση τυχαίας μεταβλητής  $X_i$ , συμβολίζεται με  $\sigma_i^2$  ή  $Var(X_i)$  και ορίζεται ως:

$$\sigma_i^2 = E(X_i - \mu)^2 = E(X_i^2) - \mu^2$$

Αποτελεί μέτρο διασποράς της τυχαίας μεταβλητής γύρω από τη μέση τιμή της και έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

1.  $Var(X) \geq 0$

$$2. \text{Var}(cX) = c^2 \text{Var}(X)$$

$$3. \text{Var}(\sum_{i=1}^n X_i) = \sum_{i=1}^n \text{Var}(X_i) \quad \text{εάν οι } X_i \text{ είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους}$$

Η τυπική απόκλιση τυχαίας μεταβλητής  $X_i$  ορίζεται ως  $\sigma_i = \sqrt{\sigma_i^2}$

## 4.2 Προσαρμογή κατανομών πιθανοτήτων

Για την υλοποίηση μιας μελέτης προσομοίωσης με τη χρήση τυχαίων μεταβλητών ως δεδομένων εισόδου είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των κατανομών πιθανοτήτων που τις περιγράφουν. Μέσω αυτών των κατανομών, οι παραγόμενοι από το λογισμικό προσομοίωσης ψευδοτυχαίοι αριθμοί αντιστοιχίζονται στις κατάλληλες τιμές των μεταβλητών. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εύρεση και προσαρμογή των κατανομών πιθανοτήτων. Η επιλογή της κατάλληλης κατανομής είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Εάν η συγκέντρωση δεδομένων για μια μεταβλητή εισόδου από το υπό μελέτη σύστημα είναι εφικτή, ακολουθούνται οι εξής προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό των κατανομών που την περιγράφει καλύτερα:

- I. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση κατευθείαν, αυτούσια (Trace-driven simulation). Μειονέκτημα της τεχνικής αποτελεί το γεγονός ότι είναι δεδομένη και αμετάβλητη η ακολουθία των τιμών. Προτείνεται, όμως, για την επικύρωση του μοντέλου (Validation).
- II. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση εμπειρικών κατανομών. Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγεται το μειονέκτημα της προηγούμενης περίπτωσης, αλλά το πεδίο τιμών περιορίζεται ανάμεσα στην ελάχιστη και μέγιστη σημειωθείσα τιμή.
- III. Προσαρμογή θεωρητικών κατανομών στα δεδομένα και η εκτέλεση ελέγχων υποθέσεων για την εξακρίβωση της καταλληλότητας της προσαρμογής.

Εάν μια θεωρητική κατανομή κριθεί ότι προσαρμόζεται και περιγράφει επαρκώς τα δεδομένα, τότε γενικώς προτιμάται για τους παρακάτω λόγους:

1. Μια εμπειρική κατανομή εμπεριέχει ανωμαλίες, ειδικά στην περίπτωση μικρών συνόλων δεδομένων. Μια θεωρητική κατανομή εξομαλύνει τα δεδομένα.
2. Εάν η εμπειρική κατανομή χρησιμοποιηθεί ως συνήθως, δεν είναι δυνατή η αναπαραγωγή τιμών εκτός του εύρους των παρατηρούμενων τιμών. Αυτό είναι

ανεπιθύμητο, διότι αναζητείται κατά την προσομοίωση και η επίδραση γεγονότων με ακραίες τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται με τις θεωρητικές κατανομές.

3. Οι θεωρητικές κατανομές είναι πιο συμπαγής τρόπος αναπαράστασης συνόλων τιμών. Αντίθετα, εάν  $n$  ο αριθμός των διαθέσιμων τιμών μιας συνεχούς κατανομής, τότε απαιτείται να εισαχθεί και να αποθηκευτεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης αριθμός τιμών  $2n$  (δεδομένα και αθροιστική πιθανότητα).

Υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπάρχει κάποια θεωρητική κατανομή, η οποία να παρέχει επαρκή προσαρμογή στα δεδομένα. Στις περιπτώσεις αυτές προτείνεται η χρήση εμπειρικών κατανομών.

#### 4.2.1 Παραμετροποίηση συνεχών κατανομών

Για μια οικογένεια συνεχών κατανομών υπάρχουν συνήθως πολλαπλοί τρόποι προσδιορισμού ή παραμετροποίησης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Εάν αυτές οι παράμετροι καθοριστούν ορθά, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη φυσική ή γεωμετρική ερμηνεία τους. Τέτοιες παράμετροι αφορούν στη θέση (location parameter) στην κλίμακα (scale parameter) και στο σχήμα (shape parameter) της κατανομής.

Η παράμετρος θέσης,  $\gamma$ , καθορίζει τη θέση του εύρους τιμών μιας κατανομής στον άξονα  $x$ . Άλλοτε εκπροσωπεί τη μέση τιμή (π.χ. για την περίπτωση της κανονικής κατανομής) και άλλοτε την ελάχιστη τιμή του εύρους τιμών της κατανομής (σε αυτή την περίπτωση αποκαλείται και παράμετρος μετατόπισης - shift parameter). Η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου θέσης μεταθέτει την κατανομή συνολικά κατά τον άξονα  $x$ , χωρίς περαιτέρω επίδραση.

Η παράμετρος κλίμακας,  $\beta$ , καθορίζει το «μέγεθος» της κατανομής. Αλλαγή του  $\beta$  συστέλει ή διαστέλει την κατανομή χωρίς να επηρεάζεται η βασική της μορφή.

Η παράμετρος σχήματος,  $\alpha$ , καθορίζει, ξεχωριστά από τη θέση και την κλίμακα, τη βασική μορφή ή το σχήμα της κατανομής. Μεταβολές της παραμέτρου  $\alpha$ , γενικώς αλλάζουν τις ιδιότητες της κατανομής (π.χ. την κύρτωση) πιο έντονα από τις άλλες παραμέτρους. Κάποιες κατανομές δεν έχουν παράμετρο  $\alpha$  (π.χ. η κανονική και η εκθετική κατανομή) ενώ άλλες έχουν περισσότερες από μια (π.χ. η κατανομή  $\beta$ ).

### 4.3 Συνεχείς θεωρητικές κατανομές

Στην προσομοίωση διακριτών γεγονότων έχει αποδειχθεί η χρησιμότητα μιας πληθώρας θεωρητικών κατανομών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η χρήση συνεχών θεωρητικών κατανομών για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών εισόδου της προσομοίωσης και συγκεκριμένα οι κατανομές Erlang, Lognormal και Weibull. Τα θεωρητικά αυτά μοντέλα είναι συνεχείς, μη αρνητικές κατανομές. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών των τριών κατανομών.

#### 4.3.1 Κατανομή Erlang - $m$ – $Erlang(\beta)$ ή $Erlang(\gamma, \beta, m)$

Η κατανομή Erlang αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση της κατανομής  $\Gamma$ , για ακέραιες θετικές τιμές της παραμέτρου σχήματος  $m$ . Χρησιμοποιείται κυρίως για την περιγραφή της διάρκειας διεργασιών και παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{(x - \gamma)^{m-1}}{\beta^m (m - 1)!} \exp\left[-\frac{(x - \gamma)}{\beta}\right] & \text{για } x > \gamma \\ 0 & \text{για } x \leq \gamma \end{cases}$$

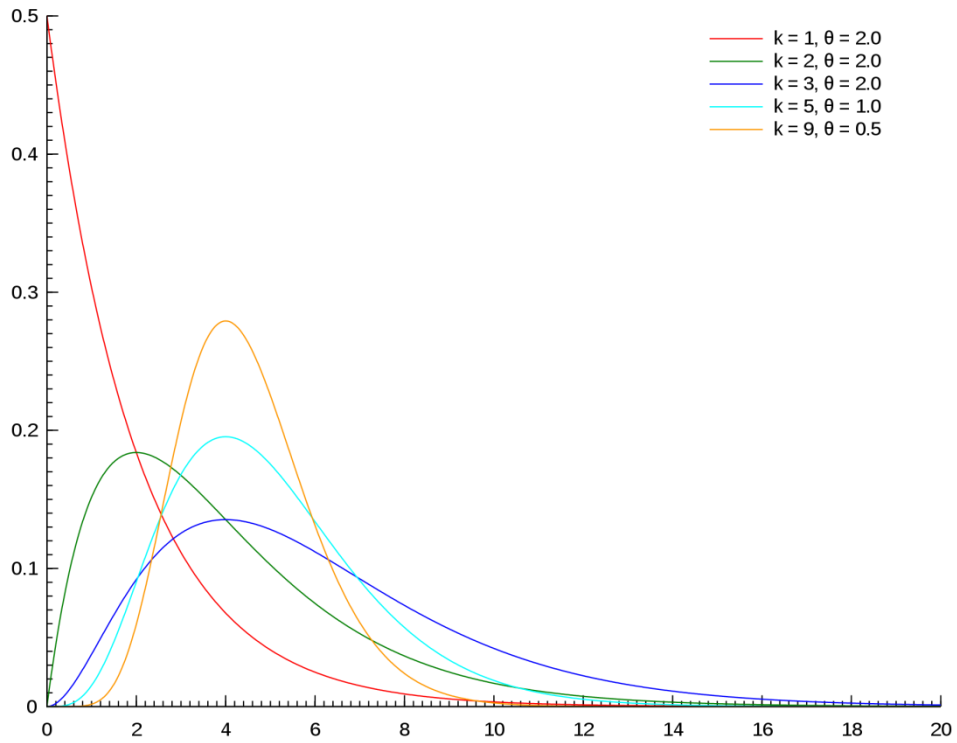
- Παράμετροι: Παράμετρος θέσης  $\gamma \in (-\infty, \infty)$ , παράμετρος κλίμακας  $\beta > 0$ , παράμετρος σχήματος  $m \in \{1, 2, \dots\}$
- Πεδίο τιμών:  $(\gamma, \infty)$
- Μέση τιμή:  $\gamma + \mu\beta$
- Διακύμανση:  $m\beta^2$
- Επικρατέστερη τιμή:  $\gamma + \beta(\mu - 1)$

Σχόλια:

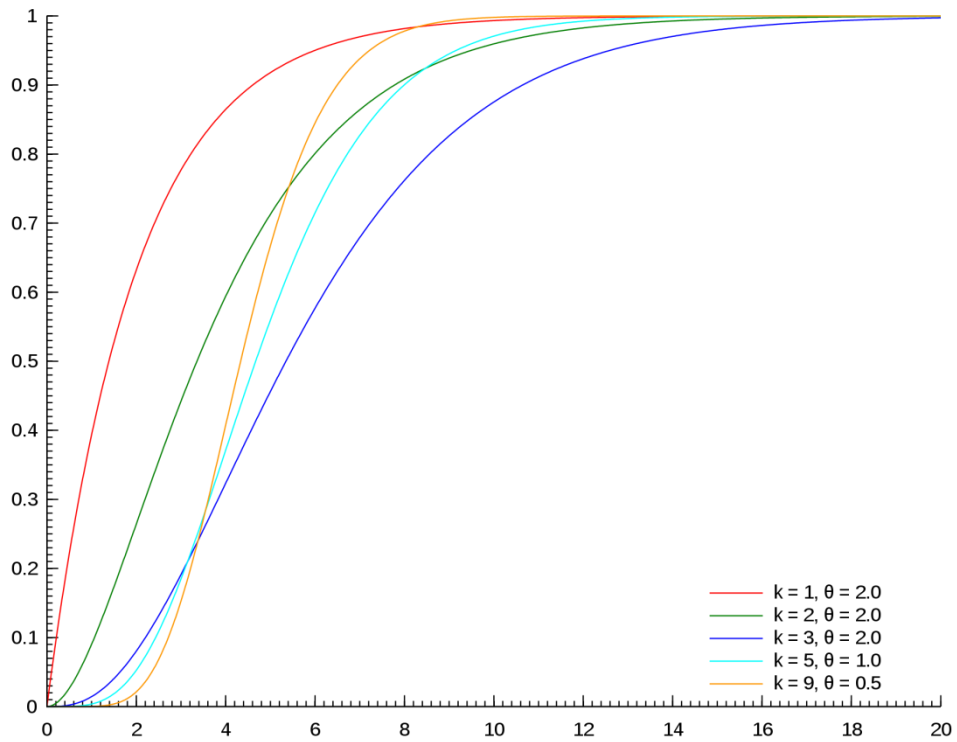
1. Για  $m = 1$  τότε ισχύει ότι η  $Erlang(\gamma, \beta, 1)$  ταυτίζεται με την εκθετική κατανομή,  $exp(\gamma, \beta)$ .
2. Για  $m = \infty$  τότε η Erlang είναι σταθερά.

Συνεπώς, η κατανομή Erlang κυμαίνεται από πολύ ευμετάβλητη (εκθετική) έως καθόλου μεταβαλλόμενη (σταθερά).





Σχήμα 4.1 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Erlang για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος,  $k$ , και παραμέτρου κλίμακας,  $\theta$



Σχήμα 4.2 Γραφική παράσταση αθροιστικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της κατανομής Erlang για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος,  $k$ , και παραμέτρου κλίμακας,  $\theta$

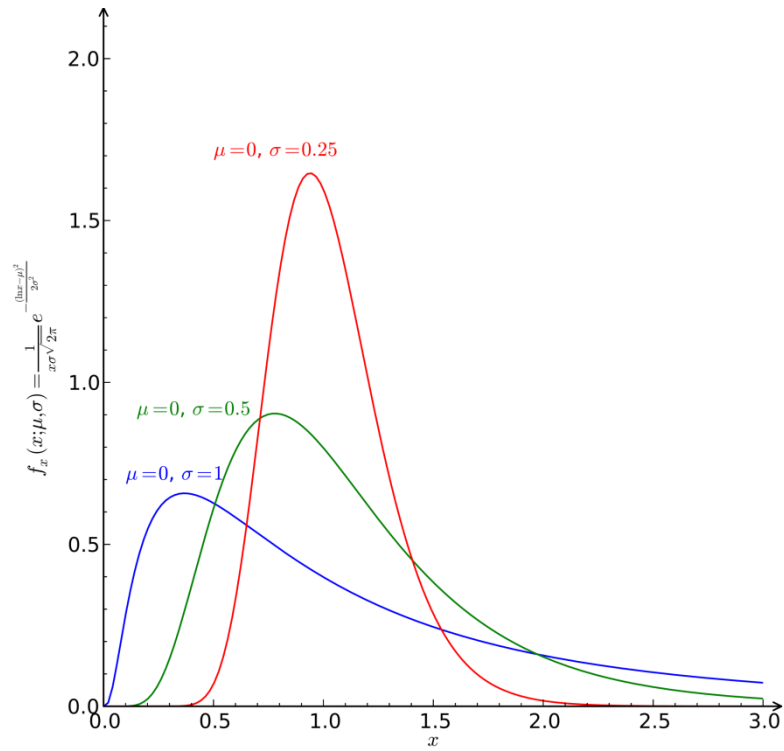
#### 4.3.2 Κατανομή Lognormal - $LN(\gamma, \beta, \alpha)$

Η λογαριθμοκανονική κατανομή χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διάρκειας διεργασιών και για το χρόνο μέχρι την εμφάνιση αστοχίας/βλάβης. Παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

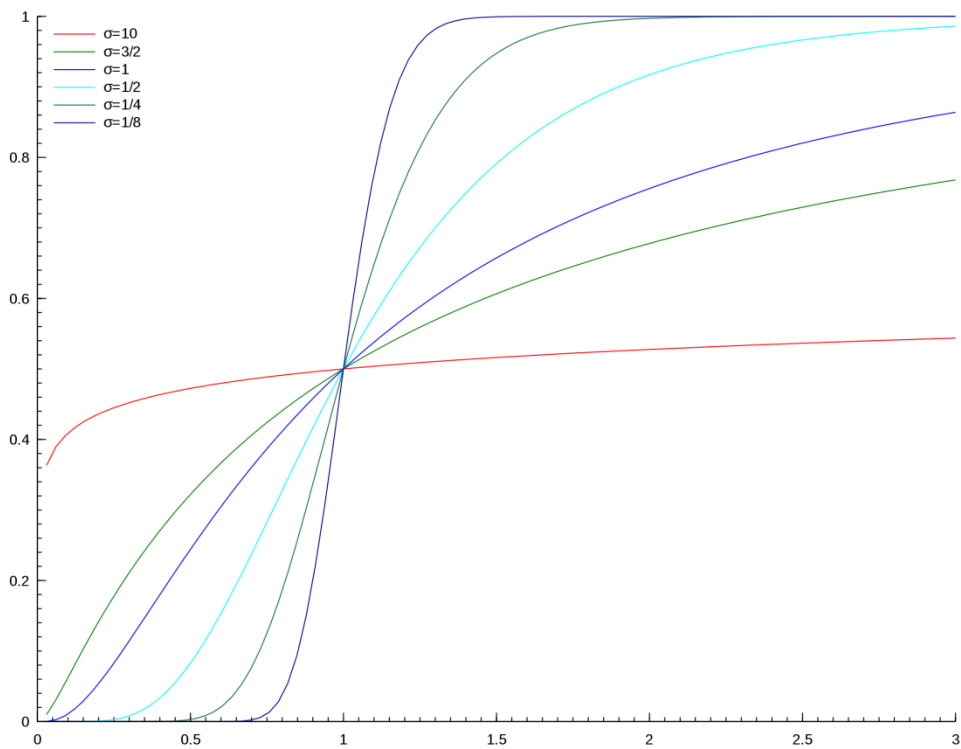
- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{(x - \gamma)\sqrt{2\pi\alpha^2}} \exp\left[-\frac{[\ln(x - \gamma) - \beta]^2}{2\alpha^2}\right] & \text{για } x > \gamma \\ 0 & \text{για } x \leq \gamma \end{cases}$$

- Παράμετροι: Παράμετρος θέσης  $\gamma \in (-\infty, \infty)$ , παράμετρος κλίμακας  $e^\beta > 0$ , παράμετρος σχήματος  $\alpha > 0$
- Πεδίο τιμών:  $(\gamma, \infty)$
- Μέση τιμή:  $\gamma + \exp\left(\beta + \frac{\alpha^2}{2}\right)$
- Διακύμανση:  $\exp(2\beta + \alpha^2) [\exp(\alpha^2) - 1]$
- Επικρατέστερη τιμή:  $\gamma + \exp(\beta - \alpha^2)$



Σχήμα 4.3 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Lognormal για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος,  $\sigma$ , και παράμετρο κλίμακας  $\mu=0$



Σχήμα 4.4 Γραφική παράσταση αθροιστικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της κατανομής Lognormal για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος,  $\sigma$

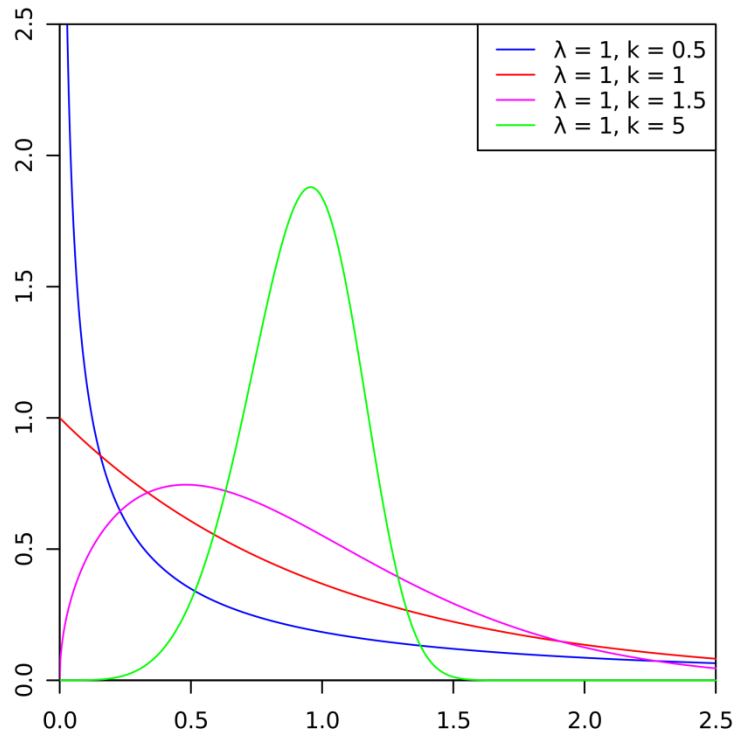
### 4.3.3 Κατανομή Weibull - $Weibull(\gamma, \beta, \alpha)$

Το πεδίο εφαρμογής της κατανομής Weibull είναι όμοιο με αυτό της lognormal και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

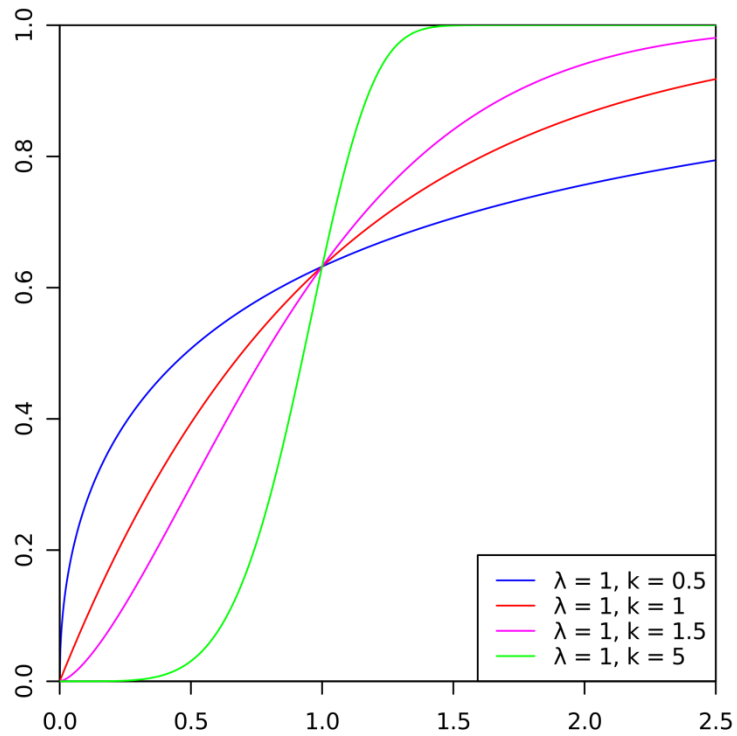
- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \begin{cases} \alpha\beta^{-\alpha} (x - \gamma)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] & \text{για } x > \gamma \\ 0 & \text{για } x \leq \gamma \end{cases}$$

- Παράμετροι: Παράμετρος θέσης  $\gamma \in (-\infty, \infty)$ , παράμετρος κλίμακας  $\beta > 0$ , παράμετρος σχήματος  $\alpha > 0$
- Πεδίο τιμών:  $(\gamma, \infty)$
- Μέση τιμή:  $\gamma + \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$
- Διακύμανση:  $\frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)\right]^2 \right\}$
- Επικρατέστερη τιμή:  $\begin{cases} \gamma + \beta \left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} & \text{εάν } \alpha \geq 1 \\ \gamma & \text{εάν } \alpha < 1 \end{cases}$



Σχήμα 4.5 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος,  $k$ , και παράμετρο κλίμακας  $\lambda=1$



Σχήμα 4.6 Γραφική παράσταση αθροιστικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές παραμέτρου σχήματος,  $k$ , και παράμετρο κλίμακας  $\lambda=1$

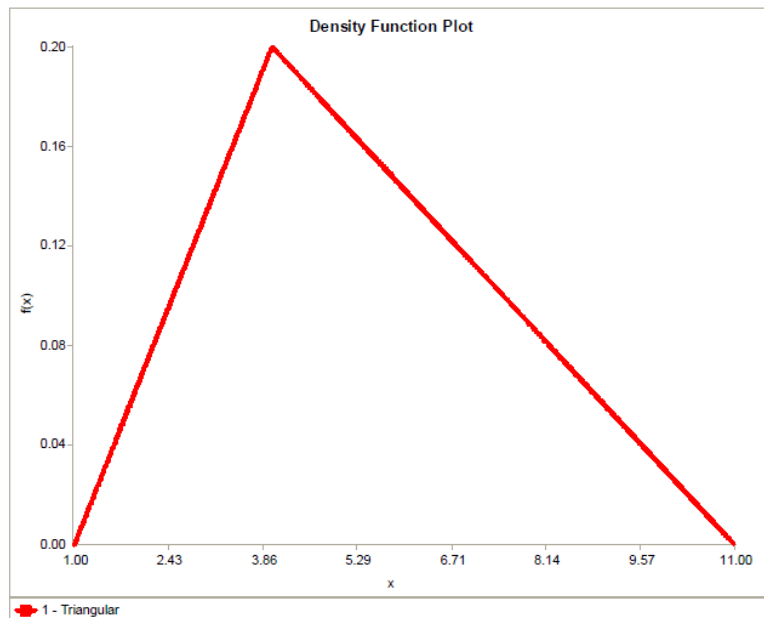
#### 4.3.4 Τριγωνική κατανομή

Η τριγωνική κατανομή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα.

- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(m-a)} & \text{αν } a < x \leq m \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-m)} & \text{αν } m < x < b \\ 0 & \text{αν } x < a \text{ ή } x > b \end{cases}$$

- Παράμετροι:  $a, b, m$  πραγματικοί αριθμοί με  $a < m < b$ ,  $a$  η παράμετρος θέσης,  $\beta - a$  παράμετρος κλίμακας,  $m$  παράμετρος σχήματος
- Πεδίο τιμών:  $(\alpha, \beta)$
- Μέση τιμή:  $\frac{\alpha + \beta + m}{3}$
- Διακύμανση:  $\frac{\alpha^2 + \beta^2 + m^2 - \alpha\beta - \alpha m - \beta m}{18}$
- Επικρατέστερη τιμή:  $m$



Σχήμα 4.7 Γραφική παράσταση συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της τριγωνικής κατανομής

#### 4.4 Εμπειρικές κατανομές

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται άμεσα για την προσαρμογή κατανομής μιας τυχαίας μεταβλητής το σύνολο των διαθέσιμων τιμών. Οι κατανομές αυτές ονομάζονται εμπειρικές και από αυτές λαμβάνονται ψευδοτυχαίες τιμές κατά την προσομοίωση.

Εάν τα αυθεντικά δεδομένα είναι διαθέσιμα, μπορεί να ορισθεί μία συνεχής, τμηματικά γραμμική (piece-wise linear) κατανομή πιθανότητας  $F$ , αφού έχει προηγηθεί ταξινόμηση των  $X_i$  κατά αύξουσα σειρά.

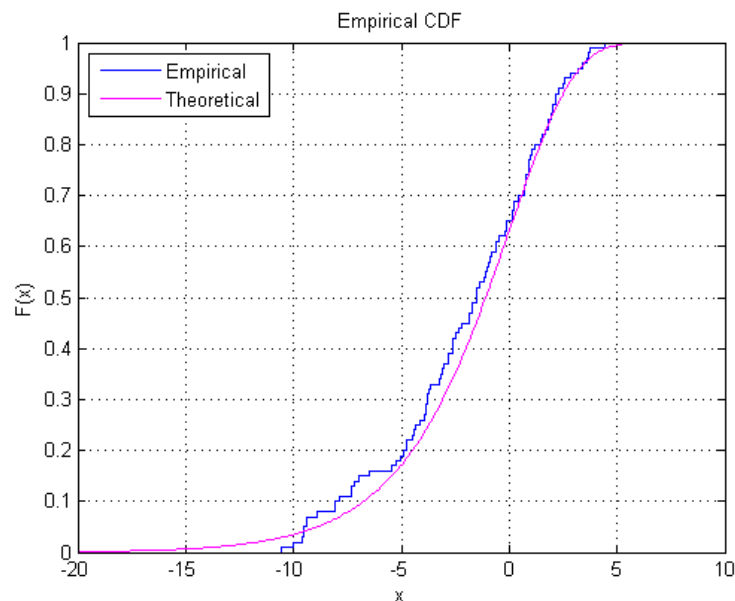
Έστω  $X(i)$  συμβολίζει την  $i$ -οστή μικρότερη τιμή από τις  $X_j$  έτσι ώστε:

$$X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$$

Τότε η  $F$  δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{αν } x < X_{(1)} \\ \frac{i-1}{n-1} + \frac{x-X_{(i)}}{(n-1)(X_{(i+1)}-X_{(i)})} & \text{αν } X_{(i)} \leq x < X_{(i+1)} \\ 1 & \text{αν } X_{(n)} \leq x \end{cases}$$

Η  $F(x)$  αυξάνεται με μεγαλύτερη κλίση σε περιοχές όπου οι τιμές είναι πιο πυκνά συγκεντρωμένες.



Σχήμα 4.8 Εμπειρική αθροιστική κατανομή και θεωρητική αθροιστική κατανομή

#### 4.5 Έλεγχος ανεξαρτησίας δειγμάτων

Μια σημαντική παραδοχή, για τη στατιστική επεξεργασία παρατηρήσεων τυχαίων μεταβλητών, είναι ότι οι παρατηρήσεις  $X_1, X_2, \dots, X_n$  είναι ανεξάρτητο δείγμα κάποιας υποκείμενης κατανομής. Για παράδειγμα ο έλεγχος υποθέσεων  $\chi^2$  και η μέθοδος εκτίμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum – likelihood estimation), με την οποία αξιολογείται η προσαρμογή μιας θεωρητικής κατανομής σε ένα σύνολο δεδομένων, προϋποθέτουν την παραπάνω ανεξαρτησία.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες εξετάζεται η ανεξαρτησία ενός συνόλου δεδομένων  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , διατεταγμένα κατά σειρά συλλογής. Στη συγκεκριμένη μελέτη προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε γραφική τεχνική ελέγχου ανεξαρτησίας με χρήση διαγραμμάτων διασποράς (scatter plots). Στα διαγράμματα διασποράς απεικονίζονται, για ένα σύνολο  $i+1$  παρατηρήσεων, τα ζεύγη παρατηρήσεων  $(X_i, X_{i+1})$  για κάθε  $i$ . Εάν τα στίγματα των ζευγών διατάσσονται διαμορφώνοντας κατά προσέγγιση ευθεία γραμμή, θετικής ή αρνητικής κλίσης, υπάρχει ένδειξη εξάρτησης. Αντιθέτως, πιστοποιείται η ανεξαρτησία του δείγματος.



## 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΚΑΡΔΙΑΣ

### 5.1 Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε στο λογισμικό Arena Simulation, Version 14.0, της Rockwell Automation Inc. και συγκροτείται από επιμέρους υπομοντέλα.

Το μοντέλο προσομοιώνει τη λειτουργία των κλάδων του Ορυχείου Καρδιάς για το έτος 2006. Παρά το συνεχή χαρακτήρα της Γερμανικής μεθόδου εκμετάλλευσης, που εφαρμόζεται στο υπό μελέτη ορυχείο, επιλέχθηκε η προσομοίωση διακριτών γεγονότων για την αναπαράσταση του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η ροή του υλικού που εξορύσσεται σε διακριτές οντότητες, οι οποίες αντιστοιχούν στην ποσότητα που εξορύσσει ο κάθε κλάδος στον καδοτροχό του εκσκαφέα και μεταφέρεται μέσω του δικτύου ταινιοδρόμων προς τον τελικό προορισμό του.

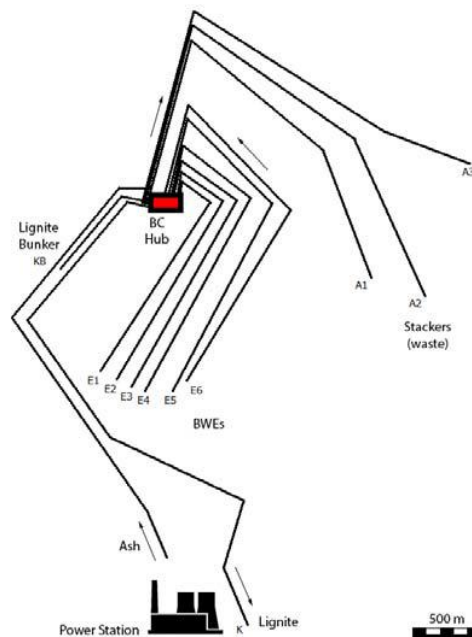
Στο μοντέλο προσομοιώθηκαν συνολικά 11 κλάδοι, εκ των οποίων έξι κλάδοι αφορούν στους καδοφόρους εκσκαφείς και πέντε στους αποθέτες – προορισμούς. Κάθε κλάδος εκσκαφέα οδηγεί στον κόμβο, όπου αναλόγως με το υλικό και την κατάσταση του συστήματος, το υλικό δρομολογείται προς έναν από τους πέντε κλάδους προορισμού.

Οι εκσκαφείς συμβολίζονται ως E1, E2, E3, E4, E5 και E6. Σημειώνεται ότι ο E1 εξορύσσει αποκλειστικά υπερκείμενα του λιγνιτικού κοιτάσματος. Οι εκσκαφείς E2-E6 λειτουργούν στις λιγνιτικές τομές, εξορύσσοντας το λιγνίτη και τα ενδιάμεσα στείρα. Στον Πίνακα 5.1 αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Κ/Ε.

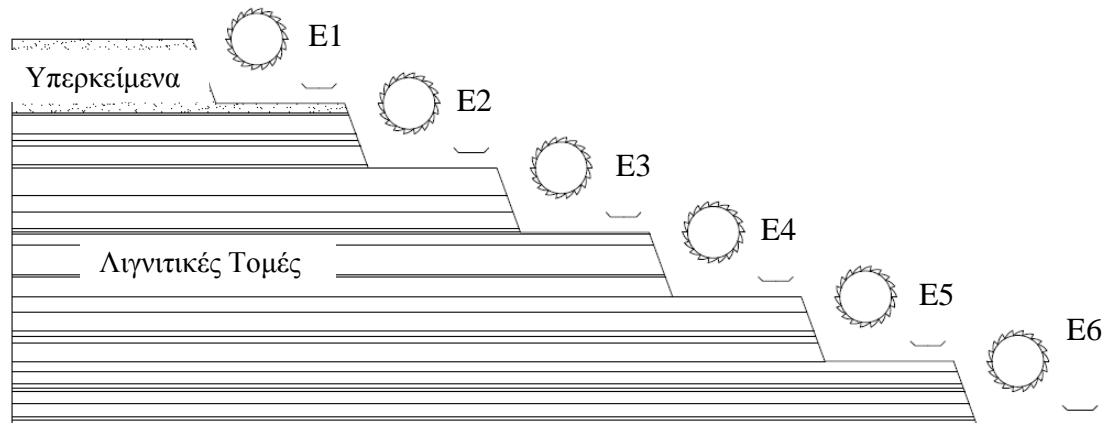
Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά Κ/Ε

Βαθμίδα	Κλάδος	Τύπος Κ/Ε	Εκκενώσεις/λεπτό	Χωρητικότητα κάδου (m <sup>3</sup> )
<b>Τομή υπερκειμένων</b>	E1	Krupp 1337 SchRs 2300	44	2.3
1 <sup>η</sup> λιγνιτική τομή	E2	Krupp 1264 SchRs 630	54	0.6
2 <sup>η</sup> λιγνιτική τομή	E3	Krupp 1264 SchRs 630	54	0.6
3 <sup>η</sup> λιγνιτική τομή	E4	Krupp 1264 SchRs 630	54	0.6
4 <sup>η</sup> λιγνιτική τομή	E5	Krupp 1339 SchRs 2300	44	2.3
5 <sup>η</sup> λιγνιτική τομή	E6	Krupp 1264 SchRs 630	54	0.6

Οι κλάδοι που οδηγούν στην απόθεση των στείρων συμβολίζονται ως A1, A2 και A3, ενώ οι δύο που αφορούν στη μεταφορά λιγνίτη, ως Κ και ΚΒ. Ο κλάδος Κ οδηγεί το λιγνίτη στον ΑΗΣ Καρδιάς και ο κλάδος ΚΒ καταλήγει στο bunker. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η διάταξη του υπό μελέτη συστήματος και στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η τομή του ορυχείου.



Σχήμα 5.1 Διάταξη του υπό μελέτη συστήματος



Σχήμα 5.2 Τομή Ορυχείου Καρδιάς όπως προσομοιώνεται

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο συγκροτείται από επιμέρους υπομοντέλα, τα οποία είτε ελέγχουν τη λειτουργία του μοντέλου είτε προσομοιώνουν επιμέρους διεργασίες, και είναι τα εξής:

- Αρχικοποίηση (initialization) αποθετών
- Αρχικοποίηση εκσκαφών
- Αναπαράσταση και έλεγχος εξόρυξης και εναλλαγής υλικού
- Έλεγχος ταινιοδρόμων κάθε κλάδου
- Έλεγχος αποθετών
- Μεταφορά υλικού προς τον κόμβο
- Μεταφορά υλικού επί του κόμβου
- Μεταφορά υλικού προς τον τελικό προορισμό
- Έλεγχος κίνησης εκσκαφέα
- Έλεγχος λειτουργίας κόμβου
- Διαχείριση επαναδρομολόγησης υλικού
- Ετήσια συντήρηση εκσκαφών και αποθετών

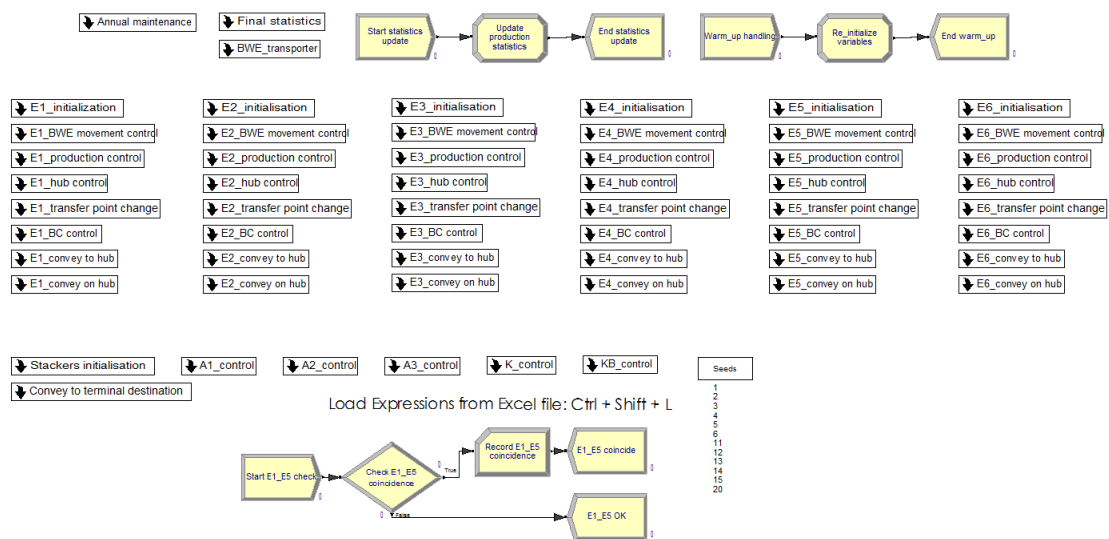
Οι οντότητες (entities) που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο κατατάσσονται σε δυο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη αφορά οντότητες που αναπαριστούν το εξορυγμένο υλικό (material entities) και η δεύτερη συνίσταται από οντότητες που λειτουργούν ως μέσο ελέγχου της κατάστασης και λειτουργίας των εκσκαφών, ταινιοδρόμων, αποθετών και του κόμβου (control entities), καθώς και της προσομοίωσης καθεαυτής.

Οι πόροι (resources), οι οποίοι εξυπηρετούν τις οντότητες υλικού του μοντέλου, είναι οι 6 K/E του συστήματος και οι 5 αποθέτες.

Το σύνολο των καταστάσεων (state set), στις οποίες μπορούν να βρεθούν οι εκσκαφείς είναι οι παρακάτω:

- Εξόρυξη (excavating)
- Αναμονή (blocked)
- Εκτός λειτουργίας εξαιτίας βλάβης (down – failure)
- Αλλαγή υλικού (material change)
- Προγραμματισμένη συντήρηση (maintenance)
- Ετήσια συντήρηση (annual maintenance)

Επίσης σε συνδυασμό με τους πόρους, για τη λειτουργία του μοντέλου και τη ρεαλιστική αναπαράσταση των κλάδων χρησιμοποιούνται ταινιόδρομοι (conveyors) για τη μεταφορά του εξορυγμένου υλικού, όπως και στο πραγματικό σύστημα. Στην Εικόνα 5.1 εμφανίζεται το σύνολο των υπομοντέλων.



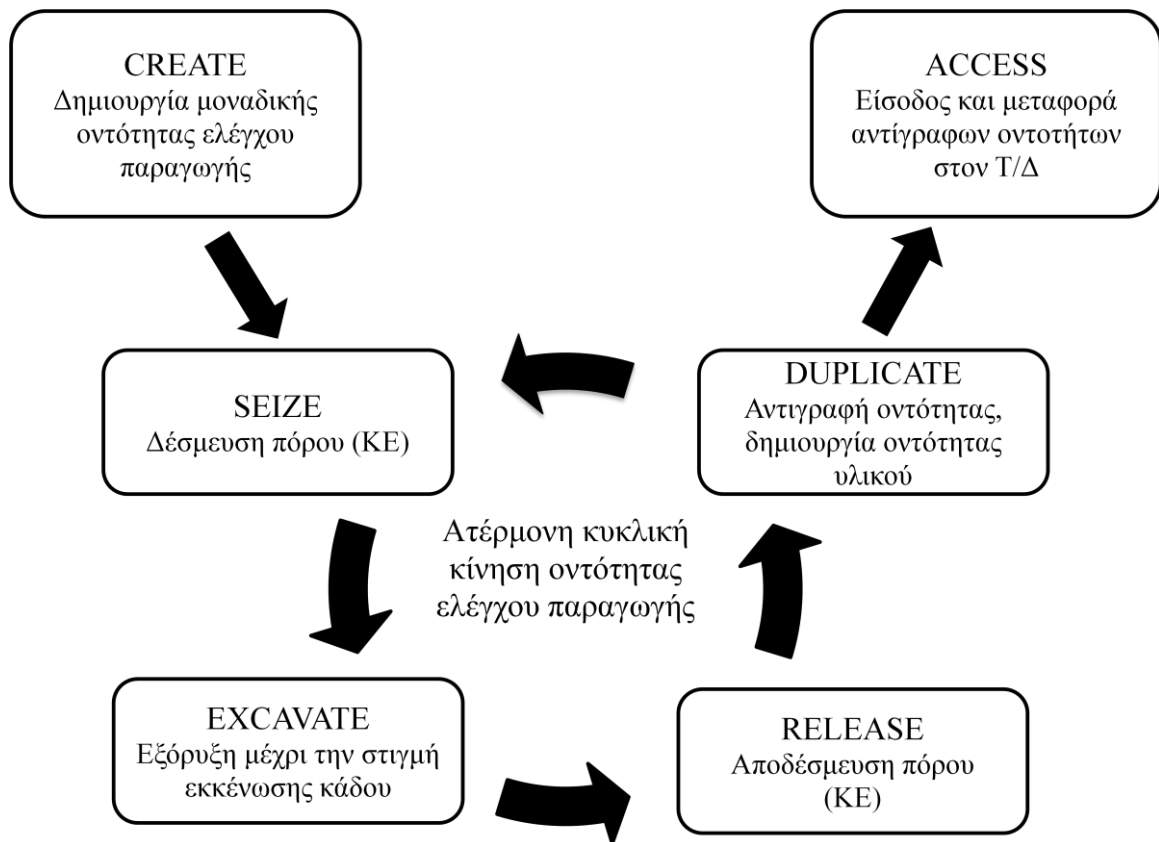
Εικόνα 5.1 Η οργάνωση του μοντέλου σε υπομοντέλα.

Η διαδικασία της προσομοίωσης αρχίζει με μια σειρά ενεργειών που αποτελούν την αρχικοποίησή της (initialization).

Με την έναρξη της προσομοίωσης δημιουργείται μια οντότητα ελέγχου η οποία εκπέμπει σήμα (signal) όταν όλοι οι αποθέτες τεθούν σε κατάσταση λειτουργίας.

Το παραπάνω σήμα λαμβάνεται από τα υπομοντέλα της αρχικοποίησης των εκσκαφών. Σε κάθε υπομοντέλο αρχικοποίησης εκσκαφών, με τη λήψη του παραπάνω σήματος εκπέμπεται μια νέα σειρά σημάτων. Αυτά τα σήματα, λαμβάνονται από τα υπολοιπα υπομοντέλα που συμμετέχουν στην αρχικοποίηση της προσομοίωσης. Η λήψη τους επιτρέπει την εκκίνηση της λειτουργίας των Τ/Δ, των κόμβων, της διαδικασίας μετακίνησης των Κ/Ε και της εξορυκτικής λειτουργίας των Κ/Ε.

Για την αναπαράσταση της εξορυκτικής λειτουργίας των Κ/Ε δημιουργείται μία, μοναδική, οντότητα, η οποία κυκλοφορεί συνεχώς σε βρόχο επανάληψης (loop). Εάν έχει δοθεί το σήμα έναρξης εξόρυξης και εάν ο Τ/Δ βρίσκεται σε λειτουργία η οντότητα απασχολεί τον πόρο που εκπροσωπεί τον Κ/Ε. Η προτεραιότητα με την οποία καταλαμβάνει τον πόρο και τον θέτει σε κατάσταση εξόρυξης είναι η χαμηλότερη, κάτι που αναλύεται στη συνέχεια. Ο χρόνος για τον οποίο χρησιμοποιεί τον πόρο προκύπτει από τη συχνότητα εκκενώσεων κάδων ανά λεπτό κάθε εκσκαφέα. Μετά την πάροδο αυτού του χρόνου η οντότητα αντιγράφεται και οδηγείται στην αρχή του βρόχου έτσι ώστε να αναδεσμεύσει τον Κ/Ε.



Σχήμα 5.3 Ατέρμονη κυκλική κίνηση οντότητας ελέγχου παραγωγής

Ύστερα, στην αντίγραφο οντότητα, η οποία πλέον αποτελεί οντότητα υλικού (material entity), αποδίδονται τιμές (attributes) για το είδος και τον όγκο του υλικού που αναπαριστά. Ο όγκος της καθορίζεται από την ονομαστική χωρητικότητα του κάδου και τον αδιάστατο συντελεστή πλήρωσης του κάδου. Ο ανωτέρω συντελεστής λαμβάνεται μέσω ομοιόμορφης συνάρτησης κατανομής πιθανότητας.

Αναλόγως με το είδος του υλικού, προσδιορίζονται το βάρος της οντότητας και στοιχεία που αφορούν στη δυναμική οπτικοποίηση της προσομοίωσης (χρώμα οντότητας κ.λπ). Επίσης ανανεώνονται και μεταβλητές κατάστασης, οι οποίες χρησιμεύουν στη συλλογή στατιστικών (ρυθμός εξόρυξης και παραγωγή λιγνίτη/στείρων του συγκεκριμένου εκσκαφέα).

Στη συνέχεια η οντότητα οδηγείται στον Τ/Δ του κλάδου του συγκεκριμένου εκσκαφέα που αναπαρίσταται στο αντίστοιχο υπομοντέλο.

Οι Τ/Δ των κλάδων του μοντέλου ορίζονται με χρήση του έτοιμου module, conveyor. Σε αυτό καθορίζονται τα σημεία αφετηρίας και τέρματος και οι ενδιάμεσοι σταθμοί. Οι Τ/Δ των εκσκαφέων συγκροτούνται κατά σειρά από τρία τμήματα: την τομοταινία (face conveyor), η οποία εκτείνεται κατά μήκος της βαθμίδας, τη συνδετήρια μεταφορική ταινία και το τμήμα που οδηγεί στον κόμβο.

Η θέση του Τ/Δ στην οποία τοποθετεί ο Κ/Ε τις παραγόμενες οντότητες (ποσότητες υλικού) εξαρτάται από την κίνηση του Κ/Ε. Η παλινδρομική κίνηση του εκσκαφέα κατά μήκος της τομοταινίας του επιτυγχάνεται στο Arena με τη χρήση σταθμών (stations) και μεταφορέων (transporters).

Υπάρχουν ξεχωριστοί μεταφορείς και υπομοντέλα για κάθε έναν από τους εκσκαφείς. Οι οντότητες ελέγχου που παράγονται σε αυτά οδηγούνται σε ένα συγκεντρωτικό υπομοντέλο στο οποίο ελέγχεται η κίνηση των μεταφορέων. Συγκεκριμένα, ελέγχονται οι μεταβλητές που αφορούν στη φορά κίνησης, στη θέση, στο σταθμό προορισμού του Κ/Ε και στο σταθμό τροφοδοσίας του Τ/Δ. Όταν ο εκσκαφέας φτάνει στα όρια της προκαθορισμένης κίνησης μεταξύ της κεφαλής (head) και του τέρματος (tail) του Τ/Δ γίνεται αντιστροφή της πορείας του.

Όταν οι οντότητες υλικού φτάνουν στον κόμβο, συνεχίζουν αναλόγως με τον κλάδο προορισμού που ορίζεται από συγκεκριμένη μεταβλητή.

Αφού εισέλθουν στους Τ/Δ των κλάδων προορισμού, μεταφέρονται μέχρι τον τελικό προορισμό τους, όπου καταγράφονται τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία πριν την έξοδό τους από το σύστημα.

Σημαντικό για την ορθή προσομοίωση του συστήματος είναι η αποτύπωση της πραγματικής σειράς γεγονότων που σημειώνεται κατά την αλλαγή του είδους υλικού που εξορύσσεται και την αλλαγή στον κόμβο που ακολουθεί. Οι αλλαγές αυτές είναι αποτέλεσμα της απαραίτητης εκλεκτικής εξόρυξης που επιβάλλουν τα κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά του λιγνιτικού πεδίου.

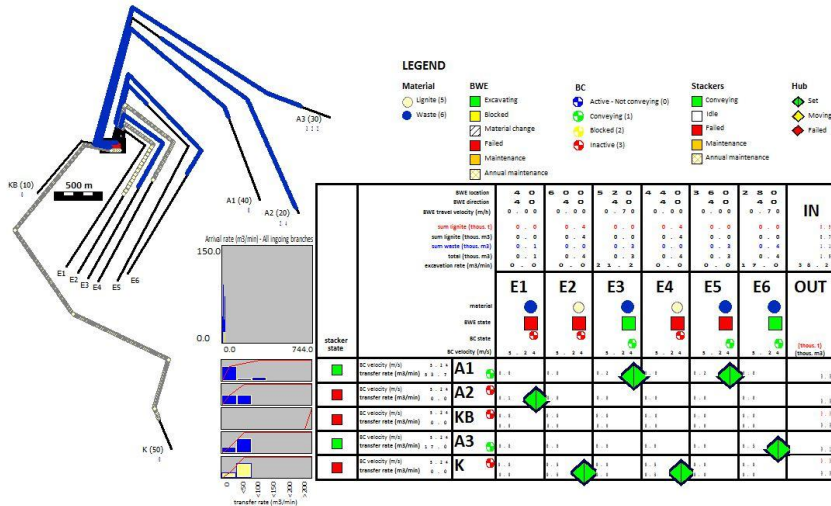
Έτσι, αναλόγως με το χρόνο μεταξύ των αλλαγών αυτών, η διαδικασία παραγωγής οντοτήτων υλικού διακόπτεται και μια οντότητα ελέγχου ακολουθεί την τελευταία ποσότητα εξορυχθέντος υλικού. Ο πόρος (K/E) δεσμεύεται από την οντότητα ελέγχου, η οποία έχει υψηλότερη προτεραιότητα από τις οντότητες υλικού, και τίθεται σε κατάσταση αναμονής. Μετά την πάροδο τεσσάρων λεπτών, όσο δηλαδή διαρκεί το γεγονός της αλλαγής υλικού στην πραγματικότητα, και μετά από μια σειρά ελέγχων που επιβεβαιώνουν την αλλαγή δρομολόγησης στον κόμβο, ο εκσκαφέας αποδεσμεύεται από την οντότητα ελέγχου και επανεκκινεί την εξορυκτική του δραστηριότητα.

Επίσης, στο μοντέλο υπάρχει πρόβλεψη και για τις περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται αναγκαστική αλλαγή δρομολόγησης εξαιτίας μη λειτουργίας αποθετών.

## 5.2 Η δομή του μοντέλου

### 5.2.1 Κύριο πλαίσιο

Η έκταση και ο βαθμός πολυπλοκότητας του μοντέλου προσομοίωσης του Ορυχείου Καρδιάς επιβάλλει τη συγκρότηση του από επιμέρους τμήματα. Τα τμήματα αυτά είναι τα υπομοντέλα (submodels) που εντοπίζονται στην κύρια οθόνη του μοντέλου (top-level). Στο πλαίσιο αυτό επίσης έχουν υλοποιηθεί η δυναμική οπτικοποίηση (animation) της προσομοίωσης και ο πίνακας κατάστασης (state matrix) του συστήματος. Σε αυτόν απεικονίζονται στοιχεία που αφορούν στην παραγωγή κάθε κλάδου, στον προορισμό των εξορυσσόμενων υλικών, στις ρυθμίσεις στον κόμβο και στην κατάσταση των εκσκαφών, αποθετών και Τ/Δ. Ο πίνακας κατάστασης του συστήματος και η δυναμική οπτικοποίηση φαίνονται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 Animation και πίνακας κατάστασης του συστήματος

### 5.2.2 Υπομοντέλο αρχικοποίησης αποθετών

Η αρχικοποίηση της προσομοίωσης έχει αφετηρία στο υπομοντέλο της αρχικοποίησης αποθετών. Μια οντότητα ελέγχου παράγει τη χρονική στιγμή μηδέν (δηλαδή, κατά την έναρξη της προσομοίωσης) και μετά από αναμονή 5 δευτερολέπτων εκπέμπει σήμα (signal) με το οποίο εκκινεί την αρχικοποίηση του συστήματος. Η οντότητα, μόλις εκπληρωθεί η συνθήκη ότι όλοι οι Τ/Δ των κλάδων απόθεσης έχουν τεθεί σε λειτουργία, συνεχίζει με την εκπομπή σήματος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκκίνησης και εξέρχεται του συστήματος όπου καταστρέφεται (dispose).

### 5.2.3 Υπομοντέλα ελέγχου αποθετών

Στο υπομοντέλο ελέγχου των αποθετών ελέγχεται η στάση και εκκίνηση των Τ/Δ τους. Με ένα σύνολο εντολών, δύο οντότητες ελέγχου, που κινούνται κυκλικά σε διαφορετικές δομές βρόχων επανάληψης, εξετάζουν την κατάσταση του αποθέτη και αναλόγως είτε σταματούν είτε θέτουν σε κίνηση τους Τ/Δ. Τα σχετικά modules είναι το ζεύγος start/stop.

Επίσης, σύμφωνα με την εναλλαγή των καταστάσεων των Τ/Δ, μεταβάλλεται και η κατάσταση των αποθετών.

### 5.2.4 Υπομοντέλα αρχικοποίησης εκσκαφών

Η αρχικοποίηση των εκσκαφών επιτυγχάνεται ομοίως με αυτήν των αποθετών, δηλαδή με τη διαδρομή μιας οντότητας ελέγχου. Η οντότητα δημιουργείται τη χρονική στιγμή



μηδέν και ακολουθεί μια σειρά εκπομπής σημάτων και αναμονών μέχρι να καταλήξει στην καταστροφή της.

Τα σήματα χρησιμεύουν για την εξασφάλιση της αρχικοποίησης του κόμβου, του T/Δ, και του εκσκαφέα με αυτή τη σειρά, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά μόλις ξεκινήσει η εξόρυξη.

### 5.2.5 Υπομοντέλα ελέγχου παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε, η διεργασία της εξόρυξης υλοποιείται με μια ατέρμονη κυκλική κίνηση μιας οντότητας ελέγχου παραγωγής. Η συγκεκριμένη οντότητα αφού ελέγξει εάν ο T/Δ των κλάδων λειτουργεί, δεσμεύει τον εκσκαφέα για όσο χρόνο απαιτεί η εκκένωση ενός κάδου. Ο χρόνος αυτός είναι το αντίστροφο της συχνότητας εκκενώσεων κάδων ανά λεπτό. Μετά την αποδέσμευση του πόρου η οντότητα αντιγράφεται και η αυθεντική οντότητα ελέγχου επιστρέφει στο σημείο ελέγχου λειτουργίας των T/Δ. Στη νέα οντότητα, η οποία είναι οντότητα υλικού, αποδίδονται χαρακτηριστικά όγκου και μάζας κ.α. ιδιότητες και στη συνέχεια οδηγείται στην τομοταινία της βαθμίδας. Το ακριβές σημείο εισόδου της στην τομοταινία εξαρτάται από την παλινδρομική κίνηση που εκτελεί ο K/E κατά μήκος της βαθμίδας.

Στο ίδιο υπομοντέλο υπάρχει η δομή που ελέγχει τις εναλλαγές του είδους του υλικού που εξορύσσεται. Στη συγκεκριμένη δομή μια οντότητα ελέγχου κινείται κυκλικά κάθε φορά που σημειώνεται αλλαγή στο είδος του υλικού που πρόκειται να εξορυχθεί. Αυτή η οντότητα αντιγράφεται δύο φορές. Η πρώτη αντιγραφή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία οντότητας ελέγχου, η οποία ακολουθεί τις οντότητες υλικού πάνω στον T/Δ και δηλώνει την αρχή του κενού που διαμορφώνεται πάνω στη μεταφορική ταινία. Επίσης, η συγκεκριμένη οντότητα καταλαμβάνει τον K/E, θέτοντας τον σε κατάσταση αναμονής (blocked). Η προτεραιότητα με την οποία δεσμεύεται ο K/E είναι μεγαλύτερη από αυτήν που κατέχουν οι οντοτήτες υλικού και με τον τρόπο αυτό διακόπτεται η εξορυκτική λειτουργία του κλάδου. Το κενό που διαμορφώνεται είναι απαραίτητο για να γίνουν απρόσκοπτα οι απαιτούμενες αλλαγές στον κόμβο, δηλαδή η αλλαγή της δρομολόγησης προς νέο τελικό προορισμό. Το δεύτερο αντίγραφο αναμένει και ακολουθεί μόλις σχηματιστεί πάνω στην μεταφορική ταινία κενό μήκους 100 m. Αυτό το δεύτερο αντίγραφο χρησιμοποιείται για την εκκίνηση της διαδικασίας αλλαγής στον κόμβο. Μετά την πάροδο τεσσάρων λεπτών, όσο δηλαδή διαρκεί η διαδικασία στο πραγματικό σύστημα, και αφού έχει εκτελεσθεί μια σειρά ελέγχων (διαμόρφωση κενού επαρκούς

μήκους) ο εκσκαφέας αποδεσμεύεται και τίθεται εκ νέου σε κατάσταση εξόρυξης. Η αυθεντική οντότητα ελέγχου περιμένει την επόμενη αλλαγή υλικού. Οι αντίγραφες οντότητες εισέρχονται στον Τ/Δ και η πορεία τους αναλύεται στη συνέχεια.

Το είδος του υλικού που πρόκειται να εξορυχθεί μετά από αυτήν τη διαδικασία καθορίζεται από την αναλογία λιγνίτη και στείρων όπως προβλέπεται στο γεωλογικό μοντέλο του κοιτάσματος. Το κοίτασμα έχει διαιρεθεί σε block μήκους 40 m. Σε κάθε block είναι γνωστή από το γεωλογικό μοντέλο του κοιτάσματος η αναλογία λιγνιτικών και στείρων ενστρώσεων. Σε κάθε αλλαγή υλικού, το είδος που πρόκειται να εξορυχθεί, καθορίζεται σύμφωνα με την προαναφερθείσα αναλογία, χρησιμοποιώντας κατανομές Bernulli. Η κατανομή Bernulli χρησιμοποιείται στα πειράματα τα οποία οδηγούν μόνο σε δύο αποτελέσματα (Ζιούτας 2003). Στο Arena οι κατανομές αυτές διαμορφώνονται με την χρήση της έκφρασης DISC( ), με δύο πιθανές τιμές για την τυχαία μεταβλητή. Οι δυο αυτές τιμές μεταφράζονται στη συνέχεια ως λιγνίτης ή στείρο, στην ανάθεση των ιδιοτήτων των παραγόμενων ποσοτήτων.

#### 5.2.6 Υπομοντέλα μεταφοράς υλικού προς τον κόμβο

Όπως σημειώθηκε, η θέση στην οποία ο Κ/Ε τροφοδοτεί τον Τ/Δ με το υλικό που εξορύσσει εξαρτάται από την παλινδρομική κίνηση που εκτελεί επί της βαθμίδας εκμετάλλευσης. Στο υπομοντέλο μεταφοράς υλικού από τον Τ/Δ εισέρχονται οι οντότητες που παράγονται από τη διεργασία εξόρυξης. Εκεί, σύμφωνα με την τιμή μεταβλητής που προσδιορίζει το σημείο της τομοταινίας όπου βρίσκεται ο Κ/Ε, οι οντότητες υλικού οδηγούνται στον αντίστοιχο σταθμό (station) του Τ/Δ. Εκεί τοποθετούνται (access) στον Τ/Δ του κλάδου και μεταφέρονται μέχρι τον κόμβο, οποίος υλοποιείται σε διαφορετικό υπομοντέλο.

#### 5.2.7 Υπομοντέλα μεταφοράς υλικού επί του κόμβου

Στο συγκεκριμένο υπομοντέλο γίνεται αρχικά διάκριση με βάση το αν οι οντότητες αναπαριστούν υλικό ή τα όρια του κενού που διαμορφώνεται εξαιτίας αλλαγής υλικού. Εάν είναι οι οντότητες των ορίων του κενού, τότε οδηγούνται σε υπομοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια (υπομοντέλο αλλαγής προορισμού). Αντίθετα, όταν οι οντότητες αναπαριστούν εξορυγμένο υλικό διενεργείται δεύτερος έλεγχος με τον οποίο εξετάζεται η τρέχουσα ρύθμιση του κόμβου, η οποία ορίζει τον προορισμό του υλικού. Με

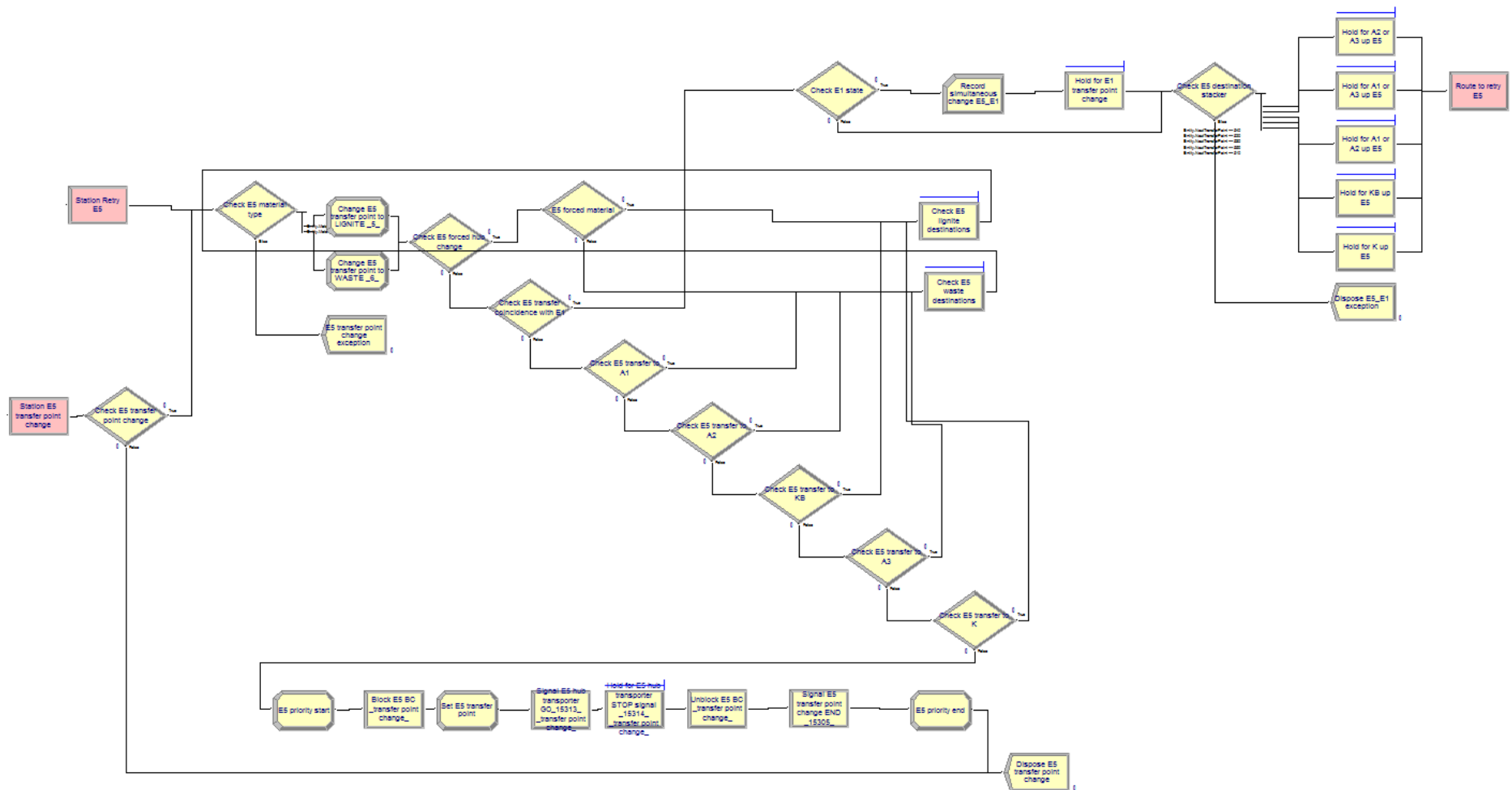
αυτόν τον τρόπο οι οντότητες οδηγούνται στον αντίστοιχο σταθμό και εισέρχονται στον Τ/Δ του κλάδου απόθεσης για τη μεταφορά τους μέχρι τον τελικό προορισμό.

#### 5.2.8 Υπομοντέλα αλλαγής προορισμού

Σε αυτό το υπομοντέλο εισέρχονται οι οντότητες που αναπαριστούν τα όρια των κενών και οι οντότητες που εξαναγκάζουν σε αλλαγές προορισμού όταν τίθεται εκτός λειτουργίας ο τρέχων κλάδος προορισμού. Οι τελευταίες οντότητες, μαζί με αυτές που αναπαριστούν το δεύτερο όριο του κενού, προκαλούν την ανάθεση (assign) ενός νέου προορισμού αφού προηγουμένως έχει γίνει διάκριση σύμφωνα με το είδος του υλικού που πρόκειται να μεταφερθεί. Μέσω ενός συνόλου ελέγχων εξασφαλίζεται ότι η νέα ανάθεση σημείου μεταφοράς δεν συμπίπτει με την προηγούμενη ρύθμιση και ότι οι αντίστοιχοι Τ/Δ βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Στη συνέχεια σταματάει η λειτουργία του Τ/Δ του κλάδου παραγωγής και δίνεται η εντολή να αρχίσει η διαδικασία της αλλαγής στον κόμβο. Όταν ολοκληρωθεί η αλλαγή τίθεται ξανά σε λειτουργία ο Τ/Δ και τελικά οι σχετικές οντότητες ελέγχου εξέρχονται του συστήματος. Η στάση και εκκίνηση των Τ/Δ υλοποιείται με τη χρήση των modules store/unstore, τα οποία αποθηκεύουν/εξάγουν οντότητες σε αποθηκευτικούς χώρους (storages). Σε κάθε Τ/Δ παραγωγής αντιστοιχεί ένας αποθηκευτικός χώρος. Το πλήθος των οντοτήτων εντός των χώρων αυτών, αποτελεί μεταβλητή, η τιμή της οποίας καθορίζει εάν υπάρχει αίτιο παύσης του Τ/Δ. Όταν ο χώρος είναι κενός δεν παρουσιάζεται αιτία παύσης των Τ/Δ. Αντίθετα, όταν υπάρχει αριθμός οντοτήτων εντός του χώρου, υποδηλώνεται η αδυναμία λειτουργίας και προκαλείται η παύση του Τ/Δ.

Ειδικά για την περίπτωση των εκσκαφών E1 και E5, οι οποίοι είναι μεγάλης δυναμικότητας (Krupp 1337 SchRs 2300 και Krupp 1339 SchRs 2300 αντίστοιχα), έχει προστεθεί επιπλέον έλεγχος ώστε αφενός να μην τροφοδοτούν ταυτόχρονα τον ίδιο προορισμό και αφετέρου να μην εκτελούν συγχρόνως αλλαγές στον κόμβο, έτσι ώστε να μην υπερβαίνεται η δυναμικότητα των κλάδων απόθεσης.

Στην Εικόνα 5.3 φαίνεται το υπομοντέλο αλλαγής προορισμού για τον εκσκαφέα E1.



Εικόνα 5.3 Δομή υπομοντέλου αλλαγής προορισμού

### 5.2.9 Υπομοντέλο μεταφοράς προς τον τελικό προορισμό

Η μεταφορά του λιγνίτη και των στείρων προς τους τελικούς προορισμούς τους υλοποιείται από πέντε απλές δομές, μία για κάθε κλάδο απόθεσης. Σε αυτές τις δομές οι οντότητες υλικού που μεταφέρονται από τους Τ/Δ των αποθετών εξέρχονται από τη μεταφορική ταινία (exit conveyor) και πριν την τελική έξοδό τους από το σύστημα καταγράφονται τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία.

### 5.2.10 Υπομοντέλα ελέγχου κόμβων

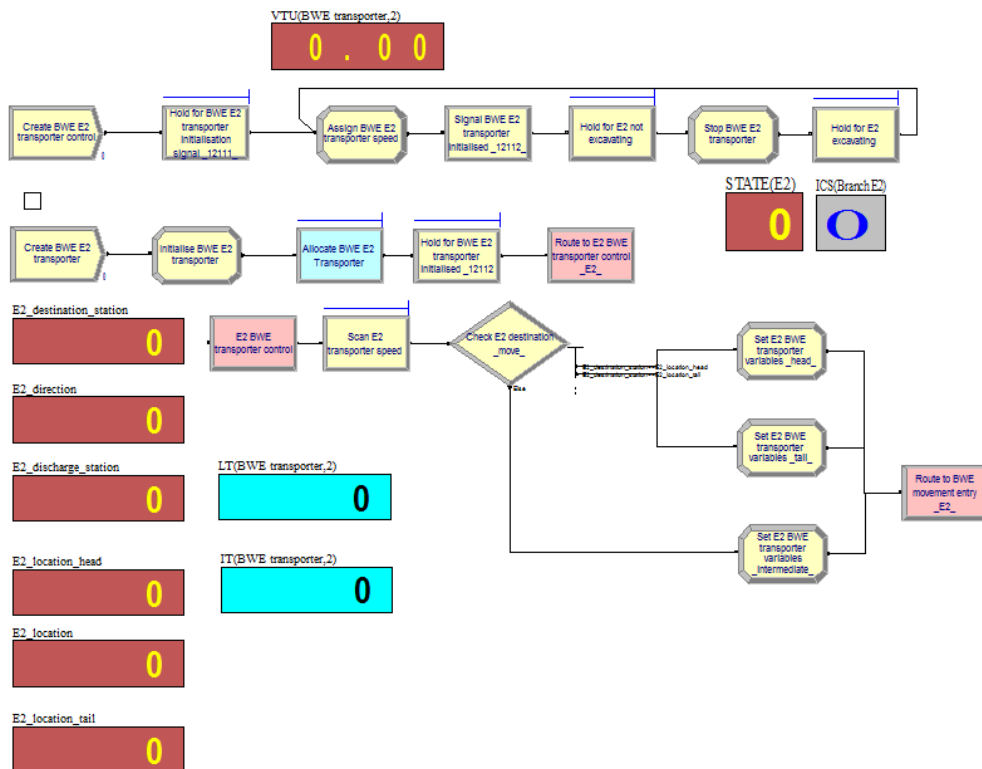
Τα υπομοντέλα ελέγχου των κόμβων διαθέτουν δύο δομές, με την πρώτη να αφορά στην αρχικοποίηση τους και τη δεύτερη στον έλεγχο των μεταφορέων. Οι εν λόγω μεταφορείς υλοποιούν το μηχανισμό μεταφόρτωσης στον κόμβο και είναι τύπου guided transporters, που σημαίνει ότι κινούνται σε ένα δίκτυο (network). Συγκεκριμένα, αναλόγως με τις αλλαγές που σημειώνονται μετακινούν το μηχανισμό μεταφόρτωσης στην επιθυμητή θέση (intersection). Με την ολοκλήρωση της μετακίνησης η οντότητα ελέγχου επιστρέφει στο σημείο αναμονής για την επόμενη αλλαγή θέσης. Η ύπαρξη της συγκεκριμένης δομής απαιτείται κυρίως για τη λειτουργία του animation της προσομοίωσης. Επίσης, χρησιμεύει για την εκτομή του σήματος ολοκλήρωσης της αλλαγής, το οποίο επαναφέρει το σχετικό κλάδο Κ/Ε σε κατάσταση όπου του επιτρέπεται να εξορύξει και να μεταφέρει το υλικό του.

### 5.2.11 Υπομοντέλα ελέγχου Τ/Δ κλάδων παραγωγής

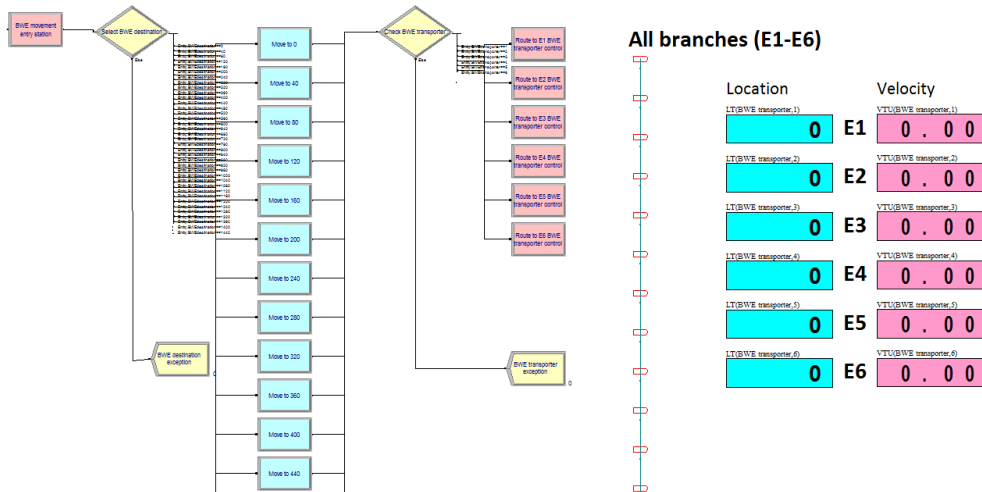
Για την επιτυχή προσομοίωση του ορυχείου είναι απαραίτητη να συμπεριληφθεί η εναλλαγή που παρατηρείται στην κατάσταση των Τ/Δ των κλάδων παραγωγής. Αυτή η εναλλαγή επιτυγχάνεται με την κατασκευή υπομοντέλων στα οποία αναλόγως με τη συχνότητα και τη διάρκεια βλαβών ελέγχεται η στάση και εκκίνηση των Τ/Δ. Επίσης, η κατάσταση των Τ/Δ καθορίζεται από δομές που ελέγχουν την κατάσταση των κλάδων αποθετών, τους οποίους τροφοδοτούν. Όταν ο αποθέτης που τροφοδοτείται από έναν Τ/Δ τεθεί εκτός λειτουργίας, αυτομάτως διακόπτεται η λειτουργία του τροφοδότη Τ/Δ. Εάν ο αποθέτης έχει τεθεί σε κατάσταση ετήσιας ή προγραμματισμένης συντήρησης, τότε ακολουθεί αλλαγή του τελικού προορισμού, έτσι ώστε να μπορεί να συνεχιστεί η εξόρυξη και μεταφορά υλικού. Στην περίπτωση βλάβης του αποθέτη ο Τ/Δ απλά σταματάει και ο Κ/Ε τίθεται σε κατάσταση αναμονής μέχρι την επισκευή της βλάβης.

### 5.2.12 Υπομοντέλα ελέγχου πορείας Κ/Ε – Υπομοντέλα μεταφορέων Κ/Ε

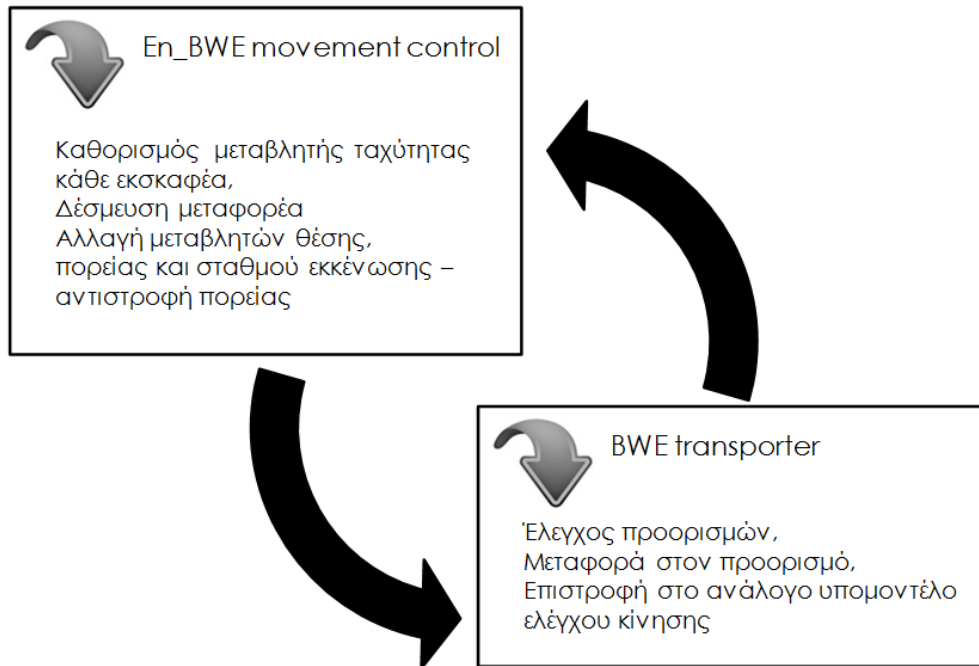
Στα υπομοντέλα ελέγχου πορείας Κ/Ε υπάρχουν δύο δομές. Και οι δύο χρησιμοποιούνται από οντότητες ελέγχου που εκτελούν μια κυκλική κίνηση. Στην πρώτη δομή αποδίδονται οι τιμές των μεταβλητών που ορίζουν την ταχύτητα πορείας των εκσκαφών. Εάν ο Κ/Ε λειτουργεί η ταχύτητα παίρνει την τιμή της ονομαστικής τιμής, αλλιώς μηδενίζεται. Στη δεύτερη δομή ελέγχονται οι μεταβλητές που σχετίζονται με τη θέση των εκσκαφών. Αυτές είναι η τρέχουσα θέση, η κατεύθυνση και ο τρέχων σταθμός εκκένωσης του κάθε εκσκαφέα. Κάθε μία οντότητα των έξι υπομοντέλων, για την υλοποίηση της πορείας των Κ/Ε από σταθμό σε σταθμό, οδηγούνται στο υπομοντέλο των μεταφορέων των Κ/Ε. Σε αυτό οι οντότητες μεταφοράς δεσμεύουν τον αντίστοιχο μεταφορέα και αναλόγως με τον προορισμό του κινούνται προς τον αντίστοιχο σταθμό. Μόλις ολοκληρωθεί η πορεία, σε χρόνο που είναι συνάρτηση της ταχύτητας πορείας, η οντότητα οδηγείται ξανά στο δικό της υπομοντέλο ελέγχου κίνησης. Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται το υπομοντέλο ελέγχου πορείας του εκσκαφέα E2 και στην Εικόνα 5.5 φαίνεται μέρος του υπομοντέλου των μεταφορέων των εκσκαφών. Η σχέση μεταξύ των προαναφερθέντων υπομοντέλων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4.



Εικόνα 5.4 Υπομοντέλο ελέγχου κίνησης εκσκαφών



Εικόνα 5.5 Υπομοντέλο μεταφορέων εκσκαφών



Σχήμα 5.4 Σχέση υπομοντέλων ελέγχου κίνησης και μεταφορέων εκσκαφών

### 5.2.13 Υπομοντέλο προγραμματισμού ετήσιων συντηρήσεων πόρων συστήματος

Ο προγραμματισμός των ετήσιων συντηρήσεων των εκσκαφών και των αποθετών υλοποιείται σε ανεξάρτητο υπομοντέλο. Αυτό αποτελείται από δομές που εξυπηρετούν τη γραμμική διαδρομή των οντοτήτων ελέγχου που δημιουργούνται κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης. Οι οντότητες αναλόγως με τη χρονική στιγμή έναρξης της ετήσιας συντήρησης και τη διάρκεια αυτής δεσμεύουν τον εκσκαφέα ή αποθέτη, αφού κατέχουν

τον υψηλότερο βαθμό προτεραιότητας. Οι γραμμικές δομές των ετήσιων συντηρήσεων διακρίνονται στην Εικόνα 5.6.

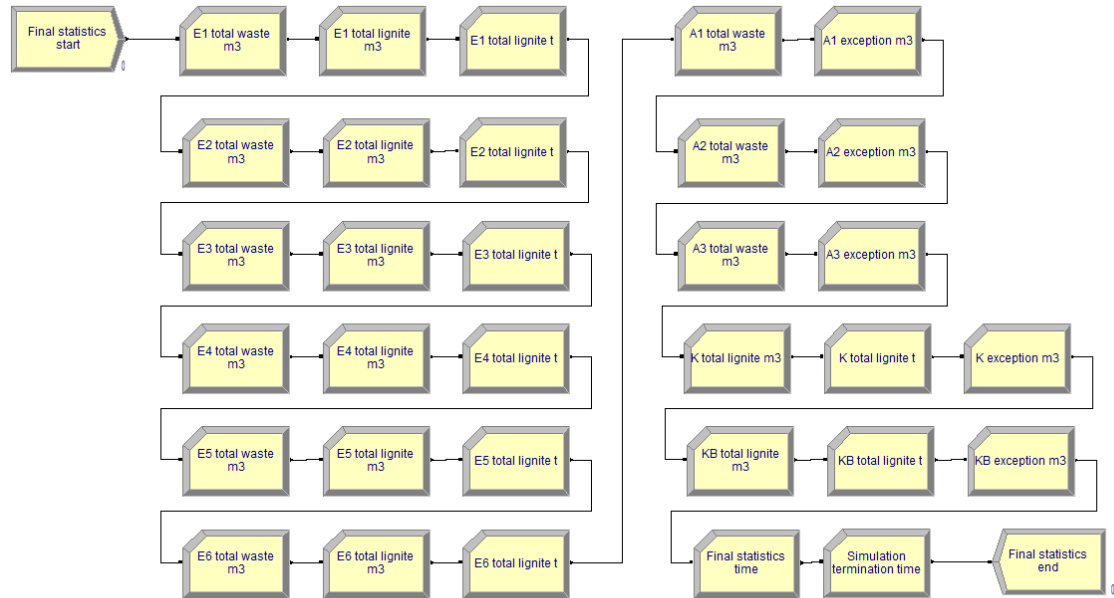


Εικόνα 5.6 Προγραμματισμός ετήσιων συντηρήσεων

#### 5.2.14 Υπομοντέλο συλλογής στατιστικών

Οι μεταβλητές του μοντέλου που παρέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της συγκεκριμένης εργασίας είναι μεταξύ άλλων αυτές που καταγράφουν την παραγωγή του ορυχείου. Συγκεκριμένα τέτοιες μεταβλητές είναι η παραγωγή λιγνίτη (σε t και m<sup>3</sup>) και στείρων (σε m<sup>3</sup>) των εκσκαφών και η απόθεση υλικού από τους αποθέτες. Για την εμφάνιση της παραγωγής στα τελικά αποτελέσματα ακολουθείται τεχνική με την οποία κατά τη λήξη της προσομοίωσης καταγράφονται οι τιμές των επιθυμητών μεταβλητών (record). Για προγραμματιστικούς λόγους η χρονική στιγμή της συλλογής των στατιστικών ρυθμίστηκε ελάχιστα πριν από τη λήξη της προσομοίωσης. Στην Εικόνα 5.7 διακρίνεται η διάταξη που προαναφέρθηκε.





Εικόνα 5.7 Συλλογή τελικών στατιστικών στοιχείων παραγωγής

### 5.2.15 Έλεγχος βλαβών και προγραμματισμένων συντηρήσεων πόρων συστήματος

Η διακοπή και επαναλειτουργία των πόρων του συστήματος εξαιτίας βλαβών αλλά και των προγραμματισμένων συντηρήσεων επιτυγχάνεται με τη χρήση του module δεδομένων, failures. Συγκεκριμένα, σε αυτό ορίζονται η κατηγορία της κατάστασης στην οποία τίθεται ο πόρος, ο χρόνος για τον οποία μένει σε αυτήν (down time) και ο χρόνος μεταξύ εμφάνισης αυτών των καταστάσεων (up time).

## 5.3 Καταγραφή κρατήσεων στο Ορυχείο Καρδιάς

Κατά την παραγωγική διαδικασία των ορυχείων της ΔΕΗ Α.Ε καταγράφονται όλες οι κρατήσεις του εξοπλισμού. Οι καταγραφές αυτές αφορούν μεταξύ άλλων σε πληροφορίες για τον κλάδο στον οποίο σημειώνεται η κράτηση, η κατάσταση λειτουργίας του, η χρονική στιγμή της έναρξης και λήξης της και η αιτιολογία της. Το σύνολο των καταγραφών αποτελεί το αποκαλούμενο «σεντόνι», όρος που αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο καταγράφονταν χειρόγραφα οι αντίστοιχες πληροφορίες πριν τη χρήση ψηφιακών μέσων.

Τα αξιόπιστα αυτά δεδομένα δίνουν μια πραγματική εικόνα της κατάστασης των πόρων του συστήματος παραγωγής κάθε ορυχείου. Η επεξεργασία τους μπορεί να παρέχει ακριβείς πληροφορίες ως προς τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού αλλά και τις ανάγκες

επισκευών και συντηρήσεων. Αυτές οι πληροφορίες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για τον προσδιορισμό των στοχαστικών παραμέτρων προσομοίωσης του συστήματος εξόρυξης – φόρτωσης – μεταφοράς των ορυχείων. Οι προαναφερθείσες παράμετροι διαμορφώνονται είτε ως εμπειρικές κατανομές είτε ως θεωρητικά μοντέλα.

Τα διαθέσιμα δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μελέτη προσομοίωσης στην παρούσα εργασία, αφορούν στις κρατήσεις του εξοπλισμού του Ορυχείου Καρδιάς για το έτος 2006.

#### 5.4 Επεξεργασία κρατήσεων εξοπλισμού Ορυχείου Καρδιάς

Στο «σεντόνι» βρίσκεται πληθώρα πληροφοριών για τις κρατήσεις που σημειώνονται σε κάθε κλάδο.

Το μοντέλο προσομοίωσης είναι δομημένο με τέτοιο τρόπο που απαιτείται η πληροφορία για τη στοχαστική περιγραφή των εξής μεγεθών:

- Του χρόνου για τον οποίο οι αποθέτες και οι εκσκαφείς είναι σε προγραμματισμένη συντήρηση.
- Του χρόνου μεταξύ κάθε προγραμματισμένης συντήρησης των αποθετών και εκσκαφέων.
- Του χρόνου για τον οποίο οι αποθέτες και εκσκαφείς βρίσκονται σε επισκευή απρόβλεπτης βλάβης (TTR: Time To Repair).
- Του χρόνου μεταξύ των εμφανίσεων βλαβών για του αποθέτες και εκσκαφείς (TBF: Time Between Failures).
- Της διάρκειας που οι ΚΕ είναι εκτός λειτουργίας εξαιτίας των ταινιόδρομων τους.
- Το χρόνο μεταξύ των εμφανίσεων βλαβών στους ταινιόδρομους των κλάδων παραγωγής.
- Το χρόνο μεταξύ διαδοχικών αλλαγών στον κόμβο για κάθε κλάδο παραγωγής.
- Την κατανομή του λιγνίτη/στείρου στους προορισμούς.
- Την αναλογία λιγνίτη/στείων στα block του γεωλογικού μοντέλου του κοιτάσματος.

Στο μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιούνται συνολικά 99 στατιστικές κατανομές. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται συγκεντρωτικά αυτές οι κατανομές με την ονομασία τους. Επίσης χαρακτηρίζονται ως συνεχείς ή διακριτές. Όσες φέρουν αστερίσκο είναι οι κατανομές για

τις οποίες θα διερευνηθούν διαφορετικές κατηγορίες κατανομών. Αυτές είναι οι εκφράσεις που περιγράφουν τη διάρκεια γεγονότων (event duration) και τη διάρκεια μεταξύ εμφανίσεών τους τους (interarrival times). Ο όρος  $n$  εκπροσωπεί τον αριθμό των εκσκαφών (για  $n = 1 \dots 6$ ) και αποθετών στείρων (για  $n = 1 \dots 3$ ) στις αντίστοιχες εκφράσεις. Ο όρος  $i$  διαφοροποιεί τις εκφράσεις που αφορούν στον λόγο λιγνίτη/στείρων. Οι εκφράσεις αυτές προκύπτουν από το υπάρχον γεωλογικό μοντέλο του κοιτάσματος.

Πίνακας 5.2 Ονομασία εκφράσεων κατανομών (expressions)

<b>Κατανομές Κ/Ε</b>		
DISTR_En BC_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_En BC_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_En BWE_maintenance_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_En BWE_maintenance_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_En BWE_non maint_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_En BWE_non maint_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_En hub_interchange time	Συνεχής	*
DISTR_En_hub_control_LIGNITE	Διακριτή	
DISTR_En_hub_control_WASTE	Διακριτή	
DISTR_En_material_Block i	Διακριτή	
DISTR_En_bucket_efficiency	Συνεχής	
<b>Κατανομές Αποθετών</b>		
DISTR_An_maintenance_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_An_maintenance_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_An_non maint_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_An_non maint_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_K_maintenance_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_K_maintenance_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_K_non maint_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_K_non maint_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_KB_maintenance_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_KB_maintenance_UP_time	Συνεχής	*
DISTR_KB_non maint_DOWN_time	Συνεχής	*
DISTR_KB_non maint_UP_time	Συνεχής	*
<b>Κατανομή μοναδιαίου βάρους λιγνίτη</b>		
DISTR_LigniteUnitWeight_tpm3	Συνεχής	

Οι πληροφορίες που απαιτούνται από τα δεδομένα των καταγραφών, ώστε να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή εμπειρικών και θεωρητικών κατανομών που περιγράφουν τη διάρκεια τους, είναι:

- Ο κλάδος υπό κράτηση
- Η κατάσταση λειτουργίας του κλάδου
- Η ομάδα και αιτιολογία κράτησης
- Η ημερομηνία και ώρα έναρξης και λήξης κάθε κράτησης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναλύεται στα εξής βήματα:

- I. Διάκριση των κρατήσεων ανά κλάδο
- II. Διάκριση ανά αιτιολογία κράτησης και μη λειτουργίας για κάθε κλάδο
- III. Προσδιορισμός διάρκειας κράτησης και διάρκεια μεταξύ της εμφάνισης όλων των διαδοχικών κρατήσεων
- IV. Απόρριψη μη αποδεκτών τιμών
- V. Υπολογισμός μεγεθών περιγραφικής στατιστικής (summary statistics)
- VI. Υπολογισμός εκατοστημορίων
- VII. Διαμόρφωση εμπειρικών κατανομών
- VIII. Δημιουργία αρχείων κάθε συνόλου δεδομένων
- IX. Υπολογισμός παραμέτρων θεωρητικών κατανομών
- X. Έλεγχος της καταλληλότητας της προσαρμογής των θεωρητικών κατανομών στα δεδομένα.
- XI. Τελική διαμόρφωση θεωρητικών κατανομών

#### 5.4.1 Διάκριση κρατήσεων ανά κλάδο

Το «σεντόνι» που χρησιμοποιήθηκε και είναι η αφετηρία για τον προσδιορισμό των δεδομένων συγκροτείται από 189364 καταχωρήσεις και διαθέτει κατηγοριοποιημένες πληροφορίες στις εξής στήλες:

- Κλάδος κράτησης
- Κατάσταση λειτουργίας
- Ομάδα κράτησης
- Αιτιολογία κράτησης
- Έναρξη κράτησης

- Λήξη κράτησης
- Διάρκεια κράτησης

Στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζεται η ψηφιακή μορφή του «σεντονιού» καταγραφών κρατήσεων για το έτος 2006.

A	B	C	D	E	F	G
Κλάδος	Κατάσταση Λειτουργίας	Ομάδα Κράτησης	Αιτιολογία Κράτησης	Έναρξη Κράτησης	Λήξη Κράτησης	Διάρκεια Κράτησης
E4	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Λιγνίτη (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:00	0:10	10
E1	2	ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Αναμονή-Λόγω Α3 (Ε-ΕΟΚ)	01/01/2006 00:04	0:22	18
A1	1	ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Απόθεση Στείων (Α/ΕΟΚ)	1/1/2006 0:08	0:32	24
A2	1	ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Απόθεση Στείων (Α/ΕΟΚ)	1/1/2006 0:08	2:56	168
E3	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:08	0:12	4
E5	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:08	0:32	24
E4	0	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Αλλαγή Πακέτου (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:10	0:18	8
E6	0	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Καθαρισμός Τ.Καδοτροχού (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:10	0:44	34
ΤΕΦΡΑ	1	ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Απόθεση Στείων (Α/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:10	2:56	166
E3	0	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Αλλαγή προς Τ.Κ (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:12	0:16	4
E3	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Λιγνίτη (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:16	0:28	12
E4	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:18	0:40	22
A3	1	ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Απόθεση Στείων (Α/ΕΟΚ)	1/1/2006 0:22	1:06	44
E1	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:22	1:06	44
E3	0	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Αλλαγή προς Τ.20 (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:28	0:32	4
A1	2	ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Αναμονή - Έλλειψη Υλικών (Α/ΕΟΚ)	1/1/2006 0:32	0:40	8
E3	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:32	1:04	32
E5	0	ΤΑΙΝΙΟΔΡΟΜΟΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Υπερένταση Λόγω Φορτίου (Τ/Δ-ΕΟΚ)	01/01/2006 00:32	0:40	8
A1	1	ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Απόθεση Στείων (Α/ΕΟΚ)	1/1/2006 0:40	1:00	20
E4	0	ΤΑΙΝΙΟΔΡΟΜΟΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Υπερένταση Λόγω Φορτίου (Τ/Δ-ΕΟΚ)	01/01/2006 00:40	0:46	6
E5	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:40	1:00	20
E6	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:44	0:48	4
E4	1	ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εκσκαφή σε Στείρα (Ε/ΕΟΚ)	01/01/2006 00:46	0:50	4
E6	0	ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ	Βλάβη Ηλεκτρολογική (ΗΟΚ)	01/01/2006 00:48	0:58	10
E4	0	ΤΑΙΝΙΟΔΡΟΜΟΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ	Εμφράξη Κεφαλής (Τ/Δ-ΕΟΚ)	01/01/2006 00:50	1:04	14

Εικόνα 5.8 Η ψηφιακή μορφή του «σεντονιού» καταγραφών κρατήσεων έτους 2006

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Excel, η ηλεκτρονική βάση δεδομένων διαχωρίζεται μέσω ταξινόμησης των καταχωρήσεων ανά κλάδο. Στη συνέχεια δημιουργούνται ξεχωριστά αρχεία για κάθε κλάδο.

Οι κλάδοι που αναφέρονται στο «σεντόνι» είναι οι κλάδοι των συνολικά 7 καδοφόρων εκσκαφέων, οι κλάδοι των συνολικά 5 αποθετών του συστήματος και ο κλάδος με την ονομασία ΤΕΦΡΑ που μεταφέρει την παραγόμενη στον ΑΗΣ τέφρα σε ξεχωριστό κόμβο, όπου τροφοδοτεί τους κλάδους απόθεσης στείων. Σημειώνεται και η ύπαρξη καταγραφών κλάδου Ε8. Ο εκσκαφέας Ε8 ταυτίζεται με τον Ε7 και η διαφοροποίηση έγκειται σε λειτουργία του σε άλλη βαθμίδα εκμετάλλευσης.

Όπως έχει προαναφερθεί το μοντέλο προσομοίωσης συμπεριλαμβάνει 6 κλάδους παραγωγής και 5 κλάδους απόθεσης, συνεπώς από την περαιτέρω επεξεργασία του «σεντονιού» εξαιρούνται οι καταχωρήσεις που αφορούν στους κλάδους Ε7, Ε8 και ΤΕΦΡΑ.

#### 5.4.2 Διάκριση ανά αιτιολογία κράτησης και μη λειτουργίας

Τα αρχεία που δημιουργήθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο και αφορούν σε όλες τις κρατήσεις κάθε κλάδου, στη συνέχεια υφίστανται επεξεργασία με σκοπό τη διάκριση με βάση την αιτιολογία κράτησης.

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν αρχεία για κάθε κλάδο που εμπεριέχουν τις επιθυμητές κρατήσεις για τα συμβάντα που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2.2.

Για τους κλάδους απόθεσης δημιουργούνται φύλλα εργασίας που αποτελούνται από τις κρατήσεις λόγω βλαβών, λόγω προγραμματισμένης συντήρησης και λόγω ετήσιας συντήρησης.

Για τους κλάδους των εκσκαφών σε συνδυασμό με τα παραπάνω δημιουργούνται φύλλα εργασίας με τις κρατήσεις κατάστασης μη λειτουργίας εξαιτίας βλάβης των ταινιοδρόμων και εξαιτίας αλλαγής στον κόμβο. Από το τελευταίο αρχείο καθορίζεται στατιστικά, η κατανομή του υλικού κάθε εκσκαφέα προς τους αποθέτες, ξεχωριστά για λιγνίτη και στείρα.

#### **5.4.3 Προσδιορισμός διάρκειας συμβάντων και χρόνων μεταξύ της εμφάνισης των διαδοχικών συμβάντων**

Για τον προσδιορισμό των κατανομών που εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης απαιτείται η ύπαρξη συνόλων δεδομένων για τη διάρκεια των συμβάντων και το χρόνο μεταξύ της εμφάνισης αυτών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των βλαβών αναζητούνται τιμές για τη διάρκεια της επισκευής του εξοπλισμού (TTR) και το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών βλαβών (TBF).

Η διάρκεια των κρατήσεων είναι διαθέσιμη από το αρχικό «σεντόνι». Στην περίπτωση των χρόνων μεταξύ των συμβάντων αυτοί προσδιορίζονται με την εξής διαδικασία.

Προστίθεται στήλη όπου υπολογίζεται ο χρόνος σε λεπτά που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης των διαδοχικών συμβάντων. Στη συνέχεια σε ξεχωριστή στήλη αφαιρείται ο χρόνος της διάρκειας της προηγούμενης κράτησης. Συνεπώς προκύπτει ο καθαρός χρόνος μεταξύ εμφάνισης των γεγονότων.

Για τις περιπτώσεις των ετήσιων συντηρήσεων εκσκαφών και αποθετών η αντιμετώπιση τους είναι ντετερμινιστικής φύσεως αφού σημειώνονται μία μόνη φορά, με γνωστή έναρξη και διάρκεια.

#### 5.4.4 Απόρριψη μη αποδεκτών τιμών

Πολλά από τα συμβάντα στην περίπτωση των βλαβών, δηλαδή οι επισκευές, εξελίσσονται ταυτόχρονα. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια να προκύπτουν με την προαναφερθείσα μέθοδο υπολογισμού αρνητικές τιμές για τους αντίστοιχους χρόνους λειτουργίας.

Επίσης, επειδή στα αρχεία διάκρισης ανά αιτιολογία κράτησης η ετήσια συντήρηση δεν εμπεριέχεται παρά μόνο σε ξεχωριστό φύλλο εργασίας, εμφανίζεται μία τιμή για χρόνο λειτουργίας που δεν είναι πραγματική, αλλά αντιστοιχεί στη διάρκεια της ετήσιας συντήρησης. Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούνται τιμές μεγάλων χρόνων κατά τις οποίες ο εξοπλισμός βρισκόταν υπό επισκευή πολλών ημερών εξαιτίας σοβαρής βλάβης. Σημαντικά χρονικά διαστήματα εκτός λειτουργίας εμφάνισαν οι εκσκαφείς E1 και E5. Στον Πίνακα 5.3 αναγράφονται συνολικά οι ετήσιες συντηρήσεις και κρατήσεις μεγάλης συνολικής διάρκειας.

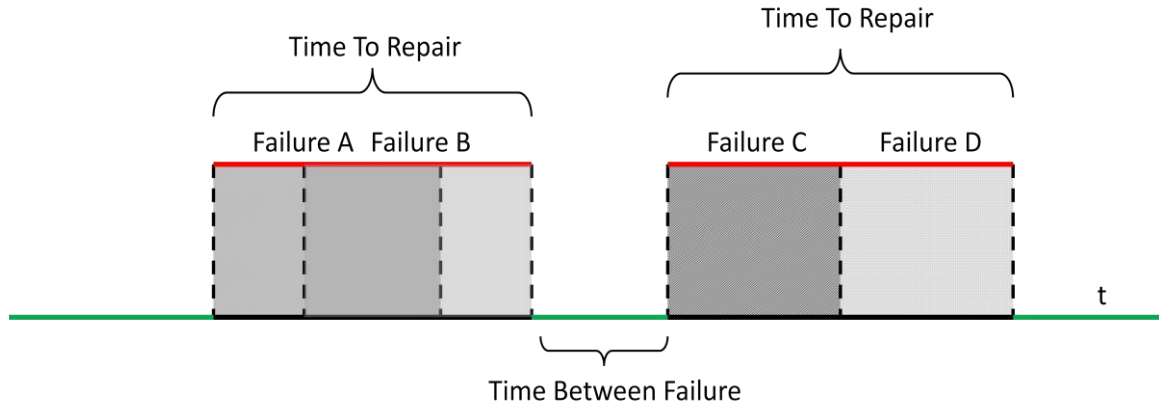
Οι παραπάνω χρόνοι είναι αναγκαίο να εξαιρεθούν από τη μελέτη και ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με δημιουργία στήλης που απορρίπτει τέτοιες τιμές (αρνητικές και ακραίες).

Για να καταστεί πιο ορθή η διαδικασία στις περιπτώσεις ταυτόχρονων συμβάντων λαμβάνεται υπόψη ο συνολικός χρόνος κράτησης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5 αριστερά.

Έλεγχος τιμών απαιτούν και τα δεδομένα αλλαγών στον κόμβο με την ίδια λογική που αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι, εξαιρέθηκαν όλες οι τιμές λειτουργίας που ξεπερνούν τη μία ημέρα σε διάρκεια. Σε αυτές τις περιπτώσεις σημειώνονται κρατήσεις που δεν συνάδουν με την τυπική κατάσταση εκσκαφής και συνοδευόμενων αναμονών. Ακόμα κατά τις περιόδους αυτές πραγματοποιείται η ετήσια και προγραμματισμένες συντηρήσεις και επισκευή σοβαρών βλαβών.

Η προσαρμογή κατανομών, εμπειρικών και θεωρητικών, με την παραπάνω μέθοδο οδήγησε σε προβληματική αντιμετώπιση τους από το λογισμικό της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε προβληματική αρχικοποίηση της προσομοίωσης. Ο λόγος ήταν η ύπαρξη πολλών μηδενικών τιμών για χρόνους λειτουργίας στα δεδομένα, με αποτέλεσμα να μην προσομοιώνεται ορθά η εναλλαγή των καταστάσεων των πόρων. Το παραπάνω γεγονός εκδηλώνει διαδοχικές κρατήσεις στους κλάδους εξαιτίας είτε αλλαγής της βάρδιας είτε την αλλαγή της αιτιολογίας της κράτησης.

Η διαδικασία απόρριψης τιμών επαναλήφθηκε έτσι ώστε ο προσδιορισμός των κατανομών που ακολουθεί να καταστεί ορθότερος. Συνεπώς, επιπρόσθετα με τα προαναφερόμενα κριτήρια απορρίφθηκαν όλες οι τιμές μηδενικής διάρκειας και τα διαδοχικά γεγονότα που τις δημιουργούν συνδυάστηκαν ώστε να προκύψει ένας χρόνος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5 δεξιά.



Σχήμα 5.5 Επικαλυπτόμενα και διαδοχικά γεγονότα και η αντιμετώπιση τους

Πίνακας 5.3 Ετήσιες συντηρήσεις και κρατήσεις μεγάλης συνολικής διάρκειας

Κλάδος				Αιτιολογία κράτησης
A1	10/5/2006	-	27/5/2006	Ετήσια συντήρηση
A2	14/3/2006	-	1/4/2006	Ετήσια συντήρηση
A3	21/6/2006	-	8/7/2006	Ετήσια συντήρηση
K	-----			
KB	-----			
E1	13/1/2006	-	22/1/2006	Βλάβη καδοτροχού
E1	7/5/2006	-	1/6/2006	Μηχανολογική βλάβη
E1	3/10/2006	-	31/12/2006	Ετήσια συντήρηση
E2	13/6/2006	-	26/6/2004	Ετήσια συντήρηση
E3	13/9/2006	-	22/9/2006	Ετήσια συντήρηση
E4	12/7/2006	-	21/7/2006	Ετήσια συντήρηση
E5	9/3/2006	-	4/4/2006	Ετήσια συντήρηση
E5	22/9/2006	-	18/10/2006	Βλάβη καδοτροχού
E5	24/11/2006	-	2/12/2006	Βλάβη καδοτροχού
E6	-----			

Στην Εικόνα 5.9 εμφανίζονται οι πρόσθετες στήλες που διαμορφώθηκαν για την απόρριψη των μη αποδεκτών τιμών.



Q2    =IF(AND(P4<>"";P5<>"";P6<>"");O2+P4+P5+P6;IF(AND(P4<>"";P5<>"");O2+P4+P5;IF(P4<>"";O2+P4;O2)))

E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Έναρξη Κράτησης	Λήξη Κράτησης	Διάρκεια Κράτησης	ddays	dhours	dminutes	dt	uptime	uptime negative & zero check	event overlap	downtime after combining overlapping events	sequential downtime events	final downtime	
01/01/2006 01:06	1:18	12								12		12	
01/01/2006 01:34	2:04	30	0	0	28	28	16	16	none	30		30	
01/01/2006 03:56	4:16	20	0	2	22	142	112	112	none	20		20	
01/01/2006 04:50	4:58	8	0	0	54	54	34	34	none	8		8	
01/01/2006 23:50	0:04	14	0	19	0	1140	1132	1132	none	14		14	
02/01/2006 14:10	14:30	20	0	14	20	860	846	846	none	110		110	
02/01/2006 14:30	16:00	90	0	0	20	20	0		110				
02/01/2006 23:56	0:10	14	0	9	26	566	476	476	none	14		14	
03/01/2006 22:36	23:50	74	0	22	40	1360	1346	1346	none	144		144	
03/01/2006 23:50	1:00	70	0	1	14	74	0		144				
04/01/2006 07:30	7:54	24	0	7	40	460	390	390	none	24		24	
04/01/2006 10:00	10:22	22	0	2	30	150	126	126	none	22		22	
04/01/2006 10:42	10:54	12	0	0	42	42	20	20	none	18		38	
04/01/2006 10:54	11:00	6	0	0	12	12	0		18				
04/01/2006 11:00	11:20	20	0	0	6	6	0		26		20		
04/01/2006 11:30	11:40	10	0	0	30	30	10	10	none	10		10	
04/01/2006 12:08	12:16	8	0	0	38	38	28	28	none	8		8	
04/01/2006 17:14	17:36	22	0	5	6	306	298	298	none	22		22	
04/01/2006 18:50	19:50	60	0	1	36	96	74	74	none	110		110	
04/01/2006 19:50	20:40	50	0	1	0	60	0		110				
04/01/2006 22:58	23:30	32	0	3	8	188	138	138	none	86		86	
04/01/2006 23:30	0:24	54	0	0	32	32	0		86				
05/01/2006 06:40	8:24	104	0	7	10	430	376	376	none	104		104	

Εικόνα 5.9 Καθορισμός συνόλων δεδομένων με τη χρήση βοηθητικών στηλών

#### 5.4.5 Περιγραφική στατιστική

Για κάθε σύνολο δεδομένων υπολογίσθηκαν μεγέθη της περιγραφικής στατιστικής (summary statistics) όπως το πλήθος των δεδομένων, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας. Πέρα από τη γενική εικόνα που προσφέρουν χρησιμοποιήθηκαν ως έλεγχος για το αν τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό προσαρμογής θεωρητικών κατανομών είναι ορθά, όταν γίνονται οι ίδιοι υπολογισμοί.

#### 5.4.6 Υπολογισμός εκατοστημορίων - Διαμόρφωση εμπειρικών κατανομών

Μαζί με τον υπολογισμό των μεγεθών περιγραφικής στατιστικής των συνόλων δεδομένων, προσδιορίζονται και τα εκατοστημόρια που επιλέχθηκαν για τη μελέτη. Για τη διαμόρφωση των εμπειρικών κατανομών, σε κάθε βιβλίο εργασίας (excel workbook) για όλους τους κλάδους δημιουργήθηκε πρόσθετο, όμοιο, φύλλο εργασίας. Σε αυτό το φύλλο εργασίας με τη χρήση συναρτήσεων ένωσης συμβολοσειρών προκύπτουν με δυναμικό προγραμματιστικό τρόπο οι εμπειρικές κατανομές σε μορφή κατάλληλη για ανάγνωση από το Arena. Σημειώνεται ότι η μονάδα μέτρησης του χρόνου που χρησιμοποιείται στις καταγραφές των κρατήσεων στο «σεντόνι», είναι το λεπτό. Για αυτόν το λόγο οι κατανομές φέρουν και το πρόθεμα ANINT, το οποίο αντιστοιχεί στη συνάρτηση

στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο όταν παράγονται τυχαίες τιμές κατά την προσομοίωση.

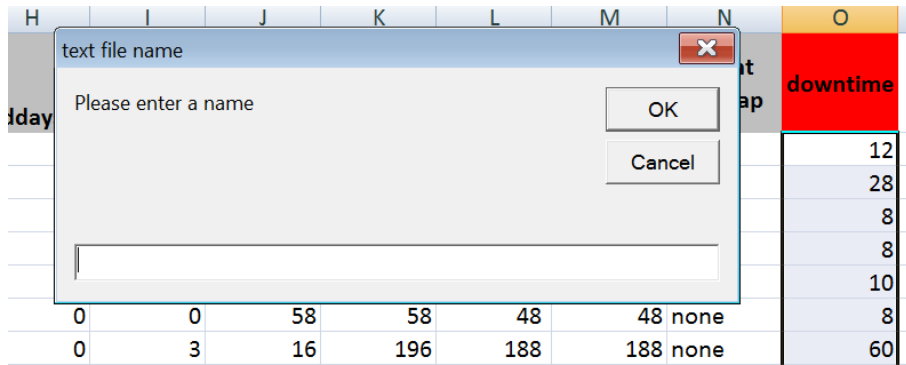
Ως βασική εμπειρική κατανομή επιλέχθηκε αυτή που συγκροτείται από μεγάλο αριθμό εκατοστημορίων. Συγκεκριμένα περιέχει κατά σειρά τους όρους: ελάχιστη τιμή, 10°, 25°, 50°, 75°, 90°, 95°, 99° εκατοστημόριο και μέγιστη τιμή. Στη συνέχεια από αυτήν την κατανομή σταδιακά αφαιρούνται όροι και προκύπτουν απλούστερες κατανομές, με μικρότερο βάθος ανάλυσης. Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι κατανομές που διαμορφώθηκαν για την ανάγνωση τους από το Arena. Ο όρος <stream> ορίζει διαφορετική, μοναδική σειρά ψευδοτυχαίων αριθμών για κάθε κλάδο του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η αλληλεπίδραση των κλάδων. Συγκεκριμένα, η παραγωγή ψευδοτυχαίων αριθμών για ένα κλάδο δεν σχετίζεται με την παραγωγή ψευδοτυχαίων αριθμών που αφορούν άλλους κλάδους. Οι τιμές value ισούνται με τις τιμές των εκατοστημορίων μειωμένες κατά την ελάχιστη τιμή του συνόλου δεδομένων (min).

Πίνακας 5.4 Συγκρότηση εμπειρικών κατανομών

<b>ANINT(min+CONT(0.1,value,0.25,value,0.5,value,0.75,value,0.9,value,0.95,value,0.99,value,1,max,&lt;stream&gt;))</b>
<b>ANINT(min+CONT(0.1,value,0.25,value,0.5,value,0.75,value,0.9,value,1,max,&lt;stream&gt;))</b>
<b>ANINT(min+CONT(0.25,value,0.5,value,0.75,value,1,max,&lt;stream&gt;))</b>
<b>ANINT(min+CONT(0.5,value,1,max,&lt;stream&gt;))</b>
<b>ANINT(min+CONT(0.99,value,1,max,&lt;stream&gt;))</b>
<b>ANINT(min+CONT(0.5,value,0.99,value,1,max,&lt;stream&gt;))</b>

#### 5.4.7 Δημιουργία αρχείων κειμένου με τα δεδομένα

Για την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό προσαρμογής θεωρητικών κατανομών προηγήθηκε η δημιουργία ξεχωριστών αρχείων κειμένου (\*.txt) για κάθε σύνολο δεδομένων. Για τη διευκόλυνση αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας και την αποφυγή λαθών αναπτύχθηκε μακροεντολή VBA, η οποία σύμφωνα με την επιλογή ενός εύρους (range) κελιών εξάγει τις τιμές αυτών σε αρχείο κειμένου με την επιθυμητή ονομασία στον ίδιο φάκελο με το αρχείο excel. Στην Εικόνα 5.10 εμφανίζεται η μακροεντολή δημιουργίας αρχείων κειμένου.



Εικόνα 5.10 Η μακροεντολή δημιουργίας αρχείων κειμένου

#### 5.4.8 Υπολογισμός παραμέτρων θεωρητικών κατανομών

Η προσαρμογή θεωρητικών κατανομών στα σύνολα των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού ExpertFit. Το εν λόγω λογισμικό επιτρέπει τον αυτόματο και ακριβή προσδιορισμό της θεωρητικής κατανομής πιθανότητας που αντιπροσωπεύει καταλληλότερα ένα σύνολο δεδομένων. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα πρόβλεψης τυχαίων συμπεριφορών χωρίς την ύπαρξη δεδομένων. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση διακριτών γεγονότων και για αυτόν το λόγο το πρόγραμμα προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στη μορφή που απαιτούν τα γνωστότερα λογισμικά προσομοίωσης, μεταξύ των οποίων είναι και το Arena.

Με στόχο την ακριβέστερη προσαρμογή των θεωρητικών κατανομών στα δεδομένα (raw data) ακολουθήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις δύο προσεγγίσεις.

Στην πρώτη μέθοδο προσαρμόστηκαν οι τρεις θεωρητικές κατανομές πλήρως αυτοματοποιημένα από το ίδιο το λογισμικό. Το λογισμικό επιλέγει την πλησιέστερη επιθυμητή κατανομή υπολογίζοντας τις τρεις κύριες παραμέτρους, δηλαδή την παράμετρο θέσης (location parameter), την παράμετρο κλίμακας (scale parameter) και την παράμετρο σχήματος (shape parameter).

Στη δεύτερη μέθοδο υπολογίστηκαν αυτόματα από τα δεδομένα μόνο οι δυο τελευταίες παράμετροι. Αντιθέτως, η παράμετρος θέσης συμπληρώθηκε ως δεδομένο και ταυτίζεται με την ελάχιστη σημειωθείσα τιμή στο σύνολο καταγραφών. Σε κάθε περίπτωση, στο μέγεθος αυτό δόθηκε τιμή οριακά μικρότερη από την τιμή της ελάχιστης μέτρησης, ώστε να γίνει αποδεκτή από το λογισμικό.

Το πιο μέθοδος προσφέρει την καταλληλότερη προσαρμογή δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό. Για το λόγο αυτό για τη διαδικασία της προσομοίωσης λαμβάνονται οι κατανομές

που εκπροσωπούν καταλληλότερα τα δεδομένα, σύμφωνα με την κατάταξη του προγράμματος ExpertFit.

Η αυτόματη διαμόρφωση που προσφέρει το λογισμικό ExpertFit, ώστε οι εκφράσεις να αναγνωρίζονται από το Arena, είναι της μορφής:

$$\gamma + G\text{AMM}(\beta, \alpha, < stream >)$$

$$\gamma + LOGN(\text{LogMean}, \text{LogStd}, < stream >)$$

$$\gamma + WEIB(\beta, \alpha, < stream >)$$

Όπου  $\alpha$ : η παράμετρος σχήματος

$\beta$ : η παράμετρος κλίμακας

$\gamma$ : η παράμετρος θέσης

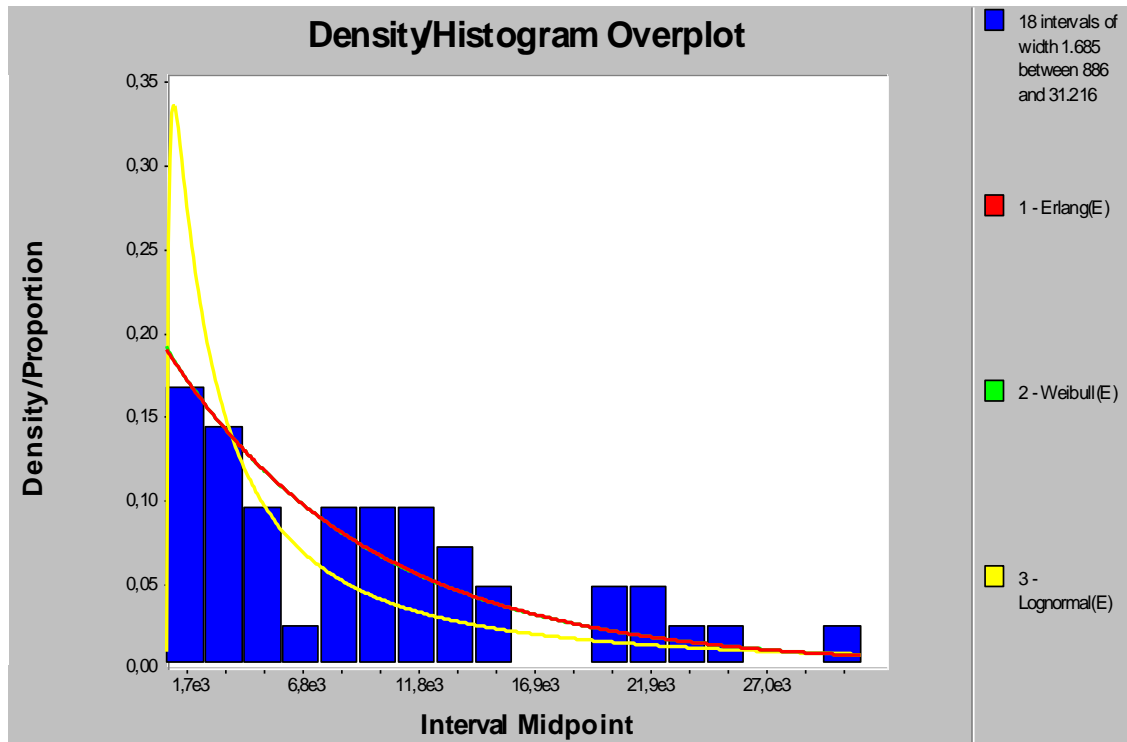
stream: η σειρά ψευδοτυχαίων αριθμών

LogMean και LogStd: οι παράμετροι της κατανομής lognormal

Όπως και στην περίπτωση των εμπειρικών κατανομών προστέθηκε στις εκφράσεις η συνάρτηση ANINT( ), η οποία μετατρέπει το κάθε αποτέλεσμα που προέκυψε από την γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών και την αντίστοιχη κατανομή στον κοντινότερο ακέραιο αριθμό. Η πρόσθετη διαμόρφωση επιτεύχθηκε με τη χρήση της συνάρτησης CONCATENATE στο Excel με την οποία συνδέονται συμβολοσειρές σε επιθυμητή διάταξη. Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζονται το ιστόγραμμα του συνόλου δεδομένων για την κατανομή DISTR\_E4 BWE\_maintenance\_UP\_time και οι προσαρμογές θεωρητικών μοντέλων.

#### 5.4.9 Έλεγχος της προσαρμογής των θεωρητικών κατανομών

Το λογισμικό ExpertFit προσφέρει ελέγχους καταλληλότητας των προσαρμογών που εκτελεί αλλά και την οπτική παρουσίαση αυτών μέσα από μια σειρά διαγραμμάτων όπως είναι τα P-P Plots και συγκριτικά ιστογράμματα. Τα P-P Plots είναι γραφικές παραστάσεις με τις οποίες συγκρίνεται ένα θεωρητικό μοντέλο και κατανομή του δείγματος, μετά από κατάλληλο μετασχηματισμό των συναρτήσεων αθροιστικής κατανομής τους. Στο πλαίσιο της εργασίας δεν δίνεται μεγάλη έμφαση στα αποτελέσματα των ελέγχων.

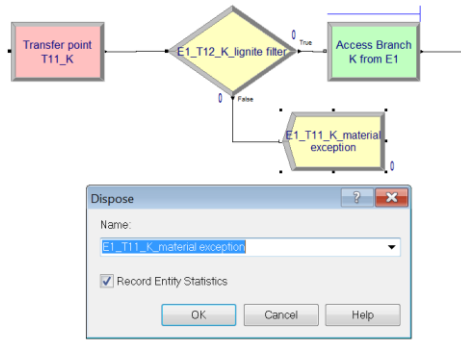


Σχήμα 5.6 Ιστόγραμμα συνόλου δεδομένων για την κατανομή *DISTR\_E4 BWE\_maintenance\_UP\_time* και προσαρμογές θεωρητικών μοντέλων

## 5.5 Επαλήθευση του μοντέλου – Verification

Ένα από τα βήματα που ακολουθεί την ανάπτυξη του μοντέλου σε μία προσομοίωση είναι η διαπίστωση της ορθότητάς του από προγραμματιστική σκοπιά. Για αυτόν το σκοπό πέρα από ελέγχους της σύνταξης και δομής (check model) που προσφέρει το Arena, προστέθηκαν πλαίσια που κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης με ενεργοποιημένη τη δυναμική οπτικοποίηση απεικονίζουν τις τρέχουσες τιμές μεταβλητών κατάστασης. Τα πλαίσια αυτά διακρίνονται στην Εικόνα 5.12. Επίσης, η οπτικοποίηση αυτή καθεαυτή εξυπηρετεί στη διαδικασία εντοπισμού εσφαλμένων ρυθμίσεων. Τέλος, στα modules που διαχωρίζουν τις οντότητες ως προς το είδος ή τα χαρακτηριστικά τους έχει προστεθεί διαδρομή για τυχόν εξαιρέσεις (excerptions), οι οποίες καταγράφονται στα αποτελέσματα και υποδηλώνουν την ύπαρξη λανθασμένης συμπεριφοράς του μοντέλου. Η χρήση των module dispose για την καταγραφή εξαιρέσεων φαίνεται στην Εικόνα 5.11.

Τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών εκτελέσεων, που πραγματοποιήθηκαν πριν από τις τελικές αναλύσεις, αποτέλεσαν εργαλείο για την εύρεση σφαλμάτων στη δομή του μοντέλου, τα οποία στη συνέχεια διορθώθηκαν (debugging process).



Εικόνα 5.11 Η χρήση module dispose για την καταγραφή εξαιρέσεων



Εικόνα 5.12 Η προβολή τιμών μεταβλητών κατάστασης

## 6 ΕΚΤΕΛΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 6.1 Κατηγορίες κατανομών

Στόχος της εργασίας είναι, σε συνδυασμό με τη δημιουργία ενός επαρκώς ρεαλιστικού μοντέλου προσομοίωσης του ορυχείου Καρδιάς, ο προσδιορισμός της κατηγορίας κατανομής που περιγράφει με τον καλύτερο τρόπο τη διάρκεια των συμβάντων που προσομοιώνονται στο μοντέλο του λιγνιτωρυχείου και τη διάρκεια μεταξύ διαδοχικών εμφανίσεων τους. Για το λόγο αυτό απαιτήθηκαν συνολικά εννέα (9) διαφορετικές ομάδες εκτελέσεων (προσομοιώσεις) του μοντέλου.

Οι έξι προσομοιώσεις, πραγματοποιούνται με τη χρήση εμπειρικών κατανομών. Στην κατηγορία αυτή εξετάζεται συγκεκριμένα η επίδραση της σταδιακής απλοποίησης μιας σύνθετης εμπειρικής κατανομής μέχρι την μετάπτωσή της σε τριγωνική κατανομή. Μια σύνθετη εμπειρική κατανομή ορίζεται ως αυτή που συγκροτείται από μεγάλο αριθμό εκατοστημορίων.

Επίσης πραγματοποιούνται τρεις πρόσθετες προσομοιώσεις με θεωρητικές κατανομές για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών εισόδου (input variables). Οι εν λόγω θεωρητικές κατανομές είναι η Erlang, η Lognormal (λογαριθμοκανονική) και η Weibull, των οποίων πεδίο εφαρμογής είναι και η περιγραφή της διάρκειας μιας διεργασίας, αλλά και ο χρόνος εμφάνισης αστοχιών εξαρτημάτων και βλαβών εξοπλισμού.

### 6.2 Εισαγωγή των κατανομών στο μοντέλο

Η χρήση κατανομών από το Arena για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών εισόδου απαιτεί την καταγραφή τους σε συγκεκριμένες μορφές σχέσεων. Οι σχέσεις (expressions) που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση του Ορυχείου Καρδιάς είναι στο σύνολο 62. Εξαιτίας των πολλαπλών αναλύσεων που πραγματοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία κρίθηκε αναγκαία η χρήση μακροεντολής από την ενσωματωμένη Visual Basic for Applications για την εξοικονόμηση χρόνου αλλά και για την αποφυγή τυπογραφικών λαθών κατά την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Η εκτέλεση της εντολής ανοίγει το αρχείο Excel, το οποίο περιέχει συγκεντρωμένες τις εκφράσεις σε μορφή κατάλληλη για

ανάγνωση από το Arena, και ανανεώνει αυτόματα όλες τις τιμές των σχετικών κατανομών στο μοντέλο προσομοίωσης σύμφωνα με την επιλογή μιας κατηγορίας κατανομών. Στην Εικόνα 6.1 διακρίνονται οι φόρμες επιλογής κατηγορίας και τύπου κατανομής κατά την εκτέλεση της μακροεντολής.

The screenshot shows the 'Expression - Advanced Process' window in Arena. It contains a table with the following columns: Name, R, C, Data Type, F, and Expression Values. The table lists 24 distribution parameters, all with a 'Native' data type and '1 rows' in the Expression Values column. Two dialog boxes are overlaid on the table:

- Input Data type:** A dialog box with two radio buttons: 'Empirical distribution' (unselected) and 'Theoretical distribution' (selected). It has a 'next' button.
- Theoretical Distribution Type:** A dialog box with three radio buttons: 'Erlang' (unselected), 'Lognormal' (unselected), and 'Weibull' (selected). It has 'Back' and 'Load' buttons.

	Name	R	C	Data Type	F	Expression Values
1	DISTR_E2_material_40_640			Native		1 rows
2	DISTR_E2_material_680_1280			Native		1 rows
3	DISTR_E2_bucket_efficiency			Native		1 rows
4	DISTR_E2_hub_control_LIGNITE			Native		1 rows
5	DISTR_E2_hub_control_WASTE			Native		1 rows
6	DISTR_A1_non maint_UP_time			Native		1 rows
7	DISTR_A1_non maint_DOWN_time			Native		1 rows
8	DISTR_A2_non maint_UP_time			Native		1 rows
9	DISTR_A2_non maint_DOWN_time			Native		1 rows
10	DISTR_A3_non maint_UP_time			Native		1 rows
11	DISTR_A3_non maint_DOWN_time			Native		1 rows
12	DISTR_K_non maint_UP_time			Native		1 rows
13	DISTR_K_non maint_DOWN_time			Native		1 rows
14	DISTR_KB_non maint_UP_time			Native		1 rows
15	DISTR_KB_non maint_DOWN_time			Native		1 rows
16	DISTR_A1_maintenance_UP_time			Native		1 rows
17	DISTR_A1_maintenance_DOWN_time			Native		1 rows
18	DISTR_LigniteUnitWeight_tpm3			Native		1 rows
19	DISTR_E2 BC_UP_time			Native		1 rows
20	DISTR_E2 BC_DOWN_time			Native		1 rows
21	DISTR_A2_maintenance_UP_time			Native		1 rows
22	DISTR_A2_maintenance_DOWN_time			Native		1 rows
23	DISTR_A3_maintenance_UP_time			Native		1 rows
24	DISTR_A3_maintenance_DOWN_time			Native		1 rows

Εικόνα 6.1 Μακροεντολή εισαγωγής επιθυμητών κατανομών

Ακολουθεί τμήμα του κώδικα της μακροεντολής εισαγωγής των κατανομών.



```
Private Sub Load_Click()

Me.Hide
form1.Hide

Dim m As Model
Set m = ThisDocument.Model

Dim s As SIMAN
Set s = ThisDocument.Model.SIMAN

Dim XL As Object

Dim FileToOpen As String
Dim ArenaDir As String

Set XL = GetObject("", "Excel.Application")

ArenaDir = Mid(m.FullName, 1, Len(m.FullName) - Len(m.Name))
FileToOpen = ArenaDir & "empirical distributions DC2006" & ".xls"
XL.Workbooks.Open FileToOpen

Dim Cselect As Integer
Dim c As Integer
For c = 1 To 5
    If forma2.Controls("EMP" & c).value = True Then
        Cselect = 2 + (c)
    End If
Next c

Dim expression(11, 7) As String
Dim tag(11, 7) As String
Dim i, j As Integer

For i = 1 To 6
    For j = 1 To 7
        expression(i, j) = XL.Workbooks(1).Worksheets(i).Cells(j,
Val(Cselect)).value
        tag(i, j) = "E" & (i) & "_ex" & (j)
        m.Modules(m.Modules.Find(smFindTag, tag(i,
j))).Data("Value(1)") = expression(i, j)
    Next j
Next i
For i = 7 To 11
    For j = 1 To 4
        expression(i, j) = XL.Workbooks(1).Worksheets(i).Cells(j,
Val(Cselect)).value
        tag(i, j) = "A" & (i - 6) & "_ex" & (j)
        m.Modules(m.Modules.Find(smFindTag, tag(i,
j))).Data("Value(1)") = expression(i, j)
    Next j
Next i

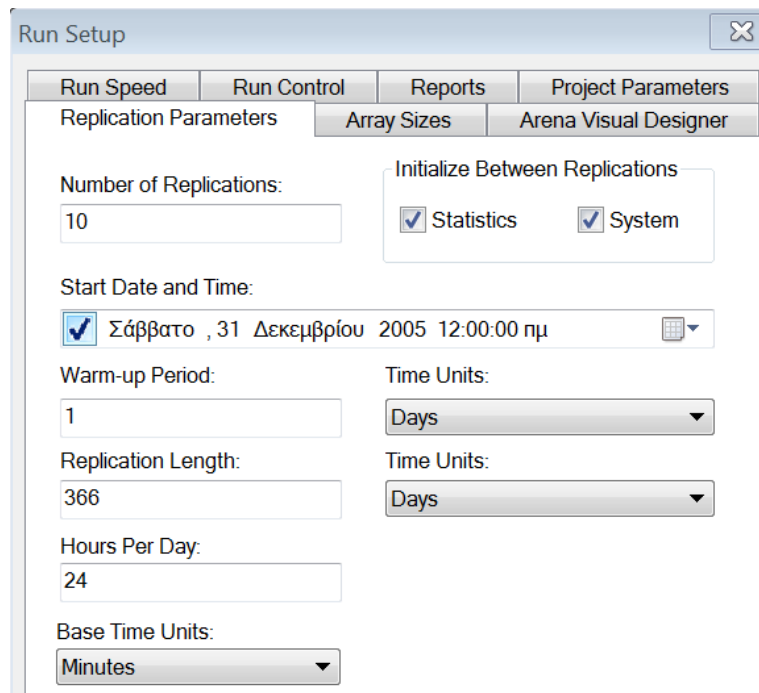
XL.Quit
End Sub
```

### 6.3 Ρυθμίσεις εκτελέσεων της προσομοίωσης

Οι διαθέσιμες καταγραφές των γεγονότων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή των κατανομών αφορούν στη λειτουργία του Ορυχείου Καρδιάς για το έτος 2006. Συνεπώς από αυτές προσδιορίστηκαν τα πραγματικά στοιχεία με τα οποία μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η διάρκεια της προσομοίωσης να είναι ένα πλήρες ημερολογιακό έτος.

Το υπό εξέταση ορυχείο αποτελεί ένα σύστημα το οποίο βρισκόταν ήδη σε λειτουργία τη στιγμή που αρχίζει η προσομοίωση με συνέπεια πάνω στους ταινιόδρομους να βρίσκεται ήδη υλικό. Για να προσομοιωθεί ρεαλιστικά αυτή η κατάσταση, η συλλογή στατιστικών δεδομένων ρυθμίστηκε να αρχίσει μία ημέρα μετά την εκκίνηση της προσομοίωσης. Η ρύθμιση αυτή αποκαλείται *simulation warm-up*. Έτσι κάθε προσομοίωση διαρκεί 366 ημέρες, εκ των οποίων η πρώτη αντιστοιχεί στην προετοιμασία του συστήματος και οι υπόλοιπες 365 στη συγκέντρωση δεδομένων. Οι ρυθμίσεις των εκτελέσεων προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα 6.2.

Για κάθε κατηγορία προσομοίωσης εκτελέστηκαν δέκα επαναλήψεις, οι οποίες έτρεξαν σε πέντε αντιθετικά ζεύγη. Πρόκειται για μια τεχνική μείωσης της διασποράς των αποτελεσμάτων των εκτελέσεων (*variance reduction technique*). Σύμφωνα με την εν λόγω μέθοδο τα ζεύγη χρησιμοποιούν για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών εισόδου των ίδιων γεγονότων, τους τυχαίους αριθμούς  $U_k$  και  $(1 - U_k)$ . Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σύγκλιση των αποτελεσμάτων προς την πραγματική τιμή σε λιγότερες επαναλήψεις σε σύγκριση με μια συμβατική εκτέλεση (Law and Kelton 1991).



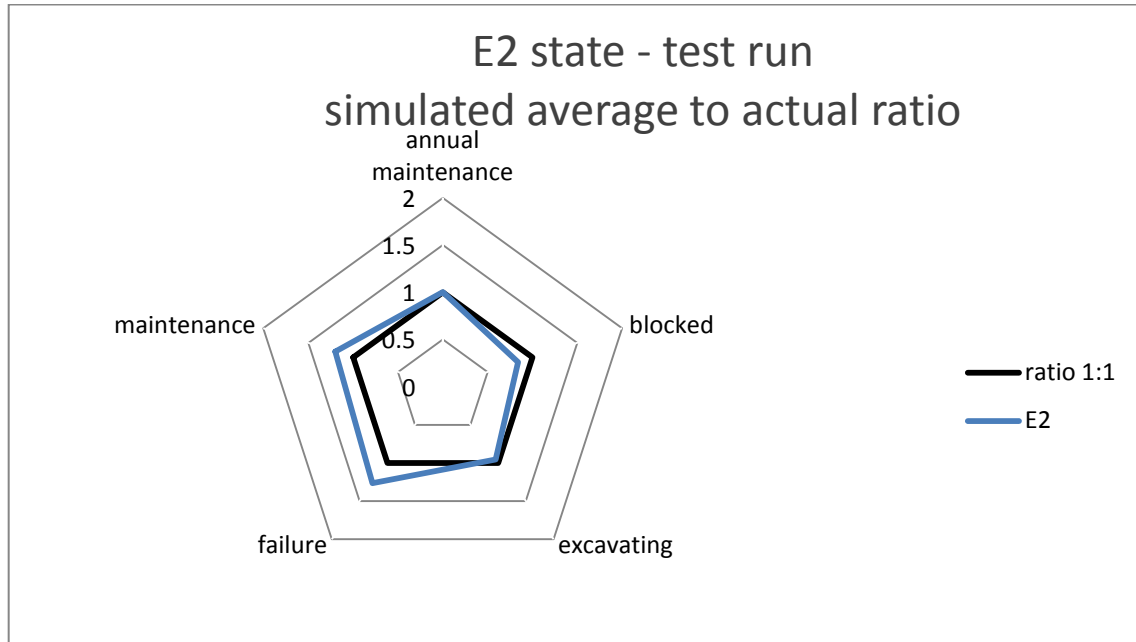
Εικόνα 6.2 Ρυθμίσεις παραγωγικών εκτελέσεων

#### 6.4 Επικύρωση του μοντέλου – Validation

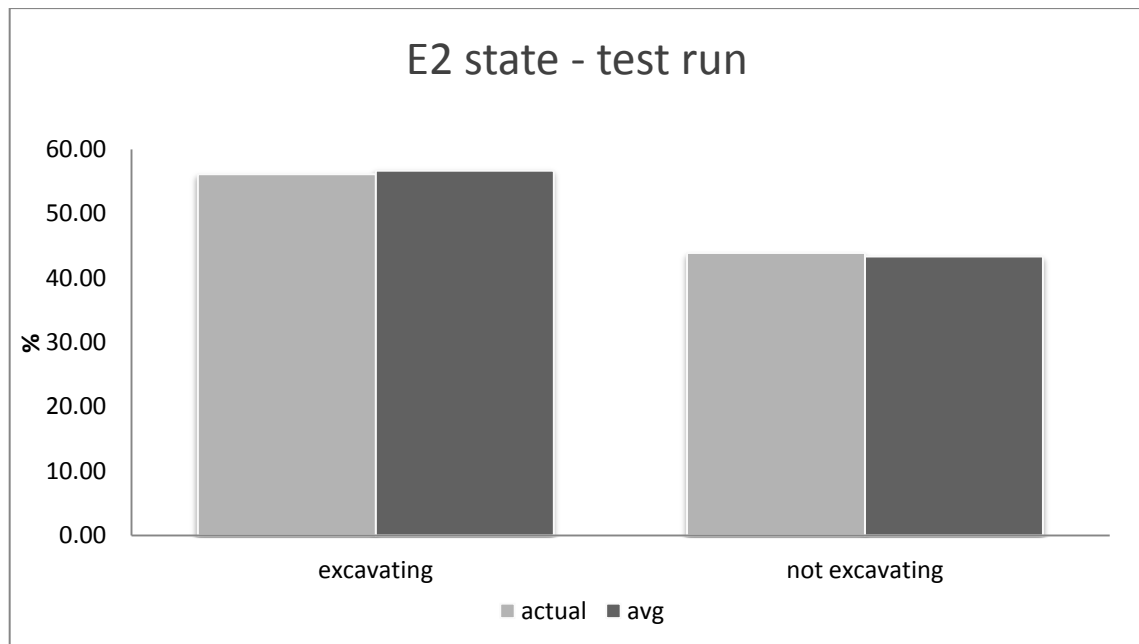
Για την εξέταση της εγκυρότητας του μοντέλου του ορυχείου πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική ανάλυση για έναν κλάδο παραγωγής, αυτόν του εκσκαφέα E2, με τη χρήση των σύνθετων εμπειρικών κατανομών. Τα αποτελέσματα 10 επαναλήψεων της προσομοίωσης οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αναπαριστά τη λειτουργία του ορυχείου με ικανοποιητική ακρίβεια. Συγκεκριμένα, η συχνότητα των καταστάσεων του εκσκαφέα που προέκυψε προσεγγίζει ιδιαίτερα καλά τα πραγματικά δεδομένα. Για την περαιτέρω εξακρίβωση της εγκυρότητας και για τη διαπίστωση των αναγκαίων αλλαγών πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές δοκιμαστικές προσομοιώσεις με λειτουργία όλων των κλάδων και χρήση των σύνθετων εμπειρικών κατανομών. Οι εμπειρικές κατανομές οι οποίες συγκροτούνται από πολλά γραμμικά τμήματα (piece-wise linear) είναι από τους αποδοτικότερους τρόπους για την επικύρωση ενός μοντέλου (Law and Kelton 1991).

Επίσης οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις ολόκληρου του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση των κατανομών των συντελεστών πλήρωσης των κάδων των εκσκαφέων (bucket fill factor). Οι μεταβολές αυτές έγιναν μετά από την τελική διαμόρφωση του μοντέλου, έτσι ώστε οι συνολικές παραγωγές κάθε εκσκαφέα να ανέρχονται στα πραγματικά επίπεδα.

Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 10 επαναλήψεων σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα για την κατάσταση του εκσκαφέα E2.



Σχήμα 6.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων δοκιμαστικής προσομοίωσης με την πραγματικότητα για τις καταστάσεις του E2



Σχήμα 6.2 Σύγκριση κατάστασης εκσκαφής – μη εκσκαφής E2 για την δοκιμαστική προσομοίωση

## 6.5 Παραγωγικές εκτελέσεις και αποτελέσματα

### 6.5.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, όπως και τα αποτελέσματά τους, συνοδεύονται από κωδικό ονομασίας σύμφωνα με το είδος των κατανομών που χρησιμοποιούν. Οι αντιστοιχίες των ονομασιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Κωδικοποίηση των αναλύσεων

Τύπος Κατανομής	Ονομασία προσομοίωσης
Εμπειρική κατανομή μορφής: min-0.1-0.25-0.5-0.75-0.90-0.95-0.99-max	EMP1
Εμπειρική κατανομή μορφής: min-0.1-0.25-0.5-0.75-0.90-0.95-max	EMP2
Εμπειρική κατανομή μορφής: Min-0.25-0.5-0.75-max	EMP3
Εμπειρική κατανομή μορφής: Min-0.5-max	EMP4
Εμπειρική κατανομή μορφής: Min-0.99-max	EMP5
Εμπειρική κατανομή μορφής: Min-0.5-0.99-max	EMP6
Κατανομή Erlang	GAMM
Κατανομή Weibull	WEIB
Κατανομή Lognormal	LOGN
Βέλτιστης προσαρμογής	BESTFIT

Δοκιμαστικές εκτελέσεις με χρήση κατανομών Lognormal παρείχαν αποτελέσματα που αποκλίνουν σημαντικά από τις αναμενόμενες τιμές. Το γεγονός αυτό, μαζί με την εκτίμηση ότι ο απαιτούμενος χρόνος συνολικής προσομοίωσης θα ήταν πολύ μεγάλος (περίπου 80 h) οδήγησε στην επιλογή να μην πραγματοποιηθεί η παραγωγική εκτέλεση για Lognormal. Αντιθέτως, στη θέση της εκτελέστηκε προσομοίωση με χρήση των κατανομών που προσαρμόστηκαν καλύτερα στα δεδομένα σύμφωνα με το λογισμικό ExpertFit. Σημειώνεται ότι αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο κατανομές Lognormal και Weibull και συμβολίζεται με την ονομασία BESTFIT.

Σχετικά με τα αποτελέσματα που αφορούν στις συχνότητες των καταστάσεων των εκσκαφών και στις αντίστοιχες παραγωγές τους έχει ακολουθηθεί η παρακάτω προσαρμογή:

Για τους εκσκαφείς E1 και E5, που όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.5.4, βρίσκονταν εκτός λειτουργίας για σημαντικά χρονικά διαστήματα το έτος 2006, έχει πραγματοποιηθεί αντιστάθμιση των αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι ιδιαίτερες συνθήκες. Ο λόγος που απαιτείται η επεξεργασία είναι η εξαίρεση των συμβάντων από τα σύνολα δεδομένων κατά τη διαμόρφωση των κατανομών. Στην αντιστάθμιση τα ποσοστά των καταστάσεων ανάγονται στο χρόνο που απομένει μετά την αφαίρεση των μεγάλων εκτός λειτουργίας χρονικών διαστημάτων. Σημειώνεται επίσης ότι δεν επηρεάζεται με την προσαρμογή αυτή το ποσοστό του χρόνου που αντιστοιχεί στην ετήσια συντήρηση.

Το λογισμικό Arena προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής των επιθυμητών αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε αρχεία excel. Τα αποτελέσματα που αναλύονται κυρίως είναι οι κατανομές της κατάστασης των πόρων του συστήματος και τα μεγέθη της παραγωγής. Στα αρχεία excel οι πληροφορίες όλων των επαναλήψεων εμφανίζονται κατακόρυφα σε μια στήλη, γεγονός που κατέστησε απαραίτητη τη δημιουργία μακροεντολής VBA με την οποία τα στοιχεία των επαναλήψεων συγκεντρώνονται σε ενιαίο πίνακα.

Η γενική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προβλέπει τον προσδιορισμό των μεγεθών περιγραφικής στατιστικής και τη σύγκριση τους με τα πραγματικά δεδομένα.

Επιπρόσθετα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης που αναφέρθηκαν, έχει ρυθμιστεί η εξαγωγή αρχείων μορφής dat στα οποία συλλέγονται οι τιμές μεταβλητών για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Τέτοιες μεταβλητές είναι οι ρυθμοί παραγωγής, μεταφοράς και απόθεσης, οι καταστάσεις των πόρων και οι μεταβλητές πορείας των εκσκαφών. Τα αρχεία dat χρησιμοποιούνται στο ανεξάρτητο λογισμικό Output Analyzer, το οποίο συνοδεύει το Arena, και αποτελούν τα ιστορικά της λειτουργίας του συστήματος που προκύπτουν από κάθε εκτέλεση του μοντέλου.

### **6.5.2 Προσομοίωση με χρήση σύνθετων εμπειρικών κατανομών**

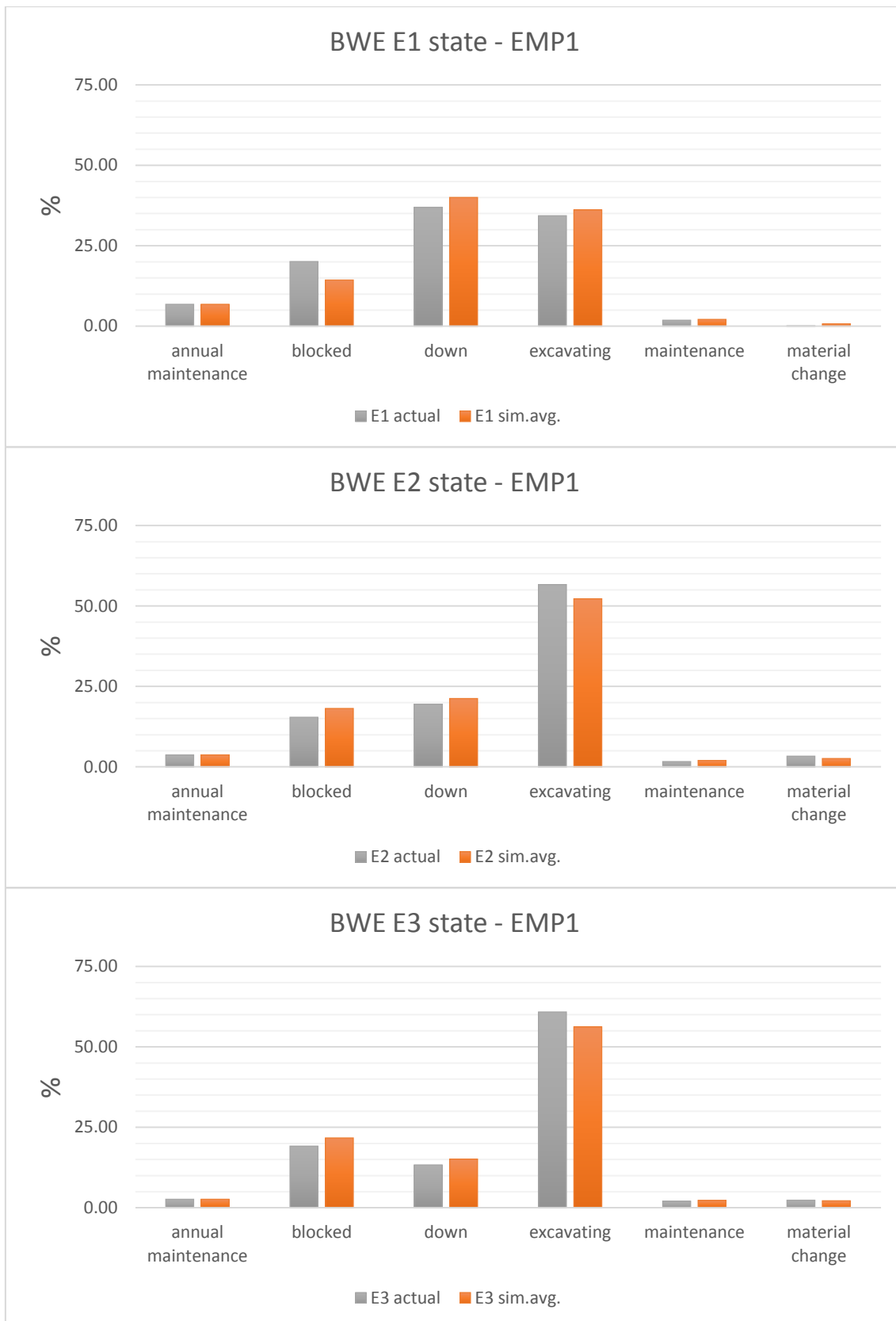
Η προσομοίωση του συστήματος εξόρυξης – φόρτωσης – μεταφοράς του υπό μελέτη ορυχείου με τη χρήση των σύνθετων εμπειρικών κατανομών είναι ο βασικός τρόπος με τον οποίον εξετάστηκε ο ρεαλισμός του μοντέλου και επομένως παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματά της.

Η εκτέλεση 10 επαναλήψεων με τις κατανομές EMP1 παρήγαγε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τη μέση τιμή των κατανομών καταστάσεων (state frequencies) των εκσκαφών. Είναι φανερό ότι επαληθεύεται η εγκυρότητα του μοντέλου. Οι μικρές τάξης διαφορές που παρουσιάζονται στις περιπτώσεις των E1 και E5 αιτιολογούνται από την αντιστάθμιση που προαναφέρθηκε και από την υλοποίηση της δομής που ελέγχει την ταυτόχρονη τροφοδοσία τους σε έναν αποθέτη, που ενδεχομένως δεν αναπαριστά ορθά την πραγματική σειρά γεγονότων.

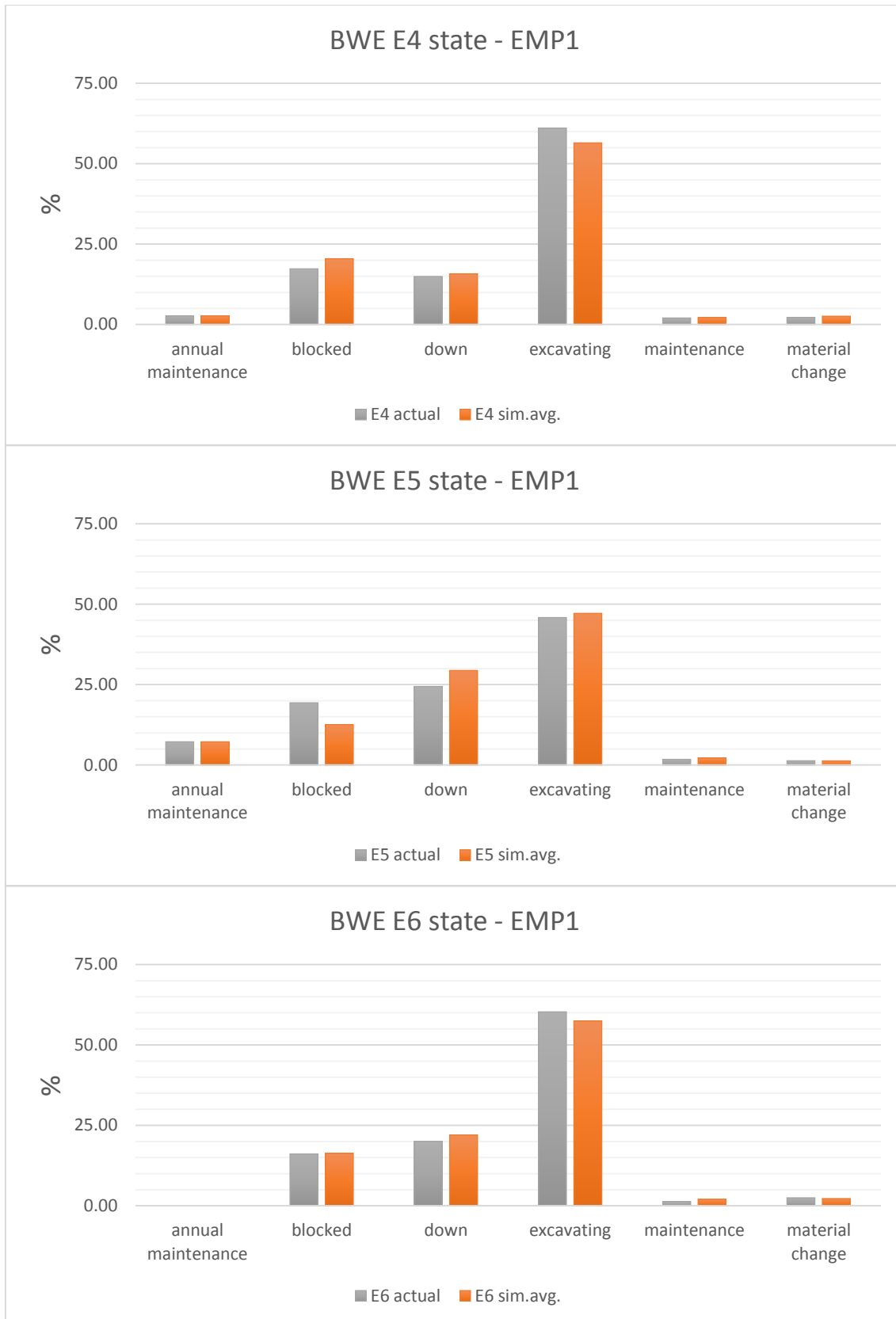
Πίνακας 6.2 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP1

EMP1 distributions		replication 1	replication 2	replication 3	replication 4	replication 5	replication 6	replication 7	replication 8	replication 9	replication 10
E1	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	14.08	13.20	13.04	13.38	16.33	13.92	13.02	15.75	16.37	14.27
	down	39.61	39.02	41.28	41.12	40.14	39.65	39.88	39.87	40.19	39.20
	excavating	36.73	38.22	36.13	35.87	34.10	36.63	37.37	34.89	33.85	37.32
	maintenance	2.08	1.98	2.09	2.15	2.01	2.31	2.31	2.02	2.21	1.79
	material change	0.70	0.78	0.69	0.69	0.64	0.70	0.63	0.67	0.59	0.63
E2	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	17.83	17.78	18.37	17.40	16.56	19.74	17.21	17.02	20.22	19.54
	down	20.70	19.50	21.56	21.51	21.60	22.84	19.81	21.73	21.90	21.40
	excavating	53.44	54.47	51.88	52.76	53.06	49.34	54.60	52.85	49.50	50.66
	maintenance	1.75	1.96	1.96	1.94	2.36	1.93	1.99	1.93	2.17	2.12
	material change	2.58	2.58	2.53	2.69	2.72	2.44	2.69	2.76	2.51	2.58
E3	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	19.64	24.17	19.81	22.33	23.01	21.99	19.82	20.60	23.48	21.89
	down	14.64	17.03	16.02	14.01	14.87	15.44	15.17	15.27	13.63	14.92
	excavating	58.49	51.55	56.85	56.76	55.62	55.34	58.43	56.88	55.58	56.32
	maintenance	2.50	2.69	2.29	2.18	1.84	2.26	1.85	2.38	2.63	2.17
	material change	2.11	1.94	2.41	2.10	2.04	2.35	2.11	2.25	2.06	2.08
E4	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	19.45	20.78	20.35	20.15	19.19	18.89	20.45	22.05	22.78	20.32
	down	14.96	14.85	15.52	15.85	17.14	16.39	14.72	17.22	15.43	15.44
	excavating	58.04	56.92	56.85	56.33	56.26	57.31	56.93	53.87	54.97	57.05
	maintenance	2.23	2.10	2.05	2.57	2.07	2.14	2.60	1.72	1.89	2.01
	material change	2.67	2.70	2.59	2.46	2.70	2.62	2.65	2.49	2.28	2.54
E5	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	11.77	13.84	11.14	13.24	13.65	12.67	11.38	12.79	11.96	13.38
	down	29.09	28.21	29.44	28.99	29.89	30.61	31.11	28.89	29.41	28.59
	excavating	48.35	46.93	48.79	46.76	45.50	45.78	46.79	47.81	47.97	47.05
	maintenance	2.24	2.47	2.05	2.40	2.41	2.39	2.17	1.95	2.07	2.38
	material change	1.30	1.31	1.33	1.35	1.31	1.30	1.31	1.32	1.34	1.36
E6	annual maintenance										
	blocked	15.94	16.43	15.05	15.62	18.04	19.42	15.98	15.93	15.39	15.18
	down	23.54	21.78	22.71	20.77	22.43	20.17	21.17	21.17	23.41	22.61
	excavating	56.45	57.42	57.60	58.89	55.27	56.65	58.03	59.12	57.03	58.17
	maintenance	1.81	2.09	2.13	2.53	2.23	1.75	2.54	1.66	1.84	1.83
	material change	2.27	2.29	2.52	2.19	2.04	2.02	2.27	2.12	2.33	2.21

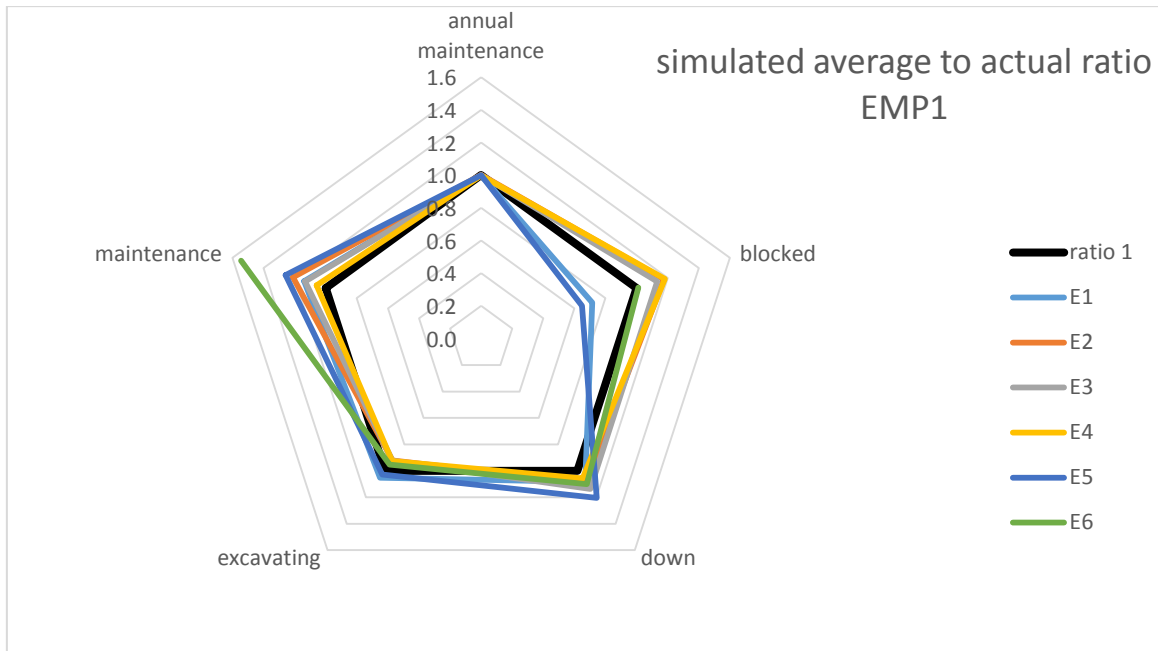




Σχήμα 6.3 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφέων E1-E3, προσομοίωση EMP1



Σχήμα 6.4 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφέων E4-E6, προσομοίωση EMP1



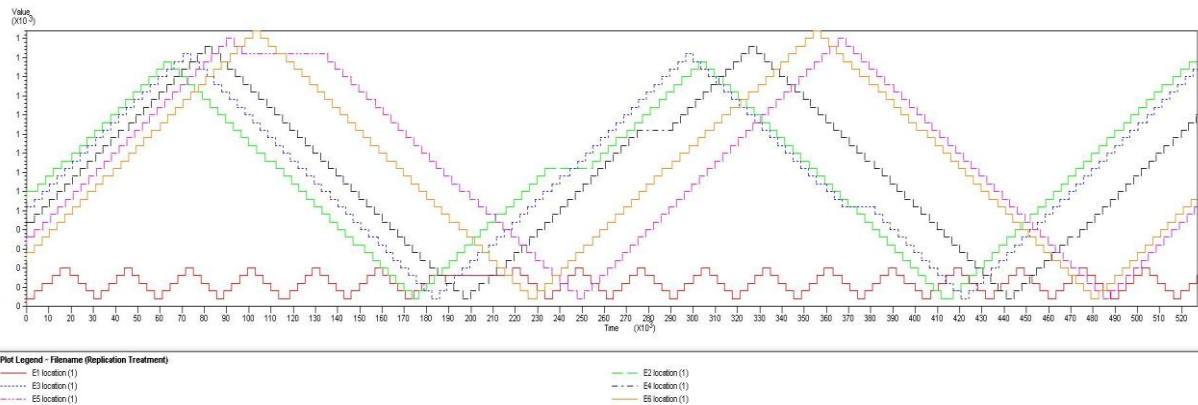
Σχήμα 6.5 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα, προσομοίωση EMP1

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται ο λόγος της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων προς τις πραγματικές τιμές. Παρατηρείται ικανοποιητική συγκέντρωση των καμπυλών κοντά στο λόγο 1:1.

Ως προς τα στοιχεία της παραγωγής που επιτεύχθηκε για ένα έτος προσομοίωσης τα αποτελέσματα γενικώς ανταποκρίνονται στα πραγματικά δεδομένα. Ιδιαίτερα η συνολική παραγωγή του ορυχείου, όπως και οι επιμέρους παραγωγές από τους έξι εκσκαφείς, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Αντιθέτως, η κατανομή του υλικού παρουσιάζεται ιδιαίτερα διαφοροποιημένη στους εκσκαφείς E4 και E5, οι οποίοι παράγουν τη διπλάσια ποσότητα λιγνίτη σε σχέση με την πραγματικότητα. Στους υπόλοιπους εκσκαφείς οι διαφορές είναι μικρότερης τάξης. Αυτή η ασυμφωνία μπορεί να ερμηνευθεί πέρα από αδυναμία του μοντέλου, από την πρόσμιξη που δημιουργείται όταν μαζί με τον λιγνίτη εξορρύνονται μικρού πάχους ενστρώσεις στείρων, ή όταν λεπτά στρώματα λιγνίτη κρίνονται ως μη εκμεταλλεύσιμα. Επιπροσθέτως, δεν είναι διαθέσιμη η πληροφορία των ακριβών θέσεων των εκσκαφών σε συνδυασμό με το γεωλογικό μοντέλο που καθιστούν δύσκολη την περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου.

Πίνακας 6.3 Ετήσιες παραγωγές της προσομοίωσης EMP1

branch	material		actual	average simulated	compensated simulated	simulated/actual rati
E1	Lignite	m <sup>3</sup>	69750	204428	141055	2.02
	Lignite	t	83700	245312	169266	2.02
	Waste	m <sup>3</sup>	4869400	6963677	4804937	0.99
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	4939150	7168105	4945992	1.00
E2	Lignite	m <sup>3</sup>	1059667	721449	721449	0.68
	Lignite	t	1271600	865743	865743	0.68
	Waste	m <sup>3</sup>	4584100	5081166	5081166	1.11
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	5643767	5802616	5802616	1.03
E3	Lignite	m <sup>3</sup>	712000	1043986	1043986	1.47
	Lignite	t	854400	1252784	1252784	1.47
	Waste	m <sup>3</sup>	5554900	5190245	5190245	0.93
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	6266900	6234230	6234230	0.99
E4	Lignite	m <sup>3</sup>	804833	1630597	1630597	2.03
	Lignite	t	965800	1956715	1956715	2.03
	Waste	m <sup>3</sup>	5536300	4638159	4638159	0.84
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	6341133	6268756	6268756	0.99
E5	Lignite	m <sup>3</sup>	1568833	3988247	3310245	2.11
	Lignite	t	1882600	4785892	3972290	2.11
	Waste	m <sup>3</sup>	9227300	8836857	7334591	0.79
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	10796133	12825104	10644836	0.99
E6	Lignite	m <sup>3</sup>	2361917	2181360	2181360	0.92
	Lignite	t	2834300	2617628	2617628	0.92
	Waste	m <sup>3</sup>	2620200	2973084	2973084	1.13
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	4982117	5154444	5154444	1.03
TOTAL	Lignite	m <sup>3</sup>	6577000	9770067	9028692	1.37
	Lignite	t	7892400	11724074	10834426	1.37
	Waste	m <sup>3</sup>	32392200	33683188	30022182	0.93
	Lignite + Waste	m <sup>3</sup>	38969200	43453255	39050875	1.00

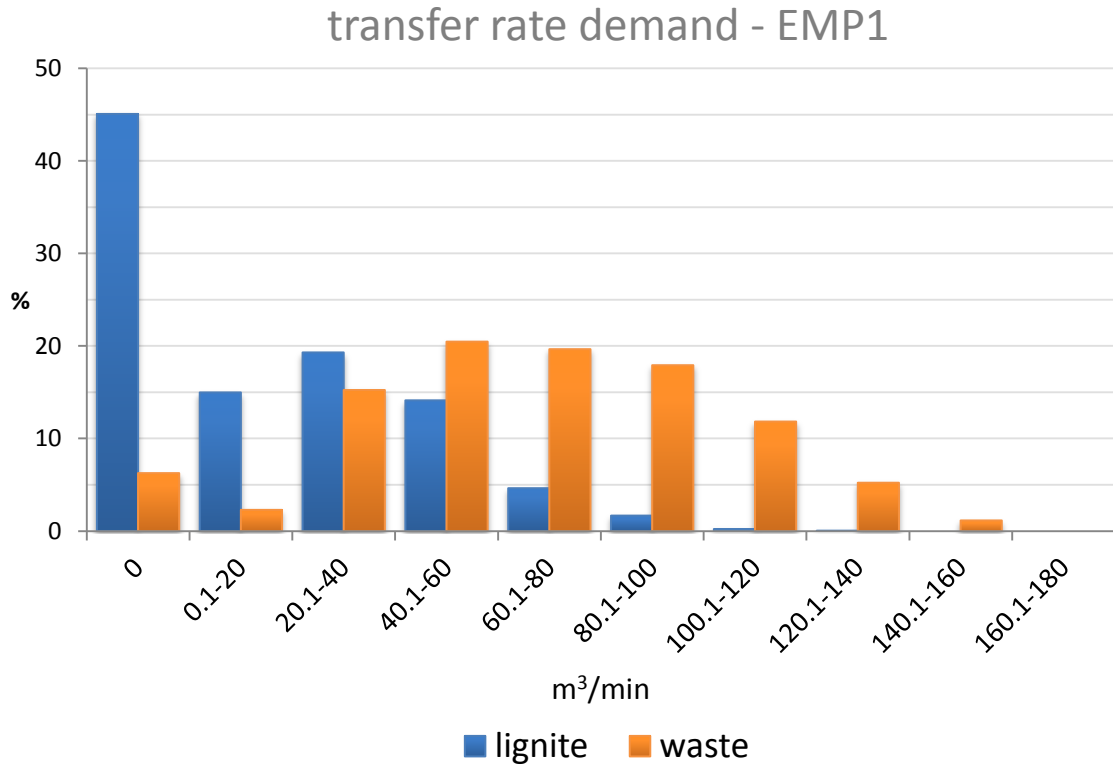


Σχήμα 6.6 Μεταβολή θέσης εκσκαφών κατά μήκος βαθμίδων, 1<sup>η</sup> επανάληψη προσομοίωσης EMP1

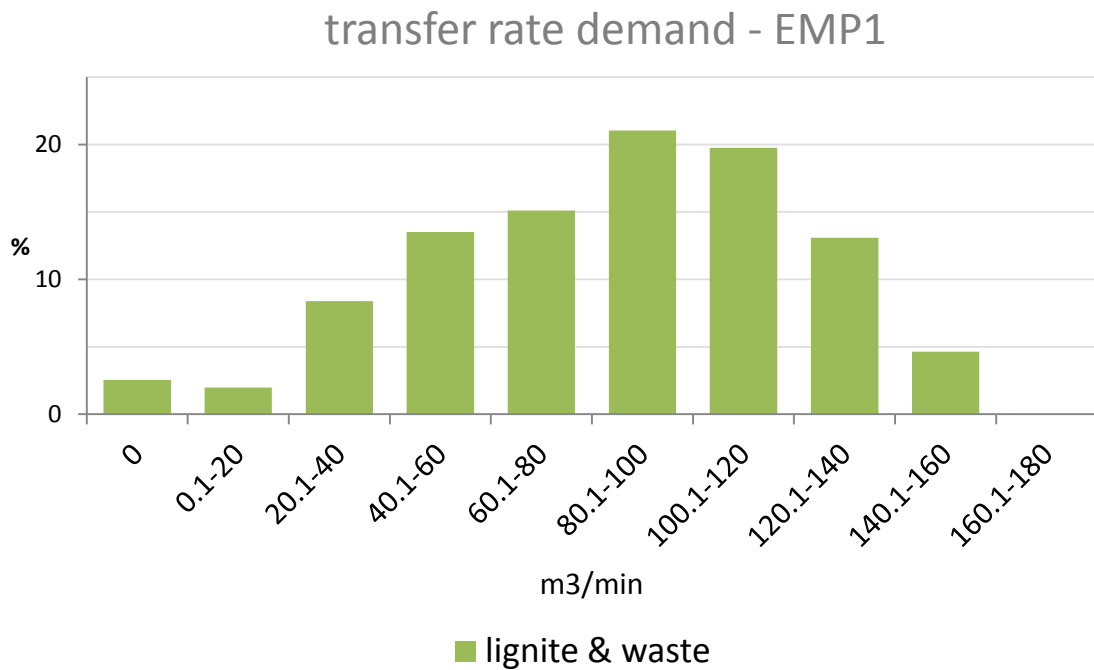
Το Σχήμα 6.6 παρουσιάζει τις τιμές των μεταβλητών θέσης των εκσκαφών. Η περιοδική κίνηση που διαγράφεται συνάδει με την πραγματική λειτουργία του συστήματος. Τα παρατεταμένα οριζόντια τμήματα αντιστοιχούν στις ετήσιες συντηρήσεις κατά τις οποίες οι εκσκαφείς παραμένουν ακινητοποιημένοι. Η κλιμακωτή μορφή των διαγραμμάτων οφείλεται στον τρόπο υλοποίησης της πορείας των εκσκαφών που επιτρέπει καταγραφή της θέσης μόνο κατά τη διέλευσή τους από σταθμούς.

Σημαντικά αποτελέσματα που εξάγονται από την προσομοίωση είναι οι ρυθμοί άφιξης υλικού στον κόμβο έτσι ώστε να διερευνηθεί η επάρκεια του συστήματος μεταφοράς. Η τιμή της μέγιστης δυναμικότητας των εκσκαφών εκτιμάται στα 287 m<sup>3</sup>/min και προκύπτει με βάση την χωρητικότητα των κάδων και τις εκκενώσεις ανά λεπτό.

Η επεξεργασία των στατιστικών που καταγράφηκαν κατά την προσομοίωση EMP1 και αφορούν στους ρυθμούς άφιξης λιγνίτη, στείρων και του αθροίσματός τους στον κόμβο παρέχει τα γραφήματα των Σχημάτων 6.7 και 6.8. Η μέγιστη τιμή ρυθμού άφιξης (μέση τιμή από τις 10 επαναλήψεις) ανήλθε σε 168.3 m<sup>3</sup> ανά λεπτό. Μία μόλις επανάληψη εμφάνισε αυξημένη τιμή ρυθμού άφιξης (250.9 m<sup>3</sup>/min).

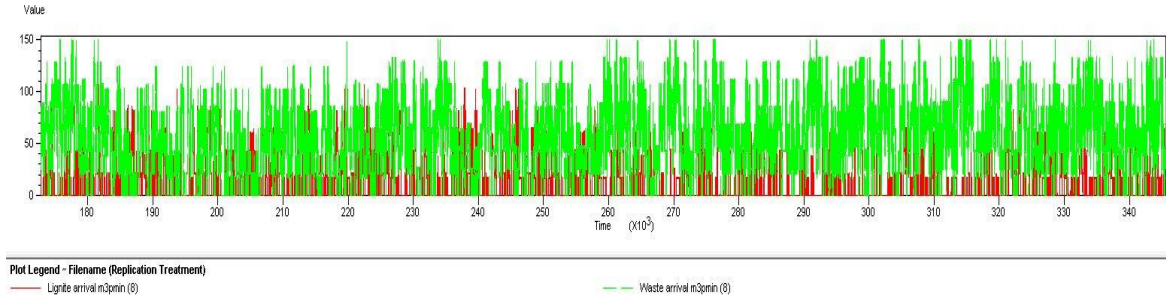


Σχήμα 6.7 Ιστόγραμμα ρυθμών άφιξης λιγνίτη και στείρου στον κόμβο

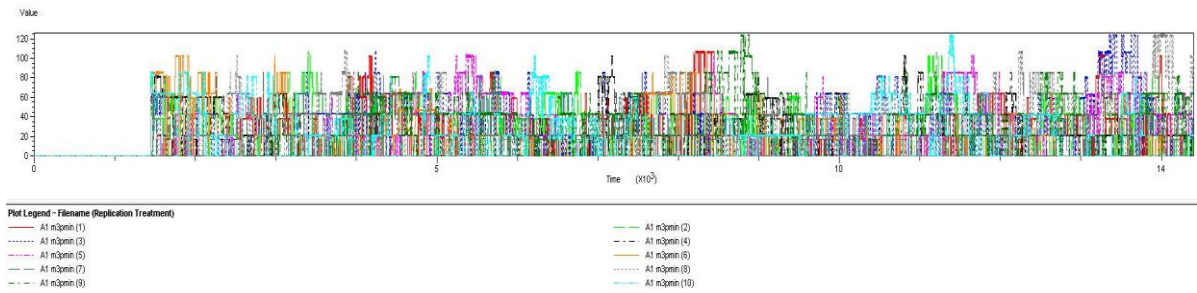


Σχήμα 6.8 Ιστόγραμμα ρυθμών άφιξης αθροίσματος λιγνίτη και στείρου στον κόμβο

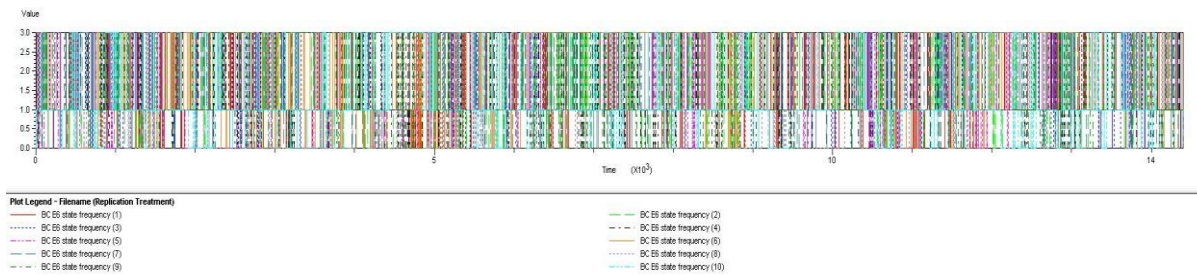
Για την πιστοποίηση ότι το μεταλλευτικό σύστημα χαρακτηρίζεται από έντονη στοχαστική φύση εξετάστηκαν οι τιμές των καταγραφών παραγωγής, μεταφοράς και απόθεσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Στα Σχήματα 6.9, 6.10 και 6.11 διακρίνεται η έλλειψη περιοδικότητας στα μεγέθη που απεικονίζονται, γεγονός που αντανακλά την τυχαιότητα που προαναφέρθηκε.



Σχήμα 6.9 Ο απαιτούμενος ρυθμός μεταφοράς λιγνίτη και σιέριου, 8<sup>η</sup> επανάληψη προσομοίωσης EMP1 για την περίοδο Μαΐου – Αυγούστου



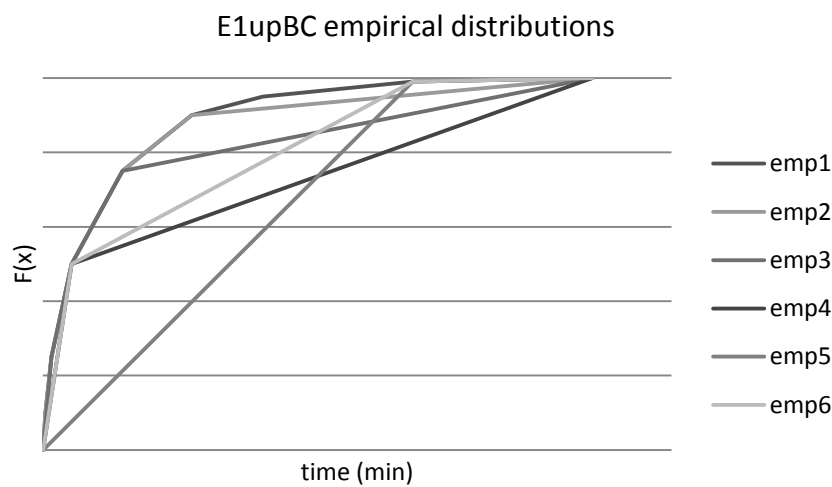
Σχήμα 6.10 Ο ρυθμός απόθεσης σιέριων, αποθέτης A1, όλες οι επανλήψεις προσομοίωσης EMP1 για την περίοδο 1/1-10/1



Σχήμα 6.11 Η εναλλαγή καταστάσεων του T/D του κλάδου E6, όλες οι επανλήψεις προσομοίωσης EMP1 για την περίοδο 1/1-10/1

### 6.5.3 Προσομοίωση με χρήση απλοποιημένων εμπειρικών κατανομών

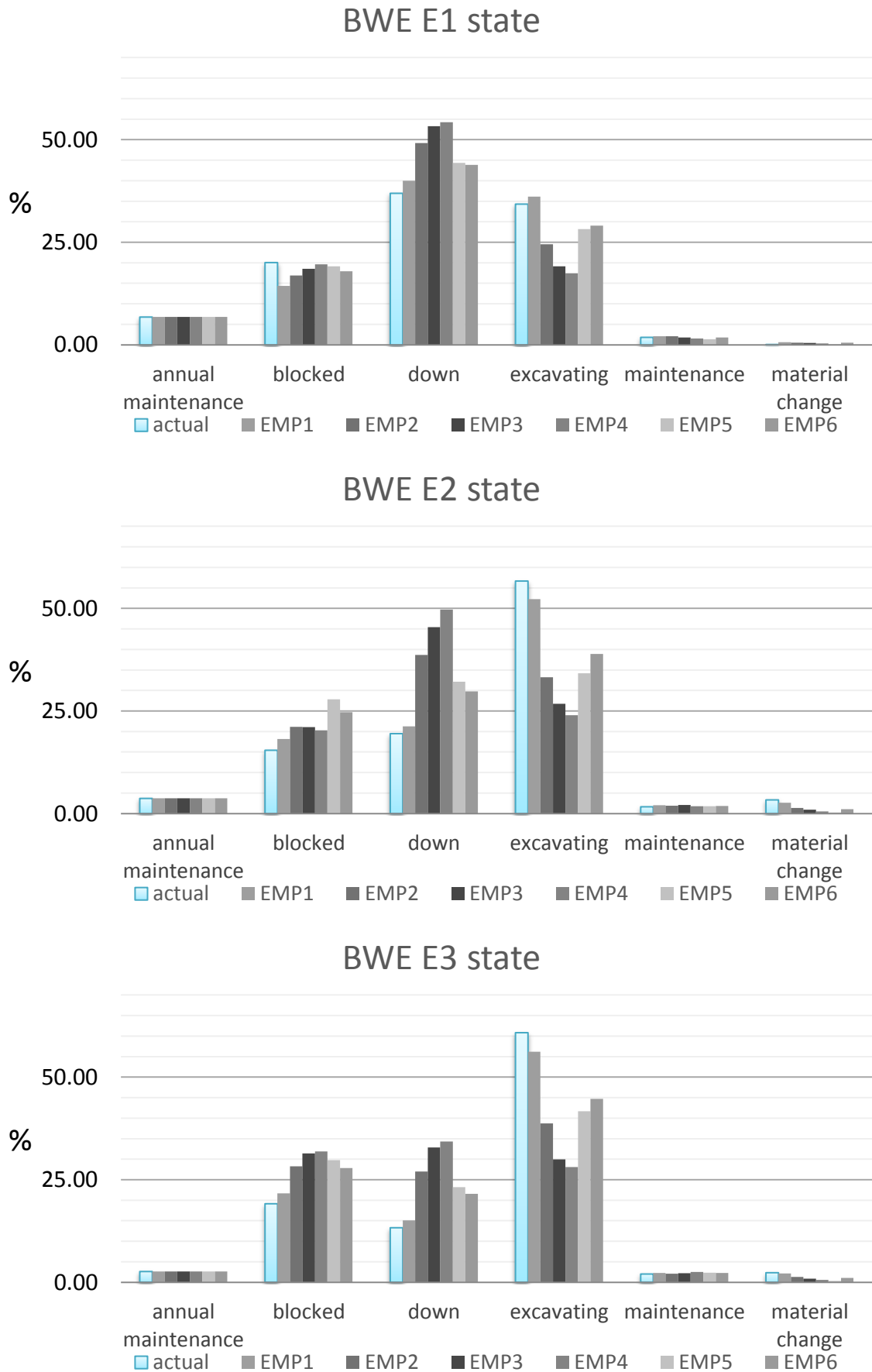
Η επίδραση της απλοποίησης των σύνθετων εμπειρικών κατανομών εξετάζεται προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει κάποια απλή κατανομή που περιγράφει αποτελεσματικά τη διάρκεια και το χρόνο μεταξύ εμφάνισης των γεγονότων που προσομοιώνονται. Εάν αποδειχθεί ότι μια απλή κατανομή είναι αποδοτική, η απαιτούμενη πληροφορία περιορίζεται και διευκολύνεται συνολικά η μελέτη προσομοίωσης. Στο Σχήμα 6.12 διακρίνεται η απλοποίηση με ελάττωση των γραμμικών τμημάτων των συναρτήσεων εμπειρικών κατανομών.



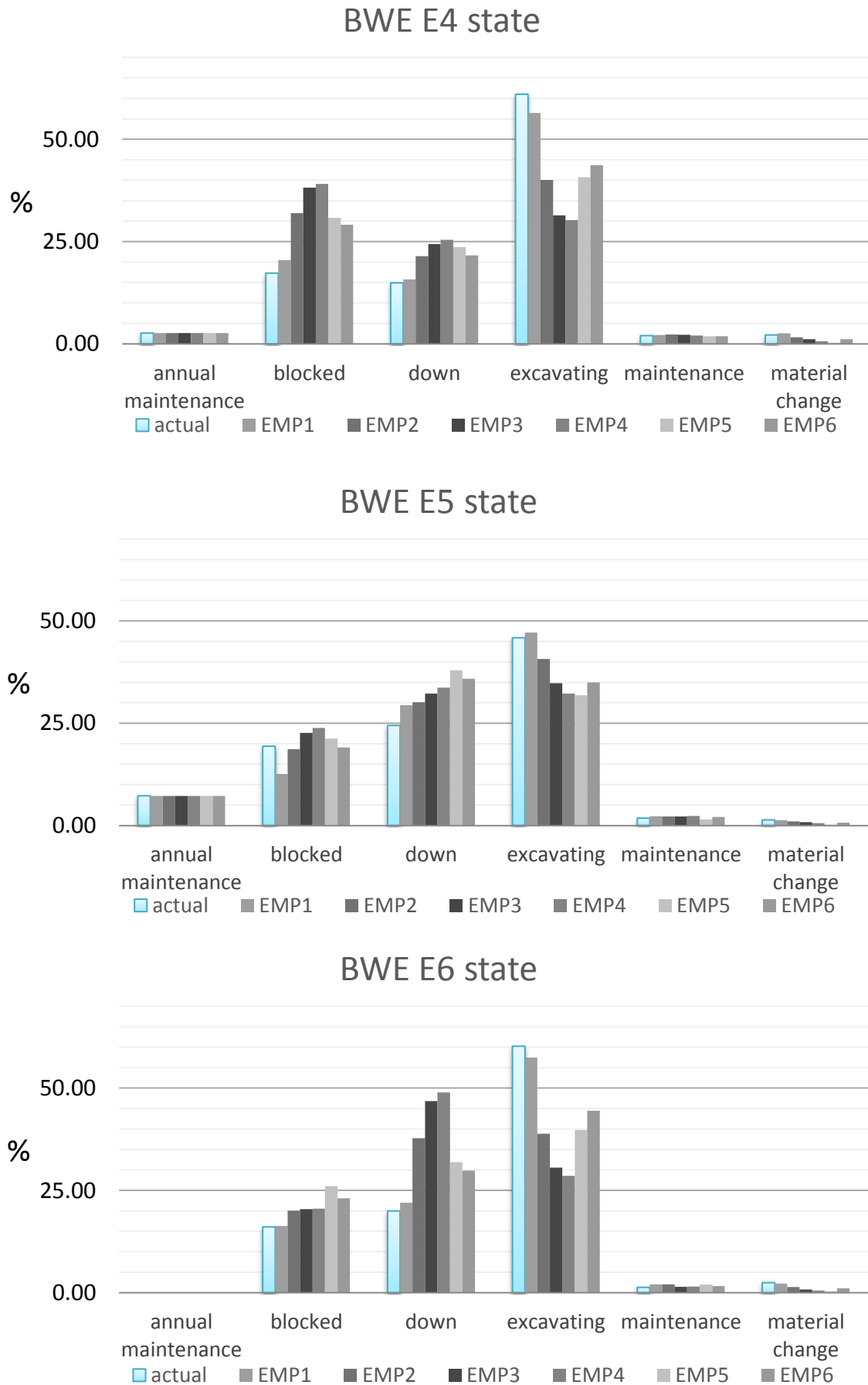
Σχήμα 6.12 Τύποι συναρτήσεων εμπειρικών κατανομών

Οι πραγματοποιήσιμες προσομοιώσεις με χρήση των πέντε πρόσθετων τύπων εμπειρικών κατανομών οδήγησε στα αποτελέσματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 6.13 και 6.14. Σύμφωνα με αυτά οι κατανομές EMP2-EMP4 παρουσιάζουν βαθμιαία ελάττωση του χρόνου εξόρυξης, με ταυτόχρονη βαθμιαία αύξηση του χρόνου για τον οποίο οι εκσκαφείς είναι υπό επισκευή. Οι εναλλαγές των καταστάσεων είναι περιορισμένες και η παρατεταμένη μη λειτουργία των εκσκαφών αποτέλεσε παράγοντα μείωσης του χρόνου προσομοίωσης. Αντίθετα, οι κατανομές EMP5 και EMP6 εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα, δεν κυμαίνονται όμως στα επίπεδα που θα τις καθιστούσαν κατάλληλες για τη μελέτη.





Σχήμα 6.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με εμπειρικές κατανομές (E1-E3)



Σχήμα 6.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με εμπειρικές κατανομές (E4-E6)

#### 6.5.4 Προσομοίωση με χρήση θεωρητικών κατανομών

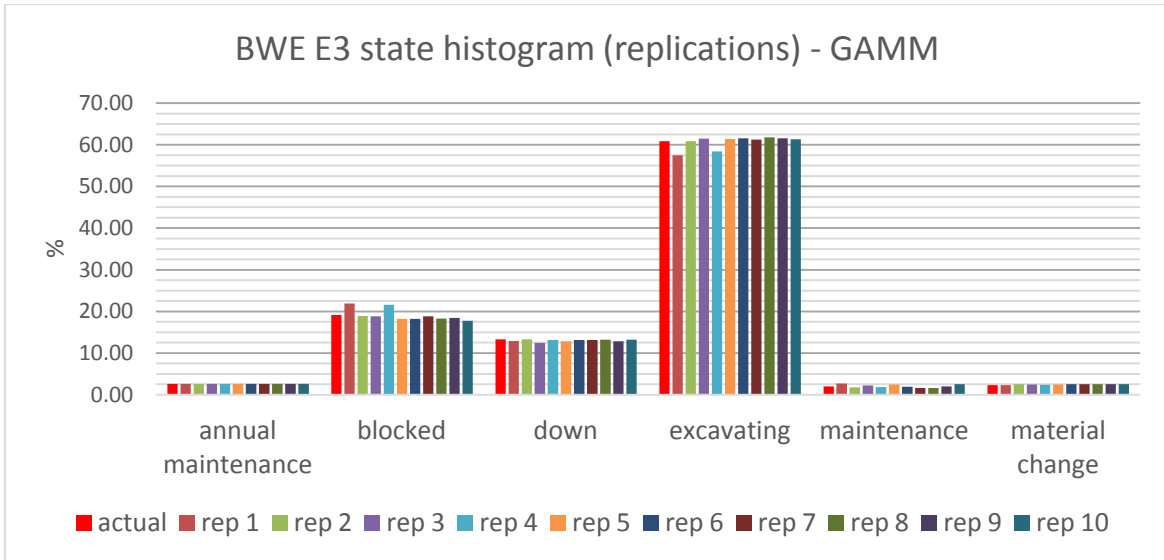
Η χρήση κατάλληλων θεωρητικών κατανομών μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη προσομοίωση συστημάτων για τους λόγους που αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Στην προσομοίωση συνεχούς συστήματος εκμετάλλευσης της παρούσας εργασίας τα αποτελέσματα εκτελέσεων με θεωρητικές κατανομές παρείχαν αποτελέσματα εξαιρετικής ποιότητας.

Η καλύτερη προσομοίωση του συστήματος επιτεύχθηκε με τη χρήση της κατανομής Erlang. Χαρακτηριστικά παρατίθενται στα Σχήματα 6.15 και 6.16 οι κατανομές καταστάσεων που προέκυψαν για τον K/E E3 σε σύγκριση με την πραγματικότητα ενώ στο Σχήμα 6.17 φαίνονται οι τιμές των διαφορών. Κατάλληλη για τα γεγονότα που προσομοιώνονται κρίνεται και η κατανομή Weibull, με τις επαναλήψεις της να παρέχουν παραπλήσια αποτελέσματα με αυτά της Erlang.

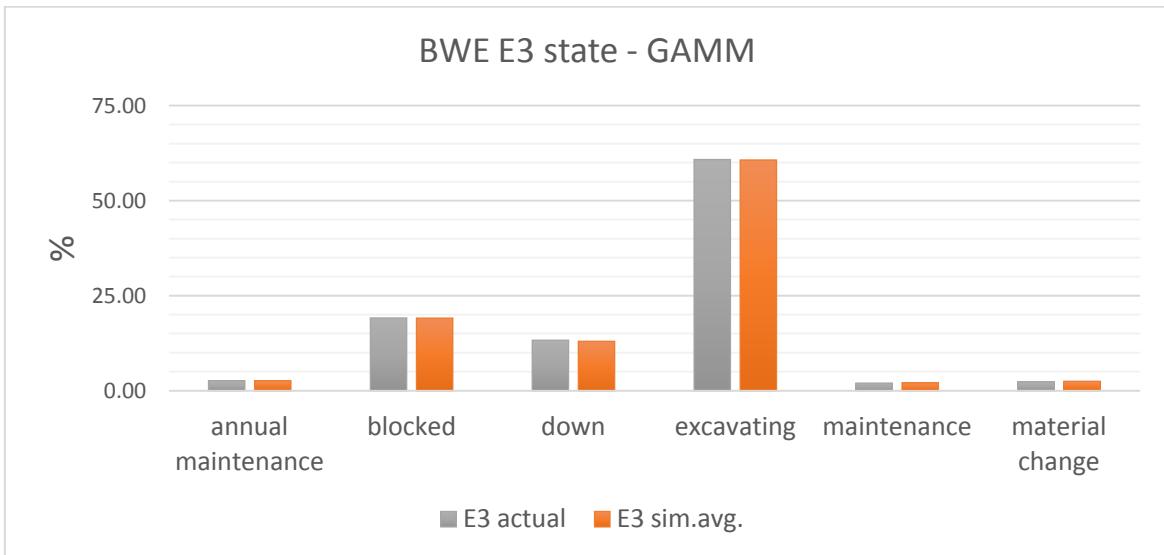
Η χρήση ανάμικτων κατανομών, Erlang, Weibull και Lognormal, προκάλεσε μια ελαφριά υπερεκτίμηση του χρόνου εκσκαφής με παράλληλη μείωση της κατάστασης down, σε σχέση με τα δεδομένα. Η αιτιολόγηση εντοπίζεται στις πολυάριθμες κατανομές Lognormal τις οποίες το ExpertFit κατέταξε ως καλύτερες προσαρμογές. Έτσι η επικράτησή τους στη συγκεκριμένη ανάλυση έτεινε στην αύξηση του χρόνου εκσκαφής όλων των εκσκαφών όπως συνέβη και στα δοκιμαστικά τρεξίματα για καθολική χρήση κατανομών Lognormal.

Η ανάγκη εκτέλεσης πολλαπλών επαναλήψεων απεικονίζεται στο Σχήμα 6.18, όπου παρατηρείται σύγκλιση της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης με την αύξηση του αριθμού επαναλήψεων. Συγκεκριμένα ελέγχεται η διαφορά της μέσης τιμής αποτελεσμάτων ενός αριθμού επαναλήψεων με τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων χωρίς την τελευταία επανάληψη.

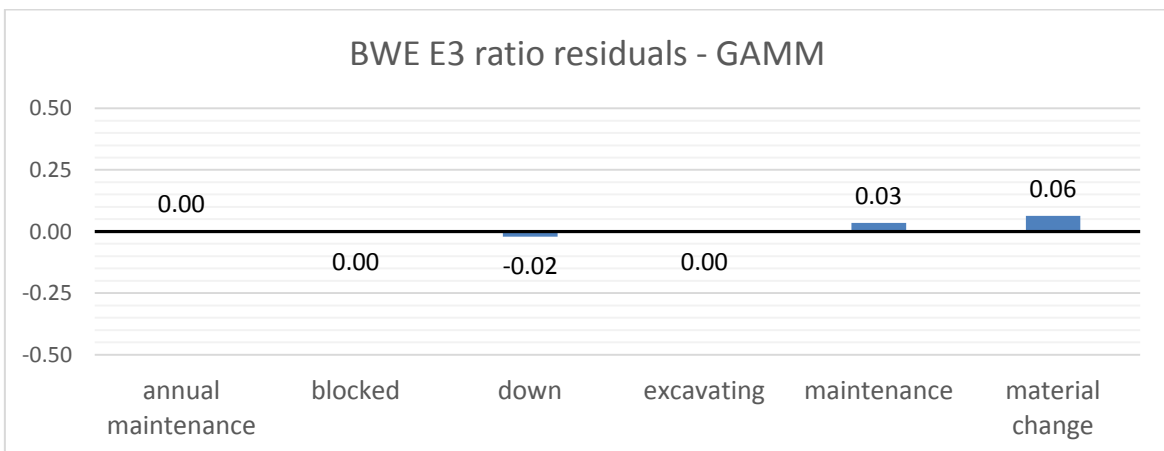
Ασυμφωνίες και για τις τρεις αναλύσεις, παρατηρούνται μόνο στην κατάσταση Blocked των E1 και E5, η οποία παρουσιάζεται περιορισμένη. Οι λόγοι είναι ίδιοι με αυτούς που αναφέρθηκαν για την προσομοίωση EMP1 στην παράγραφο 6.5.2.



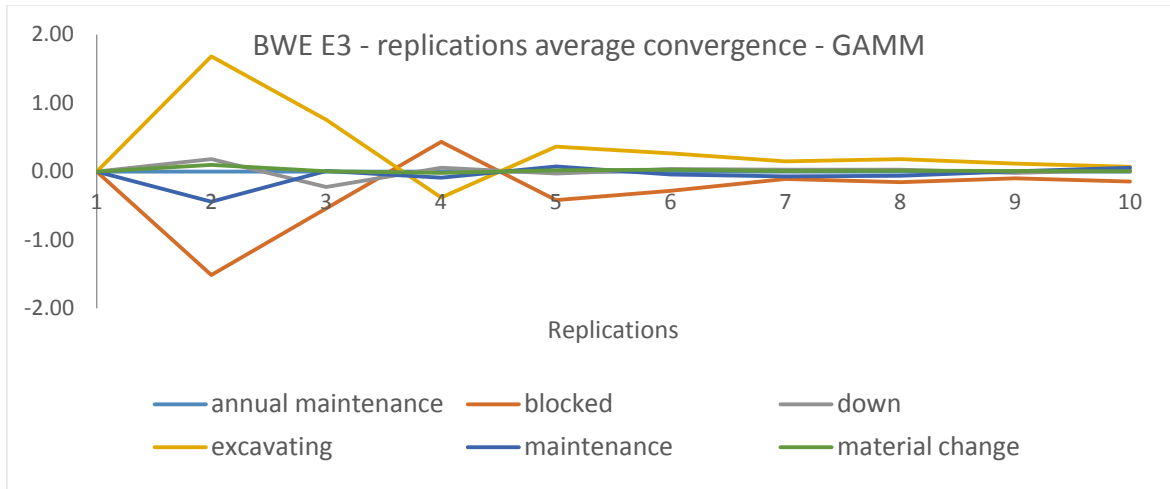
Σχήμα 6.15 Αναλυτικό ιστόγραμμα κατάστασης ΚΕ Ε/3 – GAMM/10 επαναλήψεις



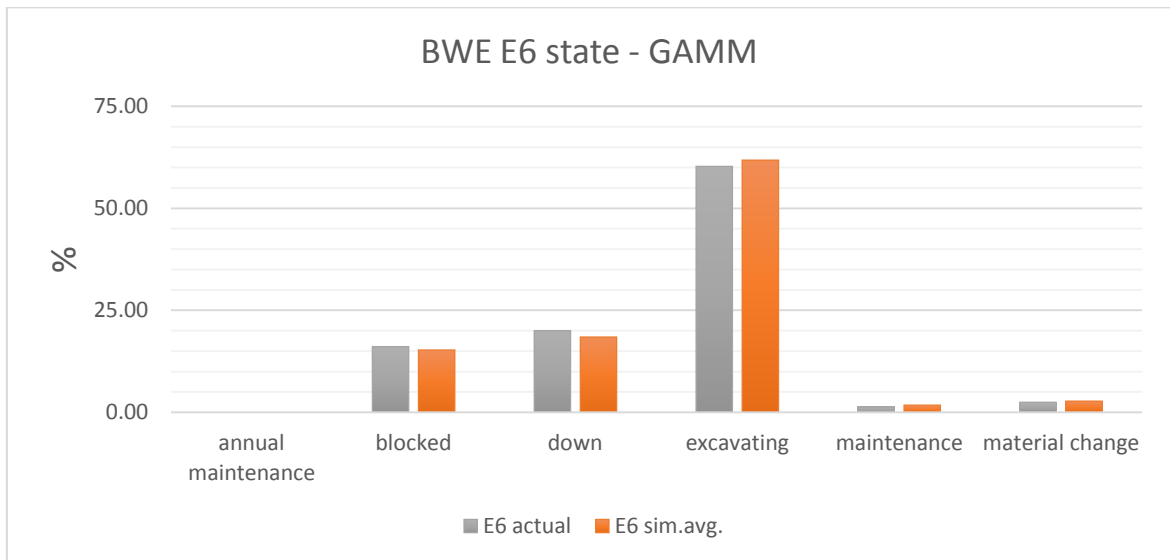
Σχήμα 6.16 Συγκριτικό ιστόγραμμα κατάστασης ΚΕ Ε/3: πραγματικότητα – μέση τιμή προσομοίωσης GAMM



Σχήμα 6.17 Επιμέρους διαφορές πραγματικότητας – μέσης τιμής προσομοίωσης GAMM, Κ/Ε Ε3

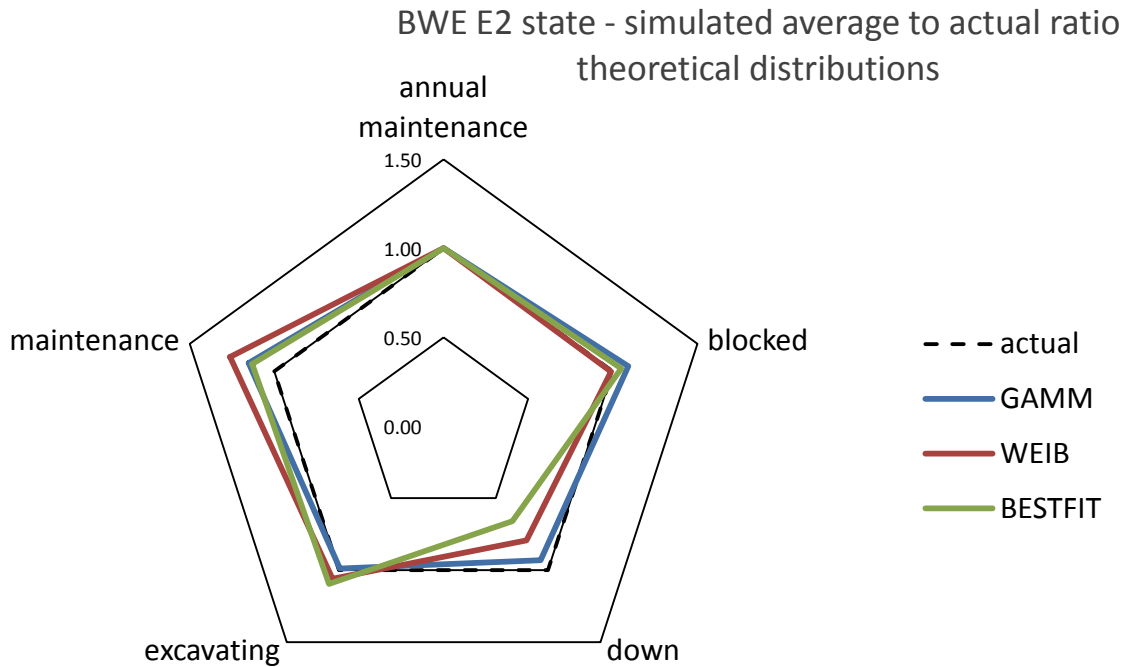
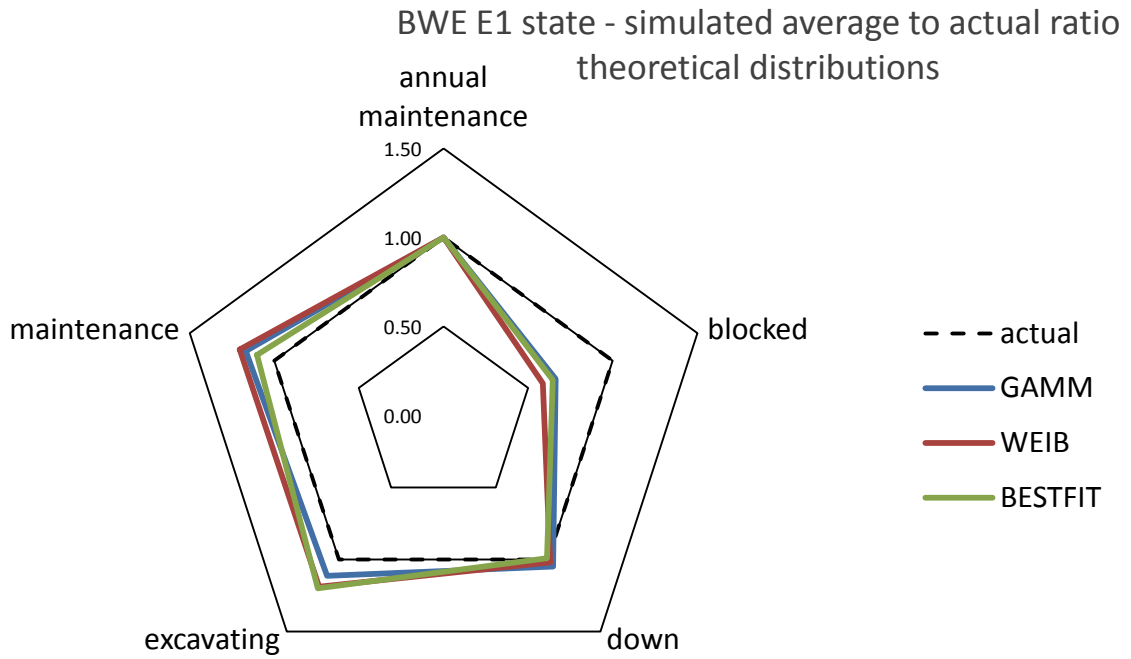


Σχήμα 6.18 Αυξανόμενη σύγκλιση αποτελεσμάτων με την αύξηση του αριθμού επαναλήψεων

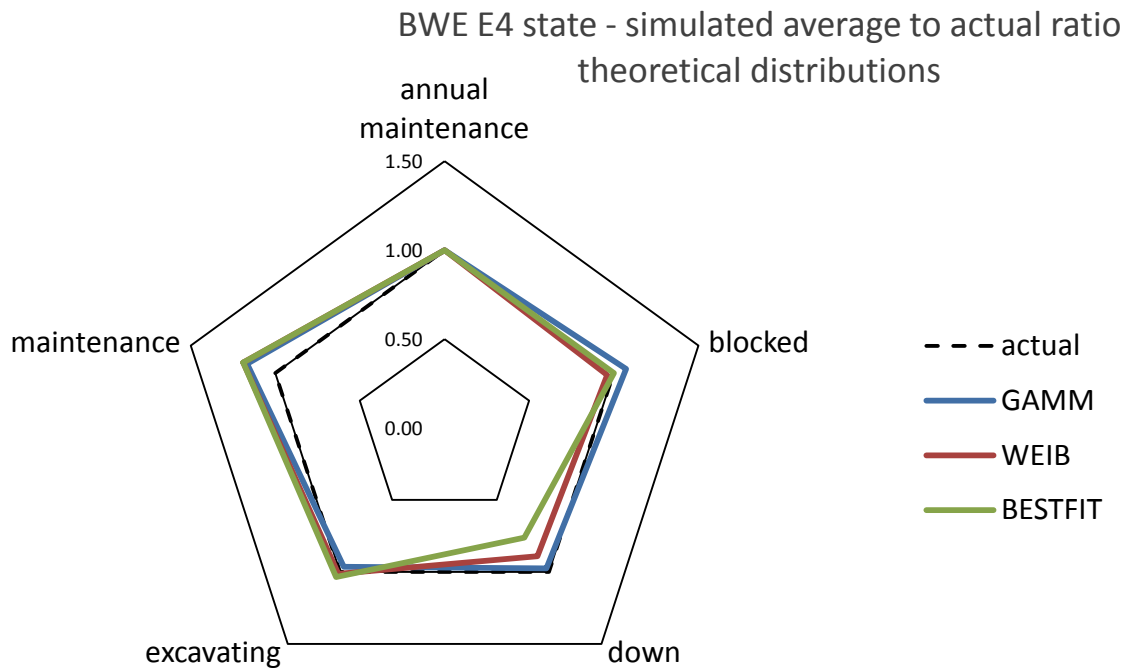
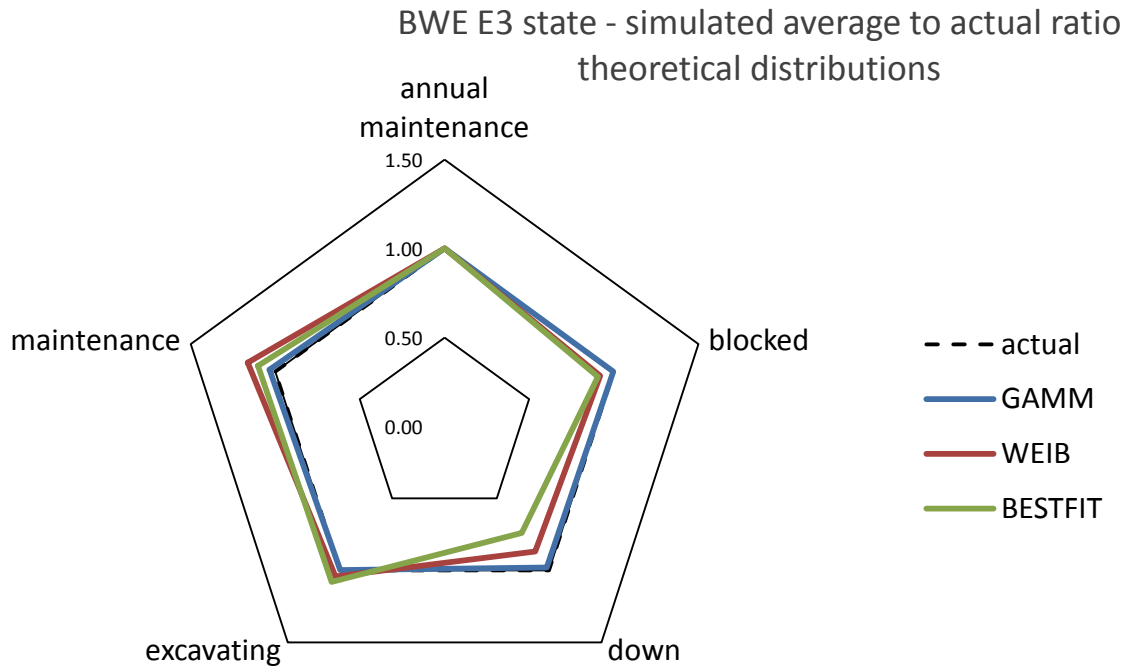


Σχήμα 6.19 Συγκριτικό ιστόγραμμα κατάστασης Κ/Ε Ε6: πραγματικότητα – μέση τιμή προσομοίωσης GAMM

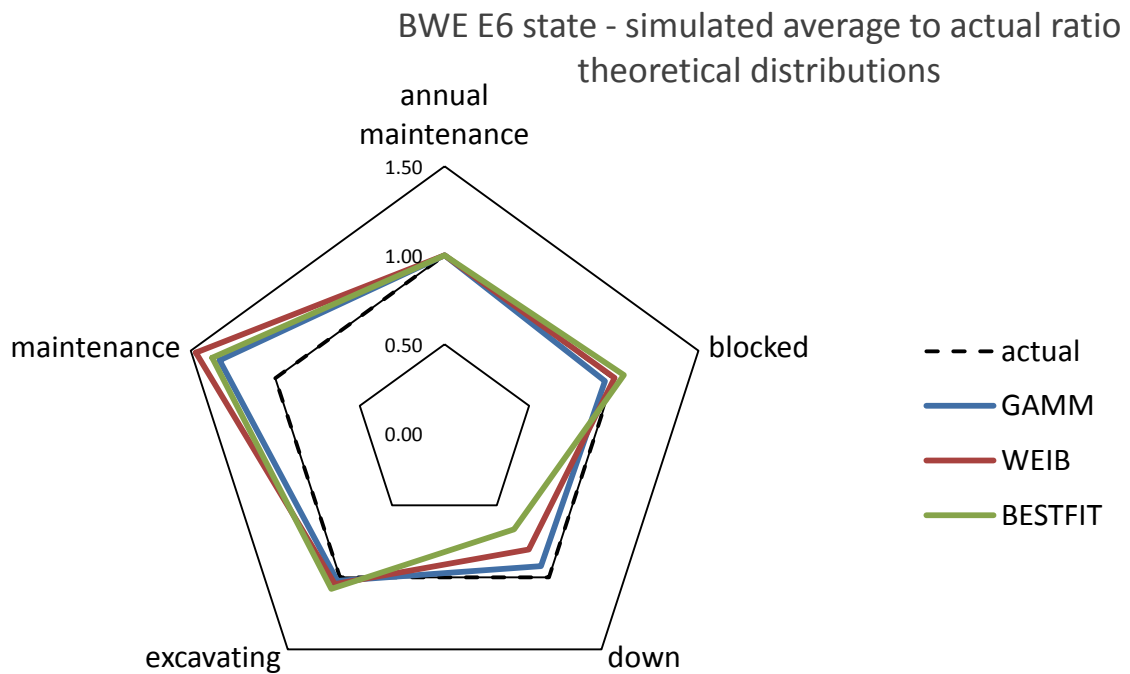
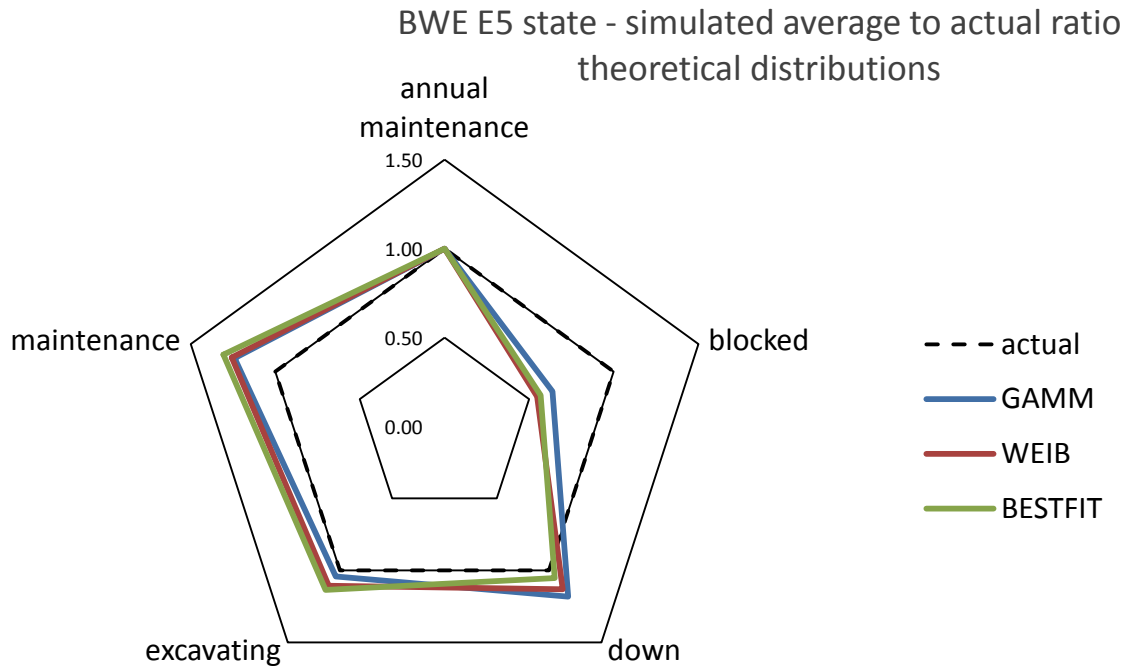
Τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.20, 6.21 και 6.22, απεικονίζουν το λόγο της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με θεωρητικές κατανομές προς τις πραγματικές αντίστοιχες τιμές. Τα αποτελέσματα αφορούν στις καταστάσεις των εκσκαφών εικονιζόμενα σε διαφορετικά διαγράμματα.



Σχήμα 6.20 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα (E1 και E2), προσομοιώσεις με χρήση θεωρητικών κατανομών



Σχήμα 6.21 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα (E3 και E4), προσομοιώσεις με χρήση θεωρητικών κατανομών



Σχήμα 6.22 Λόγος μέσης τιμής αποτελεσμάτων προς πραγματικά δεδομένα (E5 και E6), προσομοιώσεις με χρήση θεωρητικών κατανομών



## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε με τη μέθοδο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων μοντέλο μεταλλευτικού συστήματος εκμετάλλευσης πολυστρωματικού κοιτάσματος λιγνίτη. Το μοντέλο προσαρμόστηκε σε δεδομένα παλαιότερου σχεδίου εκμετάλλευσης του Ορυχείου Καρδιάς του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας της ΔΕΗ Α.Ε.

Εκτελέστηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις με τη χρήση διαφορετικών κατανομών για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών εισόδου. Οι κατανομές προέκυψαν από την εκτενή επεξεργασία των πραγματικών καταγραφών του συστήματος για ένα έτος λειτουργίας (2006). Τα αποτελέσματα των εκτελέσεων με σύνθετες εμπειρικές κατανομές πιστοποίησαν την εγκυρότητα του μοντέλου, γεγονός που προσδίδει αξιοπιστία στα συμπεράσματα που διαμορφώνονται. Με αυτόν τον τρόπο οι πληροφορίες που παρέχονται μπορούν να αποτελέσουν βάση για την ελάττωση του ρίσκου που συνοδεύει το σχεδιασμό εξορυκτικών δραστηριοτήτων.

Η χρήση θεωρητικών κατανομών κρίθηκε ως η καταλληλότερη για την περιγραφή της χρονικής διάστασης των γεγονότων υπό μελέτη. Συγκεκριμένα, τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς τις καταστάσεις και τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού, προέκυψαν με χρήση της κατανομής Erlang. Εξαίρεση αποτέλεσε η καθολική χρήση της κατανομής Lognormal, με την αντίστοιχη προσομοίωση να υπερεκτιμά τη διαθεσιμότητα και λειτουργία των καδοφόρων εκσκαφών.

Επίσης, η συνολική παραγωγή που προκύπτει από το μοντέλο είναι ισοδύναμη με τα πραγματικά στοιχεία. Αδυναμία του μοντέλου είναι η κατανομή του εξορυσσόμενου υλικού ορισμένων εκσκαφών, η οποία δεν συνάδει με το υπάρχον γεωλογικό μοντέλο. Αναλυτικότερες καταγραφές της θέσης και κίνησης των καδοφόρων εκσκαφών μαζί με ειδικότερα στοιχεία που αφορούν στο λόγο λιγνίτη/στεύρων αποτελούν κινήσεις για τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο θα χρησιμοποιείται αποδοτικότερα η γεωλογική γνώση για το κοίτασμα.

Συνεπώς, η προσαρμογή ενός λεπτομερούς σχεδίου εκμετάλλευσης στο πλαίσιο του μοντέλου που παρουσιάστηκε, μαζί με την προσθήκη περισσότερων πληροφοριών στα δεδομένα εισόδου μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο υπολογισμού της

απαιτούμενης δυναμικότητας του συνεχούς συστήματος εξόρυξης-φόρτωσης-μεταφοράς των πολυστρωματικών λιγνιτικών κοιτασμάτων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Atkinson, T. and Carter, A.C., 1980. *Terrace mining operations in stratified deposits*, The Aus. I. M. M. Conference, New Zealand, 181-192.

Atkinson, T., 1985. *Stripping Operations Using Belt Conveyor Systems*, The Aus. I. M. M. Conference, Southern Queensland, 87-97.

Banks, J., 1999. *Introduction to simulation*, Proceedings of the 1999 Simulation Conference, Phoenix, 7-13.

Banks, J., J.S. Carson, B.L. Nelson, 1996. *Discrete Event System Simulation*, 2nd Ed., Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, p. 548.

Fiorini, M., M. and Furia, J., 2007. *Simulation of continuous behavior using discrete tools: ore conveyor transport*, Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, 1655-1662.

Greberg, J., and Sundqvist, F., 2011. *Simulation as a Tool for Mine Planning*, Second International Future Mining Conference, Sydney, 273-278.

Kelton W.D., Sadowski R.P. and Sturrock D.T., 2007. *Simulation with Arena*, 4th edn, McGraw-Hill, New York, p. 631.

Law, A.M. 2006. *ExpertFit Version 7 © User's Guide*, Averill M. Law & Associates, Inc., Tuscon, p. 127.

Law, A.M. and Kelton, W.D., 1991. *Simulation modeling and analysis*, 2nd edn, McGraw-Hill, New York, p. 672.

Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2011. *Mining Engineering Handbook*, 3rd edn, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, USA, p. 1984.

ΔΕΗ Α.Ε., 2010. *Εξορύσσοντας το φώς*, ΔΕΗ Α.Ε., Αθήνα, σελ. 160.

Επίσημος διαδικτυακός τόπος ThyssenKrupp AG,  
[http://media.thyssenkrupp.com/images/press/thyssenkrupp\\_p\\_831.jpg](http://media.thyssenkrupp.com/images/press/thyssenkrupp_p_831.jpg), [τελευταία επίσκεψη 28 Ιουνίου 2014]

Επίσημος διαδικτυακός τόπος ΔΕΗ Α.Ε., <http://dei.globo.gr/electron08/04.html> [τελευταία επίσκεψη 22 Ιουνίου 2014]

Επίσημος διαδικτυακός τόπος ΔΕΗ Α.Ε., <http://www.dei.gr/el/oruxeia/ptolemaida-amuntaio> [τελευταία επίσκεψη 22 Ιουνίου 2014]

Επίσημος διαδικτυακός τόπος Συνδέσμου Μεταλλευτικών Επιχειρήσεων, <http://www.sme.gr/proionta-sme-orykta/94-lignitis> [τελευταία επίσκεψη 1 Ιουλίου 2014]

Ζιούτας, Γ., 2005. Πιθανότητες και Στοιχεία Στατιστικής για Μηχανικούς, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 425

Καβουρίδης, Κ., 2005, *Λιγνίτης και φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας*, ΤΕΕ, Αθήνα, σελ. 16 pdf.

Κολοβός, Χ.Ι., 2010, *Σχεδιασμός αυλής αποθήκευσης λιγνίτη υπαίθριου λιγνιτωρυχείου*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. 89-97.

Μενεγάκη, Μ. 2010. *Σχεδιασμός Υπαιθρίων Εκμεταλλεύσεων*, Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ. 138.

Οικονόμου, Π., 2010. *Ανάλυση των δεδομένων λειτουργίας του πάγιου εξοπλισμού της ΔΕΗ Α.Ε.*, διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, σελ. 95.

Παναγιώτου, Γ.Ν. και Μιχαλακόπουλος, Θ.Ν., 2007. *Συστήματα Φόρτωσης – Μεταφοράς και Μηχανικός Εξοπλισμός Μεταλλείων*, Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ. 91.

Παπαδόπουλος Σ.Κ., 2010, *Παράμετροι απόδοσης εξοπλισμού συνεχούς λειτουργίας σε επιφανειακά λιγνιτωρυχεία*, διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, σελ. 114.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Πίνακες στοιχείων περιγραφικής Στατιστικής

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Πίνακας Π.1.1 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων αποθέτη Α1

A1	State statistics			2006		
Time measurements in minutes						
	down			maintenance		
	up	down	sum	up	down	sum
count	1752	1753		33	34	
sum	433875	66059	499934	422544	6750	429294
average	247.6	37.7		12804.4	198.5	
standard deviation	341.8	112.9		10352.6	100.5	
coefficient of variation	1.38	3.00		0.81	0.51	
min	2	2		1294	20	
10th percentile	10	8		3008	83	
25th percentile	36	10		5620	137	
median	124	14		9850	183	
75th percentile	317	26		14296	262	
90th percentile	629	58		30120	327	
95th percentile	933	96		35785	371	
99th percentile	1550	588		36603	430	
max	2894	1794		36920	430	

Πίνακας Π.1.2 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων αποθέτη Α2

A2	State statistics			2006		
Time measurements in minutes						
	down			maintenance		
	up	down	sum	up	down	sum
count	2254	2255		43	44	
sum	419458	78170	497628	443678	8502	452180
average	186.1	34.7		10318.1	193.2	
standard deviation	311.9	105.1		8319.3	94.8	
coefficient of variation	1.68	3.03		0.81	0.49	
min	2	4		1230	70	
10th percentile	8	6		2646	86	
25th percentile	24	10		4065	119	
median	82	14		8240	166	
75th percentile	216	24		14185	290	
90th percentile	455	52		18439	336	
95th percentile	729	100		25042	339	
99th percentile	1553	539		36974	376	
max	4590	1884		38860	380	

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Πίνακας Π.1.3 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων αποθέτη Α3

A3	State statistics			2006		
Time measurements in minutes						
	down			maintenance		
	up	down	sum	up	down	sum
count	2382	2383		56	57	
sum	408697	92303	501000	461196	11106	472302
average	171.6	38.7		8235.6	194.8	
standard deviation	243.2	107.3		6050.4	103.9	
coefficient of variation	1.42	2.77		0.73	0.53	
min	2	2		1170	50	
10th percentile	10	8		2535	74	
25th percentile	24	10		2964	112	
median	80	14		6935	178	
75th percentile	220	27		11324	270	
90th percentile	432	68		17770	356	
95th percentile	642	116		20343	380	
99th percentile	1173	535		22780	409	
max	2290	1200		22886	420	

Πίνακας Π.1.4 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων αποθέτη Κ

K	State statistics			2006		
Time measurements in minutes						
	down			maintenance		
	up	down	sum	up	down	sum
count	1546	1547		19	20	
sum	467646	52788	520434	287378	8092	295470
average	302.5	34.1		15125.2	404.6	
standard deviation	351.2	82.2		7848.3	154.8	
coefficient of variation	1.16	2.41		0.52	0.38	
min	2	2		5370	188	
10th percentile	18	8		7717	256	
25th percentile	56	10		9558	304	
median	176	14		12570	360	
75th percentile	422	26		19830	465	
90th percentile	773	60		24421	654	
95th percentile	1037	122		27671	722	
99th percentile	1487	395		32717	728	
max	2728	1480		33978	730	

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Πίνακας Π.1.5 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων αποθέτη ΚΒ

KB	State statistics			2006		
Time measurements in minutes						
	down			maintenance		
	up	down	sum	up	down	sum
<b>count</b>	176	177		16	17	
<b>sum</b>	506948	9160	516108	345688	2952	348640
<b>average</b>	2880.4	51.8		21605.5	173.6	
<b>standard deviation</b>	5008.8	116.5		11794.9	70.5	
<b>coefficient of variation</b>	1.74	2.25		0.55	0.41	
<b>min</b>	2	4		4140	60	
<b>10th percentile</b>	18	6		7005	125	
<b>25th percentile</b>	276	8		11006	130	
<b>median</b>	1281	14		21465	160	
<b>75th percentile</b>	2861	40		31118	180	
<b>90th percentile</b>	8166	131		36560	256	
<b>95th percentile</b>	11312	240		39100	329	
<b>99th percentile</b>	26842	466		39964	346	
<b>max</b>	36298	1050		40180	350	



ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Πίνακας Π.1.6 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων εκσκαφέα E1

E1	State statistics		2006				
Time measurements in minutes							
	BC		Down		Maintenance		Transfers
	up	down	up	down	up	down	up
<b>count</b>	842	843	1550	1551	42	44	107
<b>sum</b>	317982	25358	297092	52746	261624	9722	32704
<b>average</b>	377.7	30.1	191.7	34	6229.1	221	305.6
<b>standard deviation</b>	507.6	102.1	297	117.7	5921.1	134.3	404.6
<b>coefficient of variation</b>	1.34	3.39	1.55	3.46	0.95	0.61	1.32
<b>min</b>	2	2	2	2	858	40	6
<b>10th percentile</b>	16	4	10	6	1175	63	14
<b>25th percentile</b>	54	8	30	6	1372	108	19
<b>median</b>	182	12	86	10	4112	175	66
<b>75th percentile</b>	506	24	224	24	11198	339	555
<b>90th percentile</b>	946	50	492	56	13886	390	956
<b>95th percentile</b>	1400	76	728	112	15361	409	1211
<b>99th percentile</b>	2354	376	1411	424	23037	512	1394
<b>max</b>	3496	1790	3386	2400	27052	570	1424

Πίνακας Π.1.7 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων εκσκαφέα E2

E2	State statistics		2006				
Time measurements in minutes							
	BC		Down		Maintenance		Transfers
	up	down	up	down	up	down	up
<b>count</b>	1500	1501	3158	3159	40	41	4374
<b>sum</b>	464586	36212	407197	95993	415046	8596	442362
<b>average</b>	309.7	24.1	128.9	30.4	10376.2	209.7	101.1
<b>standard deviation</b>	419.2	98.7	179.4	107.2	7636.4	150.8	158.9
<b>coefficient of variation</b>	1.35	4.09	1.39	3.53	0.74	0.72	1.57
<b>min</b>	2	2	2	2	1580	20	2
<b>10th percentile</b>	18	4	12	4	2741	54	12
<b>25th percentile</b>	60	4	26	6	5371	100	18
<b>median</b>	170	8	60	6	8496	170	42
<b>75th percentile</b>	403	14	150	16	11504	310	116
<b>90th percentile</b>	751	28	336	54	20147	390	240
<b>95th percentile</b>	1090	50	499	110	25997	410	384
<b>99th percentile</b>	1800	420	858	428	32987	638	910
<b>max</b>	6662	1790	2260	2400	33002	676	1392

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Πίνακας Π.1.8 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων εκσκαφέα E3

<b>E3</b>	<b>State statistics</b>		<b>2006</b>				
<b>Time measurements in minutes</b>							
	<b>BC</b>		<b>Down</b>		<b>Maintenance</b>		<b>Transfers</b>
	up	down	up	down	up	down	up
<b>count</b>	2026	2027	3211	3212	50	51	3026
<b>sum</b>	468686	43178	441402	68592	446064	10456	430536
<b>average</b>	231.3	21.3	137.5	21.4	8921.3	205	142.3
<b>standard deviation</b>	306.1	78.1	197.8	69.2	7477.9	177.5	207
<b>coefficient of variation</b>	1.32	3.67	1.44	3.24	0.84	0.87	1.45
<b>min</b>	2	2	2	2	350	6	2
<b>10th percentile</b>	14	4	14	4	2497	70	10
<b>25th percentile</b>	44	6	30	6	4071	115	16
<b>median</b>	128	10	64	6	6935	164	47
<b>75th percentile</b>	314	16	164	14	12158	234	200
<b>90th percentile</b>	566	32	348	36	15833	350	386
<b>95th percentile</b>	781	50	503	70	20824	480	544
<b>99th percentile</b>	1372	294	883	276	35260	882	1051
<b>max</b>	3442	1716	2966	1756	41630	1090	1404

Πίνακας Π.1.9 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων εκσκαφέα E4

<b>E4</b>	<b>State statistics</b>		<b>2006</b>				
<b>Time measurements in minutes</b>							
	<b>BC</b>		<b>Down</b>		<b>Maintenance</b>		<b>Transfers</b>
	up	down	up	down	up	down	up
<b>count</b>	1976	1977	3246	3247	42	43	2820
<b>sum</b>	461776	49044	435114	77994	410548	10272	315116
<b>average</b>	233.7	24.8	134	24	9775	238.9	111.7
<b>standard deviation</b>	310.4	98.3	195.1	65.2	7485.1	140.3	183.1
<b>coefficient of variation</b>	1.33	3.96	1.46	2.71	0.77	0.59	1.64
<b>min</b>	2	1	2	2	886	50	4
<b>10th percentile</b>	16	4	12	4	1311	101	14
<b>25th percentile</b>	42	6	30	6	4034	122	20
<b>median</b>	124	10	64	8	8378	208	40
<b>75th percentile</b>	299	16	150	16	13881	335	114
<b>90th percentile</b>	575	34	337	46	21192	416	292
<b>95th percentile</b>	840	56	528	90	22835	514	476
<b>99th percentile</b>	1422	355	952	308	28875	579	991
<b>max</b>	3428	2300	3206	1174	31200	596	1426

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ  
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ

Πίνακας Π.1.10 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων εκσκαφέα E5

E5	State statistics		2006				
Time measurements in minutes							
	BC		Down		Maintenance		Transfers
	up	down	up	down	up	down	up
<b>count</b>	806	807	2824	2825	29	30	1731
<b>sum</b>	407086	27210	362080	78786	310770	9294	319546
<b>average</b>	505.1	33.7	128.2	27.9	10716.2	309.8	184.6
<b>standard deviation</b>	639.1	114	212.9	77.5	8532.9	152.8	245.4
<b>coefficient of variation</b>	1.27	3.38	1.66	2.78	0.8	0.49	1.33
<b>min</b>	2	2	2	2	1352	74	2
<b>10th percentile</b>	26	4	12	4	2726	89	20
<b>25th percentile</b>	88	6	26	6	3976	173	30
<b>median</b>	282	10	54	8	8286	355	76
<b>75th percentile</b>	687	20	136	16	14024	401	236
<b>90th percentile</b>	1220	48	339	52	21758	469	534
<b>95th percentile</b>	1715	85	496	110	27986	567	745
<b>99th percentile</b>	2955	665	913	379	31563	598	1143
<b>max</b>	5708	1230	3972	1220	31590	606	1378

Πίνακας Π.1.11 Περιγραφική στατιστική – εκατοστημόρια, καταγραφές κρατήσεων εκσκαφέα E6

E6	State statistics		2006				
Time measurements in minutes							
	BC		Down		Maintenance		Transfers
	up	down	up	down	up	down	up
<b>count</b>	1326	1327	3514	3515	26	27	3205
<b>sum</b>	494122	31214	422605	97251	357490	6922	427193
<b>average</b>	372.6	23.5	120.3	27.7	13749.6	256.4	133.3
<b>standard deviation</b>	489.6	89.5	164.4	93.4	10294.2	249.4	179.2
<b>coefficient of variation</b>	1.31	3.8	1.37	3.38	0.75	0.97	1.34
<b>min</b>	2	4	2	2	1116	20	2
<b>10th percentile</b>	22	4	12	4	2670	52	20
<b>25th percentile</b>	70	4	26	6	6086	94	32
<b>median</b>	205	8	60	8	12065	136	70
<b>75th percentile</b>	484	14	142	16	18696	337	154
<b>90th percentile</b>	953	32	313	50	25843	696	314
<b>95th percentile</b>	1318	60	451	94	33614	815	496
<b>99th percentile</b>	1917	390	789	369	39647	833	932
<b>max</b>	6644	1540	2236	2310	41446	834	1434

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Πίνακες τιμών παραμέτρων θεωρητικών κατανομών

Πίνακας Π.2.1 Τιμές παραμέτρων θεωρητικών κατανομών, εκσκαφείς Ε1-Ε3

Distribution	GAMM			LOGN			WEIB		
	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	logmean	logstd	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$
DISTR_E1 BC_DOWN_time	2	28.1	1	2	23.2	43.5	2	20.2	0.72
DISTR_E1 BC_UP_time	2	375.7	1	2	1241	11876.9	2	302.5	0.7
DISTR_E1 BWE_maintenance_DOWN_time	39.9	181.2	1	39.8	283.9	671.5	3.8	190.4	1.2
DISTR_E1 BWE_maintenance_UP_time	856	5373.2	1	855.9	10319	49213.3	855.9	4648.6	0.8
DISTR_E1 BWE_non maint_DOWN_time	2	32	1	2	23	41.8	2	21.1	0.7
DISTR_E1 BWE_non maint_UP_time	2	189.7	1	2	573	5047.9	2	149.1	0.7
DISTR_E1 hub_interchange time	6	299.7	1	6	567.7	4271.2	6	196	0.6
DISTR_E2 BC_DOWN_time	2	22.1	1	2	13.1	21.9	2	12.6	0.7
DISTR_E2 BC_UP_time	2	307.7	1	2	836.6	5616	2	265.7	0.8
DISTR_E2 BWE_maintenance_DOWN_time	19.9	189.7	1	19.9	372.2	1193.4	19.9	196.6	1.1
DISTR_E2 BWE_maintenance_UP_time	1555.1	8821.1	1	1555.1	11903.3	22353.5	1555.1	9282.6	1.2
DISTR_E2 BWE_non maint_DOWN_time	2	28.4	1	2	18.1	37.6	2	15.8	0.6
DISTR_E2 BWE_non maint_UP_time	2	126.9	1	2	301.7	1796.4	2	106.9	0.8
DISTR_E2 hub_interchange time	2	99.1	1	2	97.3	185.6	2	85	0.8
DISTR_E3 BC_DOWN_time	2	19.3	1	2	14.8	24.3	2	13.8	0.7
DISTR_E3 BC_UP_time	2	229.3	1	2	870.7	8910.6	2	193.2	0.7
DISTR_E3 BWE_maintenance_DOWN_time	5.3	199.7	1	5.3	240.9	328.4	5.3	216.1	1.3
DISTR_E3 BWE_maintenance_UP_time	334.2	8587.1	1	334.2	11432.8	20272	334.2	9110.7	1.2
DISTR_E3 BWE_non maint_DOWN_time	2	19.4	1	2	13.3	22	2	12.8	0.7
DISTR_E3 BWE_non maint_UP_time	2	135.5	1	2	239.7	946.5	2	118	0.8
DISTR_E3 hub_interchange time	2	140.3	1	2	159.9	467.3	2	109.9	0.7

Πίνακας Π.2.2 Τιμές παραμέτρων θεωρητικών κατανομών, εκσκαφείς Ε4-Ε6

Distribution	GAMM			LOGN			WEIB		
	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	logmean	logstd	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$
DISTR_E4 BC_DOWN_time	1	23.8	1	1	16.1	22.7	1	16.4	0.7
DISTR_E4 BC_UP_time	2	231.7	1	2	597.8	3869.7	2	197.7	0.8
DISTR_E4 BWE_maintenance_DOWN_time	50	188.9	1	50	394.1	1291.1	50	198.5	1.2
DISTR_E4 BWE_maintenance_UP_time	882	8892.8	1	882.2	17615	64346.3	882.2	8888.4	1
DISTR_E4 BWE_non maint_DOWN_time	2	22	1	2	15.8	27.6	2	15	0.7
DISTR_E4 BWE_non maint_UP_time	2	132	1	2	274.5	1351.9	2	112.8	0.8
DISTR_E4 hub_interchange time	4	107	1	4	106.8	241.6	4	85.6	0.7
DISTR_E5 BC_DOWN_time	2	31.7	1	2	22.1	49.8	2	18.1	0.9
DISTR_E5 BC_UP_time	2	503	1	2	1489	11493.4	2	427.3	0.7
DISTR_E5 BWE_maintenance_DOWN_time	73.9	235.9	1	73.9	648.1	3281.1	73.9	241.7	1.1
DISTR_E5 BWE_maintenance_UP_time	1309.8	9406.4	1	1309.8	12983.8	28543.8	1309.8	9551	1
DISTR_E5 BWE_non maint_DOWN_time	2	25.9	1	2	17.8	32.8	2	16.5	0.7
DISTR_E5 BWE_non maint_UP_time	2	126.2	1	2	371.7	2290.5	2	101.4	0.7
DISTR_E5 hub_interchange time	2	182.6	1	2	192.1	406.8	2	159.2	0.8
DISTR_E6 BC_DOWN_time	4	19.5	1	4	2070.2	10444970	4	3	0.3
DISTR_E6 BC_UP_time	2	370	1	2	1056	7478.4	2	320.1	0.8
DISTR_E6 BWE_maintenance_DOWN_time	19.5	236.9	1	19.5	362.8	1051.8	19.5	226.3	0.9
DISTR_E6 BWE_maintenance_UP_time	1114.8	12634.9	1	1114.8	48475.7	381643.6	1114.8	12484	1
DISTR_E6 BWE_non maint_DOWN_time	2	25.7	1	2	17	30	2	19.1	0.7
DISTR_E6 BWE_non maint_UP_time	2	118.3	1	2	329.6	1306	2	100.7	0.8
DISTR_E6 hub_interchange time	2	131.3	1	2	133.1	215.2	2	123.4	0.9

Πίνακας Π.2.3 Τιμές παραμέτρων θεωρητικών κατανομών, αποθέτες A1,A2,A3,K,KB

Distribution	GAMM			LOGN			WEIB		
Parameters	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	logmean	logstd	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$
DISTR_A1_maintenance_DOWN_time	20	178.5	1	19.8	289.7	590	19.7	194.9	1.6
DISTR_A1_maintenance_UP_time	1251	11553.4	1	1251	15696.9	31463.6	1251	11967.1	1.1
DISTR_A1_non maint_DOWN_time	2	35.7	1	2	26.3	38.4	2	26.3	0.7
DISTR_A1_non maint_UP_time	2	245.6	1	2	1058.4	14346.9	2	192.2	0.7
DISTR_A2_maintenance_DOWN_time	69.9	123.3	1	69.7	258.6	965.6	69.7	258.6	965.6
DISTR_A2_maintenance_UP_time	1229.9	9088.3	1	1229.4	22179.6	99364.2	1229.4	9088.9	1
DISTR_A2_non maint_DOWN_time	4	30.7	1	4	38.6	154.4	4	19.5	0.7
DISTR_A2_non maint_UP_time	2	184.1	1	2	928	16420.2	2	184.1	1
DISTR_A3_maintenance_DOWN_time	49.9	144.9	1	49.7	196.3	348.7	49.7	156	1.3
DISTR_A3_maintenance_UP_time	1169.9	7065.7	1	1169.7	17433	80536.6	1169.7	7053.6	1
DISTR_A3_non maint_DOWN_time	2	36.7	1	2	27.2	41.4	2	27	0.7
DISTR_A3_non maint_UP_time	2	169.6	1	2	710	9423.3	2	131.3	0.7
DISTR_K_maintenance_DOWN_time	185.3	219.4	1	185.2	286.5	454.9	185.2	238.4	1.9
DISTR_K_maintenance_UP_time	5369.7	9755.5	1	5369.7	98193.9	2437758	5369.7	9282.8	0.9
DISTR_K_non maint_DOWN_time	2	32.1	1	2	25	34.6	2	25.6	0.8
DISTR_K_non maint_UP_time	2	300	1	2	763.5	4702.6	2	264.3	0.8
DISTR_KB_maintenance_DOWN_time	38.8	44.9	3	38.8	138	84	38.8	152.3	2.1
DISTR_KB_maintenance_UP_time	4139.9	17465.6	1	4239.4	264647	10479393	4139.4	16684.8	0.8
DISTR_KB_non maint_DOWN_time	4	47.8	1	4	94.6	786.1	4	28.1	0.6
DISTR_KB_non maint_UP_time	2	2878.4	1	2	126123.7	31699847	2	1725	0.5

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Αποτελέσματα των επιμέρους επαναλήψεων κάθε προσομοίωσης**



Πίνακας Π.3.1 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP1

Frequencies EMP1		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E1</b>	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	20.54	19.25	19.02	19.51	23.83	20.31	18.99	22.98	23.88	20.81
	down	15.03	14.17	17.45	17.23	15.79	15.07	15.41	15.40	15.86	14.42
	excavating	53.59	55.76	52.70	52.33	49.74	53.44	54.52	50.90	49.38	54.44
	maintenance	3.04	2.89	3.04	3.13	2.93	3.37	3.37	2.94	3.22	2.61
	material change	1.02	1.14	1.00	1.01	0.93	1.02	0.93	0.98	0.86	0.92
<b>E2</b>	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	17.83	17.78	18.37	17.40	16.56	19.74	17.21	17.02	20.22	19.54
	down	20.70	19.50	21.56	21.51	21.60	22.84	19.81	21.73	21.90	21.40
	excavating	53.44	54.47	51.88	52.76	53.06	49.34	54.60	52.85	49.50	50.66
	maintenance	1.75	1.96	1.96	1.94	2.36	1.93	1.99	1.93	2.17	2.12
	material change	2.58	2.58	2.53	2.69	2.72	2.44	2.69	2.76	2.51	2.58
<b>E3</b>	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	19.64	24.17	19.81	22.33	23.01	21.99	19.82	20.60	23.48	21.89
	down	14.64	17.03	16.02	14.01	14.87	15.44	15.17	15.27	13.63	14.92
	excavating	58.49	51.55	56.85	56.76	55.62	55.34	58.43	56.88	55.58	56.32
	maintenance	2.50	2.69	2.29	2.18	1.84	2.26	1.85	2.38	2.63	2.17
	material change	2.11	1.94	2.41	2.10	2.04	2.35	2.11	2.25	2.06	2.08
<b>E4</b>	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	19.45	20.78	20.35	20.15	19.19	18.89	20.45	22.05	22.78	20.32
	down	14.96	14.85	15.52	15.85	17.14	16.39	14.72	17.22	15.43	15.44
	excavating	58.04	56.92	56.85	56.33	56.26	57.31	56.93	53.87	54.97	57.05
	maintenance	2.23	2.10	2.05	2.57	2.07	2.14	2.60	1.72	1.89	2.01
	material change	2.67	2.70	2.59	2.46	2.70	2.62	2.65	2.49	2.28	2.54
<b>E5</b>	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	14.11	16.59	13.35	15.87	16.36	15.18	13.63	15.33	14.34	16.03
	down	16.45	15.40	16.87	16.34	17.41	18.28	18.87	16.21	16.84	15.85
	excavating	57.95	56.25	58.48	56.05	54.53	54.87	56.08	57.30	57.49	56.39
	maintenance	2.69	2.96	2.46	2.88	2.88	2.86	2.60	2.33	2.48	2.85
	material change	1.56	1.57	1.59	1.62	1.57	1.56	1.57	1.58	1.61	1.62
<b>E6</b>	annual maintenance										
	blocked	15.94	16.43	15.05	15.62	18.04	19.42	15.98	15.93	15.39	15.18
	down	23.54	21.78	22.71	20.77	22.43	20.17	21.17	21.17	23.41	22.61
	excavating	56.45	57.42	57.60	58.89	55.27	56.65	58.03	59.12	57.03	58.17
	maintenance	1.81	2.09	2.13	2.53	2.23	1.75	2.54	1.66	1.84	1.83
	material change	2.27	2.29	2.52	2.19	2.04	2.02	2.27	2.12	2.33	2.21

Πίνακας Π.3.2 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP2

<b>Frequencies EMP2</b>		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E1</b>	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	24.39	22.75	23.91	25.68	24.76	24.23	25.76	27.85	22.70	24.90
	down	27.07	31.00	28.88	28.22	30.18	28.04	25.28	27.98	31.52	31.25
	excavating	37.68	35.57	36.18	35.85	34.47	37.36	37.90	33.82	35.52	33.64
	maintenance	3.06	3.04	3.55	2.76	3.14	2.89	3.54	2.95	2.77	2.77
	material change	1.02	0.86	0.69	0.69	0.66	0.69	0.74	0.61	0.69	0.64
<b>E2</b>	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	19.38	20.56	20.10	22.18	22.00	21.60	22.15	21.19	20.22	21.94
	down	40.14	34.24	38.77	41.59	36.64	38.28	39.82	40.34	40.75	35.94
	excavating	33.59	38.00	33.54	29.22	34.26	33.21	31.46	31.59	32.03	35.05
	maintenance	1.84	2.00	2.48	1.89	1.92	1.70	1.55	2.02	2.04	1.93
	material change	1.34	1.50	1.40	1.41	1.47	1.50	1.31	1.16	1.26	1.44
<b>E3</b>	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	30.05	27.07	25.70	28.72	29.92	27.32	29.75	28.87	25.67	29.45
	down	24.48	26.05	28.12	27.14	27.53	27.36	25.58	28.61	31.43	23.60
	excavating	40.06	41.08	40.02	37.81	36.97	39.23	38.96	36.20	36.60	40.56
	maintenance	1.39	1.85	2.27	2.40	1.71	2.19	1.84	2.55	2.08	2.42
	material change	1.40	1.33	1.28	1.31	1.26	1.28	1.25	1.15	1.59	1.35
<b>E4</b>	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	30.35	31.64	29.77	30.01	33.01	29.72	33.39	36.87	31.65	32.93
	down	21.74	23.34	22.32	24.41	21.54	17.74	19.09	20.72	22.32	21.42
	excavating	41.62	38.85	40.66	38.92	38.99	45.94	41.32	35.24	39.45	39.37
	maintenance	2.15	2.06	2.96	2.49	2.22	2.33	2.00	2.59	2.07	2.05
	material change	1.50	1.47	1.64	1.53	1.61	1.62	1.54	1.95	1.85	1.59
<b>E5</b>	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	21.70	23.47	20.43	22.14	22.55	21.92	22.23	23.40	24.84	20.77
	down	18.24	18.87	19.33	16.69	18.37	18.55	17.14	15.86	15.27	19.05
	excavating	48.92	46.27	49.28	50.03	48.02	48.67	49.42	49.65	49.23	48.75
	maintenance	2.64	2.82	2.57	2.64	2.65	2.39	2.75	2.59	2.22	3.00
	material change	1.26	1.32	1.14	1.26	1.16	1.22	1.22	1.25	1.19	1.19
<b>E6</b>	annual maintenance										
	blocked	22.44	18.69	17.22	17.27	22.59	18.78	21.18	20.08	19.17	22.94
	down	37.94	39.60	34.56	41.77	36.31	35.27	41.74	36.92	36.02	37.20
	excavating	36.25	38.60	45.27	37.26	37.78	42.80	34.12	38.83	40.97	36.80
	maintenance	1.93	1.95	1.55	2.40	2.02	1.76	1.76	2.26	2.53	1.93
	material change	1.44	1.16	1.38	1.29	1.31	1.39	1.20	1.91	1.31	1.13

Πίνακας Π.3.3 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP3

<b>Frequencies EMP3</b>		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E1</b>	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	25.67	28.19	25.11	26.76	30.23	29.70	24.75	27.90	26.85	25.41
	down	35.34	36.18	34.76	36.98	28.24	32.27	37.36	35.15	37.18	36.43
	excavating	29.24	25.58	30.52	25.53	31.08	28.39	27.76	26.57	26.04	28.27
	maintenance	2.35	2.75	2.27	2.99	2.86	2.19	2.79	2.83	2.59	2.58
	material change	0.61	0.51	0.55	0.94	0.81	0.66	0.55	0.75	0.55	0.52
<b>E2</b>	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	23.22	19.35	23.02	22.29	20.84	20.74	19.89	22.13	20.99	18.37
	down	42.26	46.71	45.12	43.85	46.67	47.41	47.49	41.51	45.98	47.50
	excavating	27.91	27.26	25.27	27.45	25.98	25.37	25.47	28.90	26.33	27.40
	maintenance	1.93	2.21	1.98	1.56	1.99	2.04	2.67	2.73	2.17	1.77
	material change	0.97	0.76	0.91	1.16	0.82	0.74	0.77	1.02	0.83	1.25
<b>E3</b>	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	33.68	28.50	32.57	30.12	31.23	33.05	32.04	32.23	31.80	28.70
	down	31.60	34.95	30.83	33.46	31.55	34.90	33.62	29.69	31.03	37.16
	excavating	28.72	30.70	30.66	30.75	31.92	25.72	29.28	32.60	31.55	27.86
	maintenance	2.42	2.36	2.46	2.17	1.79	2.72	1.62	1.96	2.07	2.78
	material change	0.96	0.86	0.86	0.88	0.89	0.99	0.82	0.90	0.93	0.88
<b>E4</b>	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	42.28	38.73	38.71	39.31	36.68	38.02	34.77	39.16	34.52	39.71
	down	24.41	26.48	26.67	23.11	25.50	23.77	23.11	21.99	26.35	22.34
	excavating	27.87	28.17	28.98	31.24	32.24	31.59	36.08	32.84	33.09	32.20
	maintenance	1.94	2.27	1.93	2.14	2.01	2.58	2.41	2.44	2.33	2.30
	material change	0.84	1.71	1.07	1.55	0.92	1.39	0.99	0.92	1.06	0.81
<b>E5</b>	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	28.77	27.10	24.04	28.93	28.16	28.70	28.19	24.57	27.22	25.83
	down	19.75	20.77	20.99	21.50	17.59	18.75	22.23	21.59	18.78	20.79
	excavating	41.13	41.47	43.35	39.10	43.52	41.59	38.58	42.58	42.96	42.43
	maintenance	2.20	2.52	2.68	2.38	2.54	2.73	2.67	3.08	2.96	2.78
	material change	0.90	0.89	1.68	0.84	0.94	0.99	1.09	0.94	0.84	0.91
<b>E6</b>	annual maintenance										
	blocked	19.59	20.40	18.72	17.62	19.32	21.34	18.90	24.44	20.57	22.91
	down	47.24	47.99	48.31	49.31	45.89	43.03	48.54	46.52	45.60	45.69
	excavating	30.82	29.79	31.01	30.82	32.27	32.72	30.90	26.70	31.65	29.18
	maintenance	1.55	1.03	1.23	1.56	1.74	1.99	0.85	1.64	1.38	1.48
	material change	0.80	0.79	0.74	0.69	0.77	0.92	0.82	0.70	0.80	0.73

Πίνακας Π.3.4 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP4

<b>Frequencies EMP4</b>		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E1</b>	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	29.10	30.92	27.43	26.85	27.64	29.49	28.35	29.61	27.63	28.97
	down	31.71	34.42	38.43	38.81	39.20	34.00	36.59	37.03	37.32	36.50
	excavating	29.82	24.99	24.40	24.52	23.63	27.09	25.18	23.85	25.99	25.10
	maintenance	2.07	2.47	2.55	2.58	2.05	2.17	2.29	2.31	1.85	2.19
	material change	0.52	0.41	0.40	0.45	0.68	0.46	0.81	0.40	0.43	0.45
<b>E2</b>	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	20.64	23.12	20.07	18.89	17.14	20.56	19.79	20.49	21.03	21.36
	down	47.15	50.74	51.18	51.78	51.22	48.80	50.98	50.95	46.34	47.82
	excavating	26.29	20.11	22.32	23.20	25.78	24.69	23.20	22.74	26.74	24.45
	maintenance	1.74	1.37	2.30	1.97	1.71	1.76	1.93	1.64	1.68	2.04
	material change	0.47	0.96	0.41	0.46	0.43	0.48	0.39	0.46	0.51	0.62
<b>E3</b>	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	33.27	34.26	30.74	30.29	33.08	30.30	32.56	30.64	33.88	29.73
	down	34.08	32.37	36.84	34.12	30.94	35.56	34.74	33.78	34.01	36.42
	excavating	26.76	27.89	27.24	29.51	29.94	28.48	26.80	30.09	25.90	28.52
	maintenance	2.69	2.35	2.07	2.94	2.29	2.57	2.79	2.40	3.12	2.17
	material change	0.59	0.52	0.49	0.51	1.13	0.46	0.49	0.46	0.46	0.54
<b>E4</b>	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	42.90	40.13	41.71	37.47	39.39	39.94	36.22	38.98	37.52	36.50
	down	26.30	21.83	24.88	27.70	24.38	23.02	28.59	25.71	26.32	25.25
	excavating	25.66	32.84	28.01	29.63	31.15	31.75	29.97	30.14	30.69	32.46
	maintenance	2.02	2.01	1.75	2.03	1.89	2.06	2.07	1.99	2.17	2.15
	material change	0.46	0.55	1.01	0.53	0.55	0.58	0.50	0.52	0.66	0.99
<b>E5</b>	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	29.65	26.89	30.25	29.12	27.57	28.02	30.49	26.41	27.88	29.84
	down	20.16	22.26	20.56	21.70	22.92	24.28	22.52	22.11	24.50	18.82
	excavating	39.60	40.05	38.10	38.36	38.72	37.21	36.29	40.90	36.71	40.68
	maintenance	2.75	2.72	3.25	2.53	2.82	2.66	2.89	2.69	2.94	2.74
	material change	0.60	0.83	0.60	1.05	0.73	0.58	0.55	0.64	0.72	0.68
<b>E6</b>	annual maintenance										
	blocked	21.76	23.59	20.18	21.14	20.44	20.19	17.92	19.91	20.11	19.90
	down	49.70	44.48	50.25	49.45	48.84	48.40	52.88	47.69	47.59	49.84
	excavating	26.24	29.87	27.46	27.15	29.22	29.66	27.22	30.76	30.21	28.02
	maintenance	1.84	1.33	1.68	1.80	0.79	1.28	1.53	1.13	1.60	1.78
	material change	0.46	0.73	0.43	0.46	0.71	0.47	0.45	0.51	0.49	0.46

Πίνακας Π.3.5 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP5

Frequencies EMP5		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	27.78	27.22	27.77	26.99	27.41	28.33	28.02	27.87	30.72	26.94
	down	21.57	22.83	22.00	21.62	22.10	21.79	21.81	21.53	22.38	21.66
	excavating	41.67	40.99	41.17	42.42	41.53	40.82	41.20	41.62	37.95	42.43
	maintenance	1.95	1.94	2.04	1.94	1.94	1.95	1.94	1.96	1.94	1.94
	material change	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.33	0.23	0.24	0.21	0.23
E2	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	28.83	27.13	27.60	27.98	27.99	28.73	28.90	27.36	26.20	27.70
	down	32.19	32.46	32.66	32.01	32.38	31.49	31.96	32.44	31.92	31.91
	excavating	33.17	34.59	33.94	34.18	33.82	33.97	33.33	34.38	36.06	34.58
	maintenance	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82
	material change	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29
E3	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	35.21	28.63	28.37	29.08	28.46	32.08	27.93	29.39	29.55	29.29
	down	23.05	22.87	23.67	22.88	23.16	23.29	23.33	23.10	23.14	23.46
	excavating	36.49	43.21	42.68	42.75	43.10	39.32	43.46	42.23	41.89	41.93
	maintenance	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.38	2.35	2.35	2.35	2.39
	material change	0.28	0.32	0.31	0.31	0.32	0.30	0.31	0.31	0.45	0.31
E4	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	31.89	32.02	30.98	30.42	30.42	29.37	31.86	30.04	31.84	29.05
	down	23.57	23.60	23.47	23.72	23.78	23.60	23.76	23.70	23.84	23.48
	excavating	39.74	39.57	40.73	41.04	40.98	42.21	39.58	41.34	39.51	42.65
	maintenance	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
	material change	0.29	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.40	0.29	0.30
E5	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	24.80	27.41	25.94	25.27	25.79	24.84	25.78	24.25	25.49	25.39
	down	27.15	26.77	26.75	27.16	27.27	26.97	27.04	26.85	27.05	27.33
	excavating	38.72	36.39	37.97	38.22	37.59	38.85	37.84	39.55	38.12	37.93
	maintenance	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82
	material change	0.27	0.36	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
E6	annual maintenance										
	blocked	26.88	26.04	25.95	27.04	24.97	25.83	28.32	25.53	24.74	24.89
	down	31.77	31.85	31.85	31.54	32.04	31.75	31.74	32.28	31.93	32.24
	excavating	39.12	39.73	39.98	39.05	40.61	40.13	37.58	39.96	40.94	40.51
	maintenance	1.90	2.06	1.90	2.04	2.05	1.96	2.05	1.90	2.06	2.04
	material change	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.31	0.33	0.33	0.32

Πίνακας Π.3.6 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση EMP6

<b>Frequencies EMP6</b>		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E1</b>	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	25.87	26.96	28.17	23.11	27.73	27.45	27.51	25.56	24.29	25.26
	down	22.02	20.99	22.21	22.87	22.11	20.49	18.08	21.13	21.64	20.97
	excavating	41.86	41.84	39.68	43.79	39.98	41.85	44.21	42.84	44.24	43.69
	maintenance	2.72	2.60	2.41	2.68	2.66	2.72	2.71	2.83	2.21	2.57
	material change	0.74	0.83	0.74	0.76	0.73	0.71	0.70	0.84	0.83	0.71
<b>E2</b>	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	23.55	25.31	25.06	23.84	23.81	23.76	24.92	26.04	25.65	24.92
	down	31.32	29.24	29.88	30.20	29.47	27.90	29.35	31.37	28.73	30.44
	excavating	38.19	38.86	38.53	39.49	39.98	41.32	39.04	36.34	39.17	38.29
	maintenance	2.14	1.86	1.77	1.71	1.93	2.19	1.98	1.60	1.60	1.50
	material change	1.10	1.03	1.05	1.06	1.10	1.13	1.01	0.94	1.14	1.15
<b>E3</b>	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	31.26	29.16	30.23	26.92	25.51	27.67	27.66	27.03	26.80	25.88
	down	21.11	20.22	21.79	22.46	21.23	20.63	20.76	22.67	22.13	22.41
	excavating	42.36	44.71	42.53	44.38	46.52	45.94	45.54	43.99	44.91	45.92
	maintenance	1.64	2.01	1.87	2.61	2.91	2.08	2.38	2.69	2.49	2.13
	material change	1.01	1.28	0.95	1.02	1.20	1.06	1.04	1.00	1.05	1.04
<b>E4</b>	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	27.28	30.71	28.26	28.51	32.21	29.58	28.50	29.04	27.73	29.23
	down	21.58	21.20	22.04	19.92	22.95	22.11	22.62	21.34	21.21	21.28
	excavating	45.54	42.50	43.95	46.01	39.33	42.67	43.31	43.95	45.43	43.82
	maintenance	1.87	1.87	1.88	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
	material change	1.07	1.08	1.23	1.03	0.99	1.12	1.06	1.15	1.12	1.14
<b>E5</b>	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	21.43	21.22	24.31	22.09	24.66	21.64	20.67	26.06	21.61	24.95
	down	25.45	24.70	23.91	23.85	25.07	24.38	26.07	23.19	24.90	24.45
	excavating	42.32	43.36	41.01	43.70	39.87	43.14	42.87	39.97	42.81	39.94
	maintenance	2.62	2.67	2.51	2.22	2.30	2.77	2.26	2.77	2.60	2.60
	material change	0.94	0.81	1.03	0.90	0.86	0.83	0.89	0.77	0.83	0.81
<b>E6</b>	annual maintenance										
	blocked	23.62	23.07	23.28	22.22	22.59	22.40	23.70	23.62	22.25	23.64
	down	30.94	29.91	30.42	30.14	28.75	28.63	29.42	28.78	30.81	30.32
	excavating	42.81	43.63	43.61	44.95	46.27	46.34	44.16	44.95	44.10	43.87
	maintenance	1.54	2.28	1.69	1.57	1.34	1.42	1.64	1.62	1.60	1.17
	material change	1.09	1.11	1.01	1.12	1.04	1.21	1.09	1.02	1.24	1.00

Πίνακας Π.3.7 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση GMM

Frequencies GMM		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	21.41	18.65	18.57	19.45	18.44	21.75	18.06	19.17	19.26	19.21
	down	13.79	13.90	13.35	14.11	13.98	13.61	14.24	13.84	13.02	13.92
	excavating	54.02	56.09	56.91	56.06	55.99	53.21	56.41	56.03	56.63	56.04
	maintenance	2.84	3.43	3.24	2.39	3.59	3.55	3.39	2.94	3.16	2.85
	material change	1.15	1.13	1.14	1.19	1.20	1.08	1.11	1.22	1.15	1.18
E2	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	16.73	16.56	17.40	16.74	17.32	16.46	17.23	17.13	16.91	16.18
	down	18.27	17.44	18.55	18.08	18.55	17.99	18.14	18.48	18.16	17.55
	excavating	56.13	57.12	55.33	56.06	55.13	56.44	55.29	55.99	56.26	56.93
	maintenance	1.77	1.88	1.77	1.99	2.03	2.06	2.28	1.38	1.62	2.35
	material change	3.39	3.29	3.25	3.42	3.26	3.35	3.36	3.31	3.35	3.29
E3	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	21.93	18.90	18.81	21.62	18.21	18.21	18.86	18.27	18.45	17.78
	down	12.94	13.30	12.43	13.11	12.80	13.13	13.13	13.18	12.84	13.20
	excavating	57.51	60.87	61.46	58.43	61.38	61.52	61.24	61.79	61.55	61.33
	maintenance	2.66	1.78	2.24	1.86	2.50	1.94	1.65	1.59	2.03	2.56
	material change	2.34	2.53	2.44	2.36	2.49	2.57	2.50	2.54	2.51	2.51
E4	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	18.70	18.49	18.79	18.41	18.66	18.46	18.19	18.86	18.51	18.48
	down	14.63	14.75	14.35	14.40	14.79	14.01	14.87	14.28	15.12	14.11
	excavating	57.86	58.51	58.66	59.13	58.89	58.86	58.60	59.15	58.94	59.50
	maintenance	3.13	2.44	2.34	2.38	1.90	2.94	2.58	1.97	1.69	2.21
	material change	3.05	3.16	3.22	3.04	3.11	3.08	3.10	3.10	3.09	3.05
E5	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	13.74	17.46	15.27	13.61	13.68	14.83	17.63	13.57	14.64	13.62
	down	16.45	16.51	16.44	16.02	15.84	16.46	15.93	16.64	15.94	16.06
	excavating	58.72	54.90	56.90	58.42	58.10	57.23	54.85	57.95	56.78	58.43
	maintenance	1.99	2.17	2.30	2.85	3.27	2.40	2.63	2.73	3.49	2.78
	material change	1.86	1.71	1.84	1.86	1.86	1.83	1.70	1.86	1.90	1.85
E6	annual maintenance										
	blocked	15.11	15.45	15.66	15.55	15.20	15.20	14.48	15.69	15.57	14.81
	down	17.91	18.70	18.57	17.97	18.77	18.88	18.33	18.37	18.37	18.60
	excavating	62.21	61.40	61.11	62.24	61.62	61.40	62.42	61.10	61.95	62.49
	maintenance	1.99	1.69	1.96	1.49	1.67	1.87	2.05	2.10	1.39	1.32
	material change	2.78	2.76	2.71	2.73	2.74	2.65	2.72	2.75	2.72	2.78

Πίνακας Π.3.8 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση WEIB

Frequencies WEIB		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>E1</b>	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	17.54	17.97	16.70	16.97	17.24	16.16	17.21	17.18	17.71	16.94
	down	12.05	12.13	12.24	12.87	12.20	12.57	11.92	12.31	11.86	12.06
	excavating	58.78	59.74	59.18	58.30	60.18	60.29	59.76	59.83	58.75	59.91
	maintenance	3.67	2.26	3.89	3.89	2.40	3.04	3.23	2.85	3.80	3.27
	material change	1.18	1.11	1.20	1.18	1.20	1.16	1.09	1.04	1.09	1.03
<b>E2</b>	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	15.26	14.79	15.60	15.08	15.72	14.57	15.11	15.14	15.20	16.36
	down	15.89	15.05	15.37	15.58	14.77	15.41	15.57	15.80	15.29	15.67
	excavating	59.59	60.24	59.81	60.24	59.79	60.50	60.35	60.29	61.01	59.02
	maintenance	2.11	2.80	2.09	1.99	2.64	2.47	1.93	1.68	1.32	1.91
	material change	3.44	3.42	3.43	3.40	3.37	3.35	3.33	3.39	3.47	3.34
<b>E3</b>	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	16.26	17.00	20.59	17.68	17.29	16.31	16.99	16.91	16.27	20.86
	down	11.63	11.66	11.71	11.12	11.11	12.44	11.63	11.25	11.80	11.09
	excavating	64.43	63.41	60.40	63.82	64.19	63.70	63.97	64.06	64.83	60.65
	maintenance	2.49	2.81	2.19	2.21	2.09	2.39	2.17	2.57	2.07	2.39
	material change	2.57	2.50	2.50	2.56	2.69	2.55	2.62	2.58	2.41	2.39
<b>E4</b>	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	15.77	16.23	17.42	15.88	16.64	17.23	16.30	17.35	16.44	17.16
	down	13.04	13.00	13.46	13.11	13.79	13.45	13.49	13.63	12.83	12.96
	excavating	62.16	63.11	61.00	62.18	61.65	61.36	62.33	60.76	62.43	61.74
	maintenance	3.17	1.83	2.36	3.00	2.11	2.20	2.06	2.50	2.51	2.25
	material change	3.22	3.18	3.11	3.18	3.16	3.12	3.18	3.11	3.16	3.24
<b>E5</b>	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	12.45	12.72	13.63	12.03	13.20	12.85	12.59	12.42	12.51	12.51
	down	14.34	15.00	14.82	14.60	15.01	15.51	14.09	14.80	14.40	14.23
	excavating	61.98	60.61	59.55	60.93	60.19	60.05	61.79	60.42	61.16	61.45
	maintenance	2.14	2.60	2.86	3.30	2.48	2.47	2.42	3.20	2.80	2.70
	material change	1.84	1.82	1.90	1.89	1.87	1.88	1.87	1.92	1.88	1.86
<b>E6</b>	annual maintenance										
	blocked	16.65	16.47	16.84	16.17	15.91	15.97	15.79	14.71	17.26	16.18
	down	15.90	16.54	16.05	16.57	15.94	16.28	16.53	15.64	15.71	16.03
	excavating	62.59	62.44	62.23	62.78	63.79	63.01	63.36	64.75	62.30	63.85
	maintenance	2.27	2.00	2.36	1.84	1.74	1.98	1.69	2.27	2.03	1.22
	material change	2.59	2.55	2.52	2.64	2.62	2.76	2.64	2.63	2.70	2.73



Πίνακας Π.3.9 Συχνότητες καταστάσεων εκσκαφών – Προσομοίωση BESTFIT

Frequencies BESTFIT		Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	Replication	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1	annual maintenance	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79
	blocked	18.21	17.74	18.07	18.59	22.27	19.40	21.24	17.29	18.47	17.89
	down	10.67	10.40	11.11	10.84	10.77	10.23	10.13	10.93	10.37	10.63
	excavating	60.66	61.59	60.25	60.73	56.43	60.18	58.93	61.08	60.02	61.44
	maintenance	2.97	3.47	2.94	2.56	3.02	2.68	2.52	3.16	3.74	2.51
	material change	0.70	0.00	0.84	0.48	0.72	0.72	0.39	0.74	0.60	0.73
E2	annual maintenance	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
	blocked	14.48	15.84	15.12	17.08	15.66	15.52	16.75	18.83	18.11	14.75
	down	13.51	12.77	13.29	12.68	12.26	12.47	13.36	13.17	12.74	12.16
	excavating	63.20	62.63	62.71	61.50	63.01	62.67	61.12	59.14	60.53	63.91
	maintenance	1.66	1.70	1.92	1.74	2.04	2.34	1.80	1.92	1.64	2.01
	material change	3.44	3.35	3.27	3.31	3.34	3.31	3.28	3.25	3.27	3.47
E3	annual maintenance	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
	blocked	16.89	18.13	17.03	17.74	17.09	17.39	17.99	17.20	16.57	17.45
	down	9.60	9.72	9.74	9.42	9.87	9.93	10.42	10.27	9.81	9.38
	excavating	66.91	64.79	65.82	65.78	65.27	65.48	64.18	65.95	66.86	66.11
	maintenance	1.90	2.55	2.46	2.16	2.77	2.13	2.43	1.77	1.96	2.00
	material change	2.08	2.19	2.34	2.28	2.38	2.44	2.37	2.18	2.18	2.44
E4	annual maintenance	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
	blocked	16.51	20.10	17.76	17.27	17.77	17.80	17.52	16.28	15.73	16.34
	down	11.19	11.42	11.06	12.19	10.91	11.26	11.72	11.25	11.70	11.08
	excavating	64.12	60.22	62.69	62.24	64.13	62.74	62.04	64.68	64.05	64.74
	maintenance	2.30	2.60	2.72	2.43	1.66	2.62	3.06	1.92	2.56	2.17
	material change	3.24	3.01	3.12	3.23	2.88	2.93	3.01	3.24	3.32	3.03
E5	annual maintenance	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	blocked	12.04	13.41	12.39	13.51	14.07	12.67	15.37	12.76	12.61	13.18
	down	12.71	12.57	12.63	12.01	12.12	12.68	11.98	12.65	13.17	12.04
	excavating	62.99	62.25	63.43	62.48	61.97	62.54	60.54	62.71	62.31	63.50
	maintenance	3.18	2.68	2.43	2.96	2.68	3.03	3.18	2.75	2.88	2.27
	material change	1.83	1.85	1.87	1.79	1.92	1.83	1.70	1.89	1.79	1.77
E6	annual maintenance										
	blocked	16.13	18.04	15.67	20.93	16.39	16.50	17.20	17.42	16.04	16.29
	down	13.16	13.29	13.53	13.81	13.02	13.05	13.14	13.16	13.67	13.39
	excavating	66.25	64.25	66.43	61.33	65.97	66.66	64.64	64.17	65.72	66.22
	maintenance	1.73	1.84	1.76	1.42	2.03	1.10	2.51	2.37	1.83	1.53
	material change	2.73	2.59	2.60	2.50	2.60	2.69	2.52	2.88	2.73	2.58

Πίνακας Π.3.10 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση EMP1

Production EMP1	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	13,851,549	13,272,845	13,740,275	12,979,638	13,003,699	12,629,352	13,455,997	13,579,232	13,839,394	13,844,917
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	11,280,292	11,082,949	11,036,413	10,801,535	10,951,132	10,994,274	11,257,454	11,355,174	11,241,790	10,855,149
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	9,455,042.61	9,735,392.45	9,383,377.36	9,557,733.80	8,866,673.97	9,427,646.67	9,331,024.48	8,566,795.89	8,004,054.40	9,080,589.68
E1 total lignite m3	134,942.87	337,519.85	146,985.10	190,150.42	229,812.45	189,373.01	262,818.36	203,846.37	147,939.95	200,890.24
E1 total lignite t	161,931.84	405,019.41	176,380.10	228,173.90	275,773.96	227,245.55	315,382.68	244,617.68	177,530.06	241,068.52
E1 total waste m3	7,156,115.97	7,260,604.49	7,029,054.47	6,912,009.08	6,545,605.15	7,077,461.07	7,156,913.72	6,721,666.07	6,569,384.06	7,207,957.81
E2 total lignite m3	721,753.01	590,759.72	767,624.77	804,255.56	757,006.31	698,458.59	709,885.23	695,754.37	745,923.97	723,071.38
E2 total lignite t	866,102.73	708,907.59	921,162.95	965,111.93	908,416.95	838,144.96	851,859.43	834,910.63	895,121.90	867,691.24
E2 total waste m3	5,208,463.38	5,462,349.61	4,991,808.42	5,060,523.22	5,129,361.29	4,780,085.42	5,346,830.00	5,173,356.15	4,759,130.06	4,899,756.39
E3 total lignite m3	1,048,451.05	1,036,974.28	944,480.94	1,051,926.09	1,076,599.39	1,117,837.11	1,079,675.55	996,901.61	1,038,909.91	1,048,102.52
E3 total lignite t	1,258,157.23	1,244,367.61	1,133,376.56	1,262,323.13	1,291,908.37	1,341,396.81	1,295,608.82	1,196,295.05	1,246,695.72	1,257,706.50
E3 total waste m3	5,437,458.94	4,689,500.64	5,357,765.83	5,247,500.74	5,089,205.48	5,022,746.12	5,407,845.30	5,313,470.96	5,135,537.62	5,201,414.05
E4 total lignite m3	1,520,427.47	1,608,514.20	1,526,902.43	1,618,372.38	1,653,480.21	1,698,944.59	1,683,162.06	1,608,938.80	1,602,038.57	1,785,187.06
E4 total lignite t	1,824,509.29	1,930,217.05	1,832,278.29	1,942,056.73	1,984,179.07	2,038,726.44	2,019,787.05	1,930,715.45	1,922,451.52	2,142,230.23
E4 total waste m3	4,925,089.74	4,716,127.78	4,783,895.84	4,639,664.35	4,584,160.52	4,669,307.46	4,641,290.05	4,377,563.67	4,494,046.33	4,550,447.75
E5 total lignite m3	4,267,558.52	3,706,443.93	4,251,159.41	4,253,680.00	3,657,951.98	3,843,281.04	4,125,439.95	4,035,414.46	3,903,434.69	3,838,105.92
E5 total lignite t	5,121,067.37	4,447,731.72	5,101,381.66	5,104,436.01	4,389,496.48	4,611,967.27	4,950,510.39	4,842,508.76	4,684,098.66	4,605,722.35
E5 total waste m3	8,874,869.34	9,053,253.37	9,018,469.69	8,447,310.92	8,714,431.06	8,616,938.40	8,578,439.21	8,971,658.28	9,131,144.64	8,962,051.48
E6 total lignite m3	2,050,218.60	2,204,075.07	2,162,331.13	2,207,221.19	2,149,430.37	2,143,250.38	2,272,681.50	2,301,789.88	2,096,094.55	2,226,510.09
E6 total lignite t	2,460,261.09	2,644,889.43	2,594,780.78	2,648,666.19	2,579,313.70	2,571,903.19	2,727,203.50	2,762,144.32	2,515,314.72	2,671,803.22
E6 total waste m3	3,013,877.02	2,948,718.71	3,003,464.72	3,075,784.32	2,807,251.63	2,937,391.15	2,934,384.67	2,996,023.84	3,022,868.74	2,991,073.87
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	5,929,002.02	5,739,482.03	5,917,897.94	6,242,183.52	5,628,692.66	5,783,075.39	6,046,882.58	6,351,672.67	6,037,344.03	6,071,815.21
K total lignite t	7,114,802.84	6,887,371.73	7,101,429.74	7,490,624.79	6,754,392.62	6,939,706.06	7,256,226.64	7,622,032.08	7,244,793.19	7,286,175.98
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	3,777,809.94	3,734,406.72	3,858,817.22	3,839,784.82	3,875,402.00	3,886,535.76	4,066,034.41	3,482,698.73	3,495,691.76	3,742,556.67
KB total lignite t	4,533,379.01	4,481,283.75	4,630,608.38	4,607,776.46	4,650,473.11	4,663,837.80	4,879,229.71	4,179,230.67	4,194,852.27	4,491,052.72
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.11 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση EMP2

Production EMP2	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	9,922,133.04	9,074,867.41	10,325,118	9,007,700.64	9,797,244.70	9,681,625.30	9,344,581.31	8,719,622.64	8,965,585.73	8,968,076.45
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	8,357,131.14	8,891,236.88	7,453,207.17	8,090,297.51	7,854,713.95	8,194,940.14	8,316,109.24	8,506,887.86	7,986,864.22	8,006,097.56
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	6,524,538.57	6,280,006.01	7,456,053.19	6,555,028.24	6,256,729.36	7,308,059.60	6,968,845.05	6,664,712.21	7,208,111.95	6,990,359.44
E1 total lignite m3	87,429.83	151,003.69	152,470.44	187,347.24	115,192.06	97,998.75	80,506.47	121,609.71	152,994.36	82,729.38
E1 total lignite t	104,916.09	181,209.21	182,962.14	224,815.30	138,229.45	117,596.76	96,603.89	145,934.28	183,590.11	99,273.01
E1 total waste m3	5,036,508.35	4,708,840.44	4,788,974.84	4,706,016.85	4,575,401.22	4,978,426.69	5,065,728.07	4,483,252.02	4,697,347.81	4,481,732.40
E2 total lignite m3	424,049.53	537,077.64	460,253.55	375,598.62	478,809.34	422,389.04	429,307.22	529,083.16	526,817.26	535,186.76
E2 total lignite t	508,856.98	644,496.98	552,293.25	450,708.94	574,571.96	506,862.93	515,165.28	634,904.85	632,175.57	642,219.12
E2 total waste m3	3,299,487.20	3,692,758.55	3,255,770.37	2,872,572.55	3,323,930.82	3,279,719.79	3,061,641.32	2,984,745.40	3,037,845.22	3,372,369.72
E3 total lignite m3	825,124.93	787,471.93	806,863.50	767,806.07	867,068.98	741,770.12	819,491.57	592,740.33	769,428.88	912,576.75
E3 total lignite t	990,159.33	944,967.97	968,235.00	921,360.21	1,040,489.15	890,125.46	983,387.92	711,286.07	923,318.36	1,095,102.97
E3 total waste m3	3,609,841.98	3,780,876.91	3,630,187.63	3,428,981.20	3,230,545.39	3,606,843.18	3,505,996.11	3,441,362.42	3,299,868.70	3,605,617.39
E4 total lignite m3	1,203,629.51	1,278,549.45	1,203,014.63	1,194,417.78	1,026,206.79	1,403,841.64	1,248,562.27	964,871.01	982,961.92	1,041,637.01
E4 total lignite t	1,444,354.53	1,534,258.35	1,443,606.12	1,433,310.88	1,231,458.43	1,684,609.51	1,498,282.81	1,157,854.80	1,179,541.82	1,249,980.97
E4 total waste m3	3,407,636.59	3,028,678.52	3,323,895.12	3,132,512.73	3,316,669.93	3,705,927.48	3,339,635.45	2,937,282.20	3,398,583.58	3,338,584.23
E5 total lignite m3	3,434,516.10	3,181,652.91	3,264,497.93	3,697,099.17	3,281,615.67	3,389,351.34	3,184,635.27	3,143,094.33	3,364,004.10	3,638,449.65
E5 total lignite t	4,121,411.11	3,817,986.55	3,917,358.97	4,436,519.54	3,937,983.66	4,067,201.27	3,821,531.92	3,771,695.78	4,036,766.63	4,366,132.05
E5 total waste m3	7,627,440.55	7,334,859.36	7,931,715.29	7,649,909.56	7,575,447.69	7,668,334.75	8,005,078.73	8,125,352.15	7,802,453.92	7,413,053.71
E6 total lignite m3	1,282,319.05	1,537,775.31	1,634,407.22	1,316,589.21	1,412,824.84	1,626,063.20	1,278,724.08	1,435,319.89	1,626,495.62	1,413,503.15
E6 total lignite t	1,538,788.79	1,845,342.89	1,961,279.74	1,579,910.06	1,695,388.54	1,951,288.56	1,534,455.17	1,722,386.44	1,951,790.78	1,696,196.46
E6 total waste m3	1,962,068.69	1,935,836.28	2,436,151.19	2,016,375.86	1,987,322.26	2,217,562.63	1,789,673.38	2,040,334.67	2,050,219.89	1,888,280.31
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	4,052,890.96	4,142,656.94	4,296,663.10	4,023,940.41	4,163,033.02	4,607,441.92	4,181,011.38	3,272,141.67	4,134,823.65	3,654,901.96
K total lignite t	4,863,466.58	4,971,190.98	5,155,963.26	4,828,729.26	4,995,673.14	5,528,924.95	5,017,170.59	3,926,571.77	4,961,755.54	4,385,887.65
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	3,180,760.96	3,277,597.58	3,167,635.04	3,486,030.12	3,013,903.43	3,043,470.24	2,840,674.95	3,455,454.85	3,234,850.00	3,869,101.34
KB total lignite t	3,816,920.80	3,933,138.71	3,801,120.79	4,183,228.32	3,616,711.44	3,652,156.25	3,408,807.04	4,146,547.19	3,881,795.09	4,642,921.61
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.12 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση EMP3

Production EMP3	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	7,315,003.04	7,245,979.90	7,384,914.55	7,692,745.62	7,572,557.71	6,689,345.99	6,792,027.29	8,387,922.20	8,029,514.99	8,081,993.39
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	5,812,534.46	6,742,933.63	6,716,060.71	6,552,932.23	7,839,361.87	7,002,986.12	7,073,880.58	6,133,151.82	6,725,880.49	6,795,796.63
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	5,931,532.33	5,078,769.15	5,786,830.44	5,246,562.75	5,264,087.79	4,818,964.12	5,546,928.66	5,333,737.65	5,137,226.45	5,119,168.70
E1 total lignite m3	62,012.96	95,779.25	30,570.59	48,106.19	111,275.06	73,626.87	129,150.46	51,626.99	99,012.88	84,877.28
E1 total lignite t	74,417.80	114,933.49	36,685.15	57,726.44	133,529.55	88,357.25	154,977.60	61,951.84	118,814.56	101,850.93
E1 total waste m3	3,911,699.06	3,410,466.96	4,130,933.84	3,415,883.27	4,109,443.34	3,787,266.84	3,639,945.45	3,558,823.81	3,454,564.22	3,783,525.86
E2 total lignite m3	390,236.04	434,264.08	387,484.84	401,690.39	501,457.59	471,643.22	408,879.59	435,531.49	305,809.87	511,422.88
E2 total lignite t	468,278.01	521,111.49	464,980.49	482,024.17	601,738.66	565,976.95	490,650.54	522,643.02	366,969.22	613,706.45
E2 total waste m3	2,703,778.99	2,598,768.56	2,423,839.57	2,664,079.36	2,375,656.42	2,364,413.37	2,432,827.50	2,764,857.40	2,609,309.88	2,544,759.17
E3 total lignite m3	640,722.06	424,018.11	622,211.42	491,517.08	596,537.15	357,304.66	533,483.78	673,116.72	770,539.70	463,914.47
E3 total lignite t	768,868.31	508,821.70	746,656.29	589,822.07	715,842.00	428,759.43	640,180.01	807,732.14	924,637.57	556,700.25
E3 total waste m3	2,539,230.04	2,978,711.60	2,788,992.48	2,941,218.46	2,965,899.92	2,508,681.59	2,711,327.91	2,940,734.58	2,744,252.07	2,629,214.97
E4 total lignite m3	750,068.59	767,852.16	662,029.47	927,601.18	805,731.40	1,080,385.94	1,029,467.66	973,333.00	848,842.63	947,464.61
E4 total lignite t	900,079.21	921,425.97	794,444.84	1,113,105.16	966,871.56	1,296,466.68	1,235,380.53	1,168,003.55	1,018,604.56	1,136,962.57
E4 total waste m3	2,339,398.81	2,378,498.29	2,556,607.25	2,536,380.94	2,763,710.06	2,427,425.95	2,970,554.29	2,671,197.10	2,827,828.63	2,645,273.21
E5 total lignite m3	3,213,086.08	2,910,027.47	3,323,987.81	2,420,254.15	3,082,448.86	3,473,738.64	2,603,803.10	3,010,516.17	2,870,370.87	2,631,368.53
E5 total lignite t	3,855,729.14	3,492,046.14	3,988,752.73	2,904,268.95	3,698,930.58	4,168,471.52	3,124,542.79	3,612,589.07	3,444,453.81	3,157,627.03
E5 total waste m3	6,087,983.86	6,502,013.76	6,484,989.84	6,478,091.83	6,814,713.53	5,935,143.42	6,150,273.29	6,621,117.43	6,866,551.79	6,967,104.40
E6 total lignite m3	1,051,018.83	1,261,945.39	1,130,877.77	1,106,805.09	1,050,497.65	1,240,025.81	1,062,003.41	929,332.69	1,151,997.10	1,079,058.07
E6 total lignite t	1,261,226.32	1,514,328.25	1,357,069.28	1,328,162.71	1,260,607.28	1,488,049.54	1,274,414.55	1,115,203.06	1,382,382.09	1,294,884.81
E6 total waste m3	1,706,801.95	1,409,164.23	1,647,699.56	1,672,383.71	1,842,782.51	1,694,445.77	1,719,436.32	1,476,383.94	1,679,270.64	1,550,870.82
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	2,651,201.04	2,917,769.53	2,911,314.59	2,696,403.72	3,130,705.51	3,374,725.12	2,630,153.67	2,707,120.66	2,967,809.63	3,156,516.48
K total lignite t	3,181,460.14	3,501,322.97	3,493,572.83	3,235,676.70	3,756,829.44	4,049,687.88	3,156,207.88	3,248,534.57	3,561,366.95	3,787,804.71
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	3,408,182.62	2,955,537.83	3,160,680.41	2,684,142.88	2,937,795.33	3,280,099.74	3,058,743.26	3,333,423.66	3,034,144.36	2,474,245.47
KB total lignite t	4,089,825.56	3,546,648.92	3,792,820.52	3,220,920.06	3,525,354.33	3,936,112.81	3,670,469.86	4,000,094.01	3,640,953.98	2,969,117.41
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.13 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση EMP4

Production EMP4	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	7,301,959.17	6,574,755.13	6,459,560.84	6,745,825.60	6,895,975.49	6,157,624.36	6,012,191.32	6,277,647.04	7,071,092.02	6,681,399.70
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	6,342,141.00	6,799,024.44	6,874,213.46	6,505,637.71	6,560,794.28	6,313,782.05	6,640,915.61	6,530,300.38	6,174,934.74	6,337,723.58
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	4,767,242.31	4,628,268.90	4,300,417.15	4,493,861.67	4,617,380.33	5,527,698.41	4,418,901.67	5,219,844.26	4,545,208.81	5,448,841.63
E1 total lignite m3	114,292.71	77,469.65	93,079.62	41,521.88	75,827.89	126,808.40	129,409.99	30,156.38	82,790.69	47,243.96
E1 total lignite t	137,149.06	92,965.54	111,697.52	49,824.10	90,996.97	152,169.97	155,294.51	36,187.73	99,344.67	56,694.05
E1 total waste m3	3,936,112.43	3,348,216.23	3,220,647.28	3,288,981.05	3,133,309.80	3,555,693.14	3,322,132.72	3,232,326.14	3,443,955.70	3,361,701.29
E2 total lignite m3	386,271.88	279,996.66	365,052.50	399,117.20	434,339.07	504,048.08	415,164.58	384,307.49	497,576.32	341,583.71
E2 total lignite t	463,523.05	335,992.13	438,056.29	478,937.99	521,211.53	604,863.60	498,202.55	461,169.96	597,086.18	409,902.61
E2 total waste m3	2,527,932.72	1,965,267.34	2,111,484.54	2,171,379.55	2,431,979.44	2,237,675.09	2,155,564.72	2,147,608.44	2,471,399.22	2,366,206.45
E3 total lignite m3	511,839.23	585,507.13	614,032.05	603,933.93	572,490.24	567,082.07	565,005.69	470,633.17	603,139.75	530,933.15
E3 total lignite t	614,208.06	702,612.56	736,834.06	724,717.58	686,989.75	680,498.84	678,019.62	564,760.29	723,766.79	637,123.55
E3 total waste m3	2,454,884.53	2,530,926.96	2,402,077.20	2,673,849.56	2,746,887.12	2,596,139.09	2,431,429.51	2,862,192.33	2,278,378.86	2,656,468.60
E4 total lignite m3	716,496.65	943,419.94	677,933.67	829,505.79	932,836.23	883,551.18	915,876.20	948,801.70	928,025.28	1,021,897.69
E4 total lignite t	859,793.63	1,132,097.02	813,531.40	995,386.44	1,119,397.68	1,060,251.68	1,099,045.32	1,138,558.41	1,113,624.64	1,226,261.90
E4 total waste m3	2,126,962.47	2,699,291.42	2,446,700.64	2,457,899.56	2,536,002.46	2,638,562.45	2,412,556.05	2,405,518.42	2,478,312.76	2,573,596.76
E5 total lignite m3	2,782,198.22	3,033,353.67	2,613,074.76	2,555,928.48	2,902,709.50	2,923,728.17	2,751,777.02	3,300,034.04	2,657,345.83	3,029,078.95
E5 total lignite t	3,338,646.05	3,640,024.57	3,135,724.13	3,067,094.35	3,483,226.13	3,508,498.52	3,302,129.18	3,960,078.67	3,188,830.83	3,634,886.70
E5 total waste m3	6,174,216.83	6,081,053.48	6,049,880.56	6,134,921.16	5,886,362.68	5,530,945.36	5,508,067.66	5,948,763.71	5,666,923.54	6,188,605.86
E6 total lignite m3	891,236.02	1,050,214.11	918,039.13	1,166,210.99	1,048,104.40	971,093.39	973,926.35	1,089,308.56	1,032,273.74	979,158.30
E6 total lignite t	1,069,494.96	1,260,253.76	1,101,651.59	1,399,454.35	1,257,724.09	1,165,311.63	1,168,723.28	1,307,162.66	1,238,718.53	1,174,989.55
E6 total waste m3	1,456,139.05	1,635,966.02	1,541,562.67	1,262,349.91	1,568,917.84	1,683,599.00	1,465,766.56	1,677,970.64	1,669,699.42	1,529,358.50
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	2,287,030.75	2,767,779.11	2,495,248.27	2,760,017.56	2,769,345.88	2,850,346.91	2,348,474.52	3,006,473.78	2,588,675.83	2,252,642.83
K total lignite t	2,744,441.84	3,321,335.00	2,994,318.76	3,312,002.07	3,323,207.49	3,420,450.77	2,818,175.96	3,607,763.06	3,106,413.76	2,703,156.69
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	3,028,220.80	3,137,651.64	2,736,383.22	2,776,466.61	3,114,864.35	3,092,835.55	3,339,923.88	3,093,013.13	3,142,880.27	3,648,897.62
KB total lignite t	3,633,872.86	3,765,173.23	3,283,679.21	3,331,733.87	3,737,824.31	3,711,388.11	4,007,923.58	3,711,643.66	3,771,439.43	4,378,674.27
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.14 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση EMP5

Production EMP5	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	8,907,789.28	8,856,318.15	8,079,400.29	9,631,778.46	8,630,877.76	8,799,706.77	10,056,864	9,585,597.00	8,483,302.92	9,111,535.72
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	8,492,238.08	8,435,775.73	8,798,504.14	8,257,492.62	8,610,945.42	8,432,658.63	8,332,764.39	8,784,505.53	8,523,832.27	8,264,365.92
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	5,459,861.41	5,864,885.85	6,137,992.14	6,167,844.09	6,264,656.41	6,029,200.31	5,161,460.61	5,607,937.36	6,359,540.22	6,294,570.38
E1 total lignite m3	87,727.99	131,464.38	164,361.03	201,877.82	141,368.10	155,463.76	75,675.59	256,388.09	156,204.82	168,919.15
E1 total lignite t	105,275.71	157,756.78	197,227.50	242,251.97	169,643.47	186,564.21	90,812.08	307,665.03	187,445.45	202,701.30
E1 total waste m3	5,600,711.49	5,464,089.89	5,455,548.25	5,588,699.18	5,527,864.47	5,416,806.30	5,548,817.76	5,425,153.18	5,026,905.91	5,622,469.73
E2 total lignite m3	548,858.86	611,936.32	594,161.82	547,008.59	458,274.78	566,233.97	605,749.07	474,494.77	504,309.00	626,993.37
E2 total lignite t	658,633.31	734,329.75	712,986.97	656,409.60	549,934.26	679,473.45	726,902.59	569,387.12	605,168.80	752,388.43
E2 total waste m3	3,144,003.31	3,238,468.54	3,183,528.48	3,258,093.57	3,306,489.25	3,215,668.71	3,105,200.33	3,352,335.42	3,508,755.01	3,221,631.53
E3 total lignite m3	737,727.36	790,562.10	840,454.07	792,516.69	916,625.70	857,931.31	960,818.49	599,073.87	735,770.34	759,483.03
E3 total lignite t	885,273.89	948,673.60	1,008,532.34	951,021.05	1,099,959.88	1,029,520.68	1,152,968.40	718,896.04	882,923.70	911,381.79
E3 total waste m3	3,324,292.15	4,015,743.47	3,906,917.11	3,962,888.59	3,876,753.03	3,517,851.95	3,872,227.79	4,094,367.21	3,923,801.33	3,904,240.83
E4 total lignite m3	1,272,105.66	1,355,489.53	1,269,946.91	1,242,937.75	1,401,833.23	1,469,107.22	1,324,440.95	1,322,707.97	1,230,284.81	1,568,469.18
E4 total lignite t	1,526,532.69	1,626,589.93	1,523,933.60	1,491,518.30	1,682,205.03	1,762,917.23	1,589,322.98	1,587,257.07	1,476,332.14	1,882,154.98
E4 total waste m3	3,149,947.65	3,048,265.46	3,262,061.85	3,323,036.21	3,157,443.75	3,226,407.32	3,079,886.42	3,276,558.46	3,166,641.18	3,175,874.37
E5 total lignite m3	3,068,841.38	2,829,019.49	3,199,184.74	2,714,414.62	2,810,453.20	2,854,113.25	2,617,657.43	3,055,669.75	2,945,289.32	2,669,706.26
E5 total lignite t	3,682,598.58	3,394,837.28	3,839,007.57	3,257,292.54	3,372,563.06	3,424,943.35	3,141,182.23	3,666,798.12	3,534,342.88	3,203,681.56
E5 total waste m3	5,729,039.76	5,443,463.67	5,430,314.04	5,971,863.91	5,732,340.19	5,973,596.66	5,981,988.66	5,931,545.05	5,717,450.42	5,950,889.11
E6 total lignite m3	1,520,662.42	1,539,354.22	1,689,620.07	1,477,654.79	1,664,873.98	1,633,257.88	1,336,263.32	1,574,656.50	1,588,919.99	1,771,609.53
E6 total lignite t	1,824,799.22	1,847,232.43	2,027,540.60	1,773,181.00	1,997,857.40	1,959,906.78	1,603,510.58	1,889,583.38	1,906,696.41	2,125,937.34
E6 total waste m3	1,995,010.95	2,026,101.42	1,902,474.96	2,027,124.10	1,979,765.76	1,972,819.07	2,036,710.15	2,016,258.41	2,085,161.24	1,863,892.21
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	3,645,293.49	3,714,848.64	4,228,929.61	3,487,760.45	4,260,584.90	3,932,476.62	3,453,741.54	4,128,125.68	4,028,411.89	3,921,108.25
K total lignite t	4,374,341.47	4,457,836.71	5,074,703.81	4,185,285.36	5,112,729.62	4,718,953.52	4,144,462.53	4,953,754.14	4,834,087.11	4,705,330.21
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	3,584,403.02	3,526,959.27	3,521,533.91	3,471,773.22	3,125,746.26	3,584,492.62	3,463,069.99	3,147,476.55	3,115,706.94	3,643,664.09
KB total lignite t	4,301,300.24	4,232,359.91	4,225,808.06	4,166,137.28	3,750,915.48	4,301,407.60	4,155,684.30	3,776,965.20	3,738,830.30	4,372,425.50
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.15 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση EMP6

Production EMP6	Replication 1	Replication 10	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	9,589,229.07	9,689,962.74	9,747,357.03	9,609,146.31	9,974,613.61	9,446,611.56	9,859,276.32	9,795,984.74	9,128,289.35	9,610,804.48
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	8,604,193.44	9,101,748.18	8,270,840.22	8,157,380.09	9,102,851.05	8,171,979.88	8,622,238.78	9,280,459.21	8,523,390.20	9,433,763.91
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	7,222,458.40	6,746,683.84	7,533,786.26	7,223,769.80	7,487,272.61	7,497,760.27	7,372,618.06	6,957,702.82	7,640,535.47	6,695,526.00
E1 total lignite m3	129,113.76	91,796.01	186,770.14	215,507.83	104,571.28	224,275.84	206,926.46	215,239.42	177,414.71	155,549.65
E1 total lignite t	154,942.00	110,152.53	224,123.27	258,605.29	125,484.30	269,129.84	248,321.55	258,284.75	212,891.19	186,661.30
E1 total waste m3	5,564,149.45	5,854,370.70	5,512,958.55	5,195,825.92	5,849,078.79	5,227,346.52	5,491,776.00	5,798,027.16	5,653,024.90	5,878,846.59
E2 total lignite m3	528,640.36	596,036.74	559,643.80	564,823.54	477,561.11	560,680.41	746,796.25	526,549.13	549,247.51	573,892.15
E2 total lignite t	634,379.85	715,252.38	671,573.93	677,785.69	573,068.41	672,821.15	896,151.02	631,851.43	659,095.67	688,665.18
E2 total waste m3	3,707,001.93	3,662,230.05	3,763,708.04	3,712,849.62	3,908,503.25	3,875,321.11	3,849,801.76	3,813,759.42	3,478,280.86	3,771,230.14
E3 total lignite m3	788,143.99	894,499.33	790,061.83	680,616.58	792,643.13	857,601.10	908,810.21	836,434.78	715,685.72	821,944.70
E3 total lignite t	945,763.93	1,073,398.32	948,074.73	816,739.57	951,177.05	1,029,131.20	1,090,571.66	1,003,715.32	858,822.14	986,342.41
E3 total waste m3	3,918,628.08	4,195,074.35	4,176,829.09	4,032,870.24	4,136,783.88	4,317,328.09	4,200,435.93	4,227,917.81	4,169,504.19	4,161,296.25
E4 total lignite m3	1,485,572.29	1,250,249.01	1,330,459.36	1,478,153.63	1,404,045.99	1,282,179.81	1,266,629.14	1,278,111.13	1,388,309.66	1,446,029.24
E4 total lignite t	1,782,704.65	1,500,301.44	1,596,549.69	1,773,776.77	1,684,861.37	1,538,624.69	1,519,948.36	1,533,741.77	1,665,961.80	1,735,221.84
E4 total waste m3	3,563,918.34	3,615,477.61	3,386,372.03	3,409,896.58	3,692,297.85	3,087,073.30	3,472,231.25	3,532,486.81	3,491,946.99	3,590,965.87
E5 total lignite m3	2,901,307.51	2,977,092.47	3,375,730.15	2,831,545.53	3,219,125.30	2,885,793.17	3,163,066.27	3,141,477.53	2,799,279.18	3,421,237.07
E5 total lignite t	3,481,569.88	3,572,526.68	4,050,907.94	3,397,823.00	3,862,927.20	3,462,972.41	3,795,676.08	3,769,792.86	3,359,116.65	4,105,519.16
E5 total waste m3	6,684,325.07	6,060,364.70	6,458,965.31	6,459,298.44	6,705,374.88	6,154,895.37	6,606,059.11	6,591,745.32	6,269,530.07	6,278,555.08
E6 total lignite m3	1,738,311.36	1,672,109.78	1,564,463.89	1,686,081.87	1,650,962.12	1,624,398.16	1,813,549.52	1,812,781.91	1,721,299.00	1,785,454.15
E6 total lignite t	2,085,966.25	2,006,526.32	1,877,355.21	2,023,291.36	1,981,154.60	1,949,280.14	2,176,243.71	2,175,330.62	2,065,559.16	2,142,537.67
E6 total waste m3	2,094,753.54	2,269,351.62	2,352,602.48	2,223,754.52	2,382,019.17	2,529,513.11	2,340,801.99	2,153,351.62	2,305,993.05	2,178,483.49
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	4,011,107.33	4,176,939.03	4,265,974.86	4,576,671.35	4,113,139.66	4,002,052.90	4,377,005.70	4,058,207.82	3,810,298.25	4,569,466.76
K total lignite t	4,813,332.87	5,012,343.74	5,119,180.29	5,491,992.41	4,935,756.12	4,802,487.97	5,252,396.26	4,869,855.52	4,572,343.16	5,483,377.89
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	3,544,181.79	3,279,104.25	3,527,795.56	2,862,924.25	3,455,143.12	3,419,786.14	3,676,229.35	3,737,184.60	3,525,955.05	3,617,159.27
KB total lignite t	4,253,034.67	3,934,926.45	4,233,373.54	3,435,470.40	4,146,164.94	4,103,765.00	4,411,466.45	4,484,620.38	4,231,122.47	4,340,590.86
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.16 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση GMM

Production GMM	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	14,020,152	14,365,530	13,965,604	14,293,289	14,095,955	13,658,927	14,218,699	14,337,912	13,965,770	13,984,397
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	11,242,773	11,433,417	11,900,230	11,857,941	11,724,593	11,432,689	11,802,385	11,209,446	12,049,271	11,954,216
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	9,841,168.66	9,505,983.25	9,438,354.21	9,262,867.67	9,724,349.47	9,816,616.26	9,094,633.10	9,981,279.99	9,389,426.44	9,737,545.46
E1 total lignite m3	160,876.59	120,505.58	127,283.57	121,206.84	196,905.75	108,010.42	203,897.82	111,125.15	190,577.11	156,909.61
E1 total lignite t	193,049.81	144,611.98	152,741.43	145,445.09	236,287.55	129,613.28	244,675.08	133,348.34	228,693.13	188,294.26
E1 total waste m3	7,195,175.32	7,507,811.45	7,620,642.16	7,512,838.94	7,424,930.45	7,139,870.31	7,475,313.96	7,508,256.48	7,516,164.46	7,470,752.72
E2 total lignite m3	774,262.19	812,757.38	791,960.57	732,785.46	690,126.96	842,127.47	765,038.01	766,114.69	828,653.97	806,157.97
E2 total lignite t	929,112.56	975,310.88	950,354.40	879,342.67	828,148.69	1,010,545.40	918,053.26	919,338.79	994,372.79	967,389.82
E2 total waste m3	5,463,231.26	5,531,511.13	5,351,897.89	5,491,116.60	5,429,787.99	5,427,961.38	5,375,303.68	5,450,890.21	5,421,335.38	5,514,423.75
E3 total lignite m3	1,081,791.66	1,045,767.18	1,140,481.77	1,106,598.48	1,192,854.94	1,163,791.61	1,049,680.06	1,094,491.54	1,098,258.61	1,092,267.24
E3 total lignite t	1,298,149.52	1,254,916.24	1,368,568.05	1,327,922.99	1,431,421.29	1,396,547.78	1,259,621.70	1,313,392.67	1,317,915.95	1,310,731.38
E3 total waste m3	5,307,288.95	5,708,043.30	5,684,863.26	5,381,345.82	5,624,737.79	5,670,128.45	5,754,768.65	5,766,005.75	5,734,129.55	5,718,773.63
E4 total lignite m3	1,651,592.57	1,722,288.52	1,785,220.18	1,878,953.03	1,792,653.69	1,692,849.34	1,772,146.30	1,726,769.74	1,793,916.56	1,680,681.06
E4 total lignite t	1,981,926.67	2,066,733.87	2,142,265.30	2,254,750.14	2,151,169.45	2,031,421.60	2,126,586.96	2,072,127.63	2,152,708.45	2,016,816.27
E4 total waste m3	4,772,204.84	4,771,485.71	4,730,781.24	4,684,141.94	4,744,229.59	4,843,328.57	4,736,935.00	4,840,450.69	4,749,268.13	4,920,471.89
E5 total lignite m3	4,181,107.19	3,710,538.15	4,114,823.38	4,030,021.28	4,034,201.27	4,312,807.00	3,798,296.06	4,321,535.98	4,105,232.45	4,393,256.21
E5 total lignite t	5,017,342.58	4,452,627.25	4,937,797.20	4,836,053.01	4,841,035.83	5,175,363.48	4,557,929.85	5,185,819.97	4,926,237.88	5,271,930.81
E5 total waste m3	9,146,293.50	8,749,008.43	8,787,517.96	9,208,562.64	9,143,002.11	8,663,945.38	8,649,947.62	8,818,083.73	8,767,531.79	8,858,592.85
E6 total lignite m3	2,333,023.14	2,439,770.03	2,311,803.35	2,422,695.67	2,332,095.38	2,327,169.64	2,443,877.59	2,307,319.55	2,323,027.99	2,387,386.12
E6 total lignite t	2,799,621.73	2,927,721.73	2,774,166.77	2,907,238.62	2,798,508.09	2,792,596.76	2,932,650.94	2,768,773.61	2,787,640.38	2,864,856.84
E6 total waste m3	3,247,722.84	3,063,387.72	3,170,277.78	3,160,755.23	3,193,925.84	3,179,066.81	3,152,142.79	3,168,958.16	3,233,490.15	3,213,994.77
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	6,099,643.26	6,183,664.75	6,172,841.72	6,590,657.24	6,152,162.95	6,158,851.27	6,078,359.17	6,605,124.61	6,218,709.12	6,460,846.38
K total lignite t	7,319,590.19	7,420,375.82	7,407,419.01	7,908,803.43	7,382,565.25	7,390,594.27	7,294,026.09	7,926,146.92	7,462,438.00	7,753,025.77
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	4,081,149.15	3,660,689.16	4,082,489.23	3,680,477.75	4,073,080.14	4,283,190.17	3,948,319.85	3,700,564.10	4,113,435.51	4,051,250.26
KB total lignite t	4,897,379.54	4,392,819.43	4,898,983.77	4,416,597.94	4,887,692.94	5,139,837.29	4,737,983.42	4,440,655.29	4,936,104.51	4,861,519.62
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00



Πίνακας Π.3.17 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση WEIB

Production WEIB	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	15,445,401	14,517,775	15,036,022	14,763,232	15,339,752	14,130,776	15,001,221	13,829,507	15,459,799	14,414,645
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	11,970,075	12,464,563	12,313,361	12,415,345	12,124,138	12,722,445	12,218,890	12,891,750	12,239,389	12,800,440
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	10,357,468	10,672,926	9,971,952.42	10,550,918	9,948,862.10	10,037,416	10,700,357	10,407,589	10,519,781	9,911,010.86
E1 total lignite m3	114,264.69	172,943.46	168,879.64	152,593.78	232,993.83	207,427.93	180,147.17	193,727.97	201,419.53	244,180.25
E1 total lignite t	137,113.92	207,537.39	202,658.68	183,113.99	279,596.71	248,911.79	216,173.48	232,480.46	241,706.17	293,015.80
E1 total waste m3	7,877,571.90	7,963,098.10	7,888,379.53	7,770,494.50	7,951,706.58	7,988,308.38	7,951,930.11	7,943,147.50	7,797,571.91	7,908,485.98
E2 total lignite m3	764,383.04	811,848.57	804,733.24	775,391.50	808,835.03	789,564.76	833,657.86	823,079.76	784,264.49	786,952.32
E2 total lignite t	917,259.43	974,220.04	965,680.74	930,473.68	970,583.41	947,480.48	1,000,393.13	987,688.07	941,109.68	944,335.08
E2 total waste m3	5,852,612.68	5,876,364.51	5,839,603.23	5,909,504.48	5,827,314.64	5,928,299.93	5,865,716.15	5,866,708.16	5,987,358.75	5,769,076.72
E3 total lignite m3	1,108,386.27	1,195,426.26	1,115,230.09	1,132,698.21	1,159,966.92	1,162,206.59	986,907.13	1,255,929.50	1,127,629.71	1,180,654.39
E3 total lignite t	1,330,061.11	1,434,490.40	1,338,277.75	1,359,245.54	1,391,950.84	1,394,647.93	1,184,285.29	1,507,117.75	1,353,151.24	1,416,792.50
E3 total waste m3	6,047,646.33	5,843,326.38	5,590,418.38	5,949,786.82	5,969,876.39	5,914,084.37	6,113,935.67	5,858,661.80	6,068,030.64	5,553,851.67
E4 total lignite m3	1,935,630.05	1,816,289.94	1,774,760.51	1,773,260.63	1,881,482.14	1,895,876.50	1,893,890.69	1,828,136.04	1,663,358.77	1,780,766.61
E4 total lignite t	2,322,757.48	2,179,541.71	2,129,706.08	2,127,920.22	2,257,783.64	2,275,054.68	2,272,678.98	2,193,759.43	1,996,030.64	2,136,933.29
E4 total waste m3	4,962,426.15	5,190,927.16	4,991,807.36	5,128,868.19	4,965,518.31	4,912,102.29	5,024,762.88	4,917,149.97	5,268,957.69	5,073,067.76
E5 total lignite m3	4,348,932.05	4,225,750.25	3,888,608.13	4,140,589.06	4,391,411.56	4,698,058.59	4,226,743.43	4,567,489.92	3,899,982.68	4,387,488.67
E5 total lignite t	5,218,677.02	5,070,908.36	4,666,324.97	4,968,709.55	5,269,671.91	5,637,636.34	5,072,083.56	5,480,974.77	4,679,957.39	5,264,995.11
E5 total waste m3	9,715,792.62	9,518,655.45	9,610,572.59	9,679,758.07	9,262,693.34	8,924,756.61	9,790,340.80	9,128,431.52	9,956,566.54	9,556,947.82
E6 total lignite m3	2,270,056.11	2,321,120.98	2,166,593.01	2,324,132.10	2,257,401.01	2,392,771.38	2,479,233.66	2,361,049.56	2,408,220.71	2,425,719.35
E6 total lignite t	2,724,086.36	2,785,345.29	2,599,914.87	2,788,962.77	2,708,876.47	2,871,319.04	2,975,084.70	2,833,271.25	2,889,869.88	2,910,879.95
E6 total waste m3	3,343,884.66	3,280,911.87	3,409,174.88	3,304,576.92	3,459,617.19	3,256,088.47	3,199,565.33	3,445,069.96	3,180,957.03	3,300,156.41
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	6,299,822.54	6,593,279.33	6,344,114.86	6,526,065.31	6,542,322.78	6,882,981.21	6,769,714.40	7,129,350.16	6,194,312.54	6,409,568.56
K total lignite t	7,559,765.30	7,911,937.44	7,612,920.80	7,831,284.75	7,850,760.03	8,259,570.55	8,123,656.53	8,555,218.91	7,433,173.03	7,691,512.79
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	4,211,118.96	3,944,254.86	3,561,622.25	3,766,790.76	4,182,165.66	4,250,798.38	3,798,375.40	3,893,752.92	3,886,396.58	4,389,103.87
KB total lignite t	5,053,335.25	4,733,090.73	4,273,960.18	4,520,170.20	5,018,581.75	5,100,927.60	4,558,057.58	4,672,501.15	4,663,652.64	5,266,931.53
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

Πίνακας Π.3.18 Παραγωγές Κλάδων, Προσομοίωση BESTFIT

Production BESTFIT	Replication 1	Replication 2	Replication 3	Replication 4	Replication 5	Replication 6	Replication 7	Replication 8	Replication 9	Replication 10
A1 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1 total waste m3	14,876,863	15,750,377	15,962,601	15,260,209	14,856,520	15,548,115	16,348,447	15,550,458	15,507,153	15,708,905
A2 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2 total waste m3	12,357,599	14,235,687	12,627,246	12,648,286	12,133,311	11,866,186	12,608,947	12,605,620	12,758,506	12,387,238
A3 exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3 total waste m3	11,599,234	8,614,158.36	10,106,254	10,747,437	11,108,450	10,497,346	8,585,863.09	11,333,551	10,103,921	11,072,230
E1 total lignite m3	88,670.35	0	119,518.92	30,440.83	138,474.78	138,036.53	19,201.13	44,150.96	77,979.19	150,691.14
E1 total lignite t	106,407.52	0	143,424.35	36,530.63	166,175.37	165,646.30	23,042.20	52,979.91	93,577.80	180,828.66
E1 total waste m3	8,166,876.86	8,375,976.27	8,077,808.14	8,239,138.41	7,543,239.16	8,051,718.47	7,999,520.06	8,268,285.39	8,092,328.50	8,200,852.98
E2 total lignite m3	855,411.29	842,895.73	860,296.72	737,302.52	968,978.65	896,795.12	824,915.83	700,681.70	854,712.76	853,903.69
E2 total lignite t	1,026,493.87	1,011,465.68	1,032,361.96	884,765.64	1,162,773.54	1,076,143.24	989,905.10	840,817.82	1,025,659.07	1,024,681.14
E2 total waste m3	6,162,986.72	6,111,424.92	6,100,383.41	6,087,522.65	6,025,893.40	6,060,780.27	5,963,263.24	5,867,186.50	5,865,628.35	6,240,097.82
E3 total lignite m3	1,161,339.26	1,059,240.56	1,234,746.01	1,094,513.63	1,084,977.11	1,277,573.44	1,200,712.14	1,127,240.52	1,344,996.20	1,095,222.76
E3 total lignite t	1,393,600.85	1,271,083.59	1,481,701.68	1,313,412.56	1,301,961.89	1,533,087.84	1,440,851.34	1,352,696.13	1,613,990.68	1,314,275.09
E3 total waste m3	6,265,693.71	6,130,111.68	6,070,069.88	6,211,944.04	6,158,177.15	5,990,562.45	5,925,117.72	6,194,546.92	6,072,417.59	6,243,945.57
E4 total lignite m3	1,957,250.41	2,032,868.34	1,748,301.81	1,942,444.58	1,576,489.29	2,034,832.59	1,972,265.20	1,836,640.62	1,956,923.68	1,899,140.97
E4 total lignite t	2,348,713.37	2,439,433.84	2,097,971.31	2,330,948.47	1,891,789.44	2,441,785.79	2,366,720.71	2,203,970.46	2,348,307.11	2,278,966.09
E4 total waste m3	5,161,283.43	4,656,033.90	5,213,426.97	4,966,119.96	5,543,130.48	4,933,057.83	4,917,369.22	5,344,994.28	5,154,569.45	5,289,182.44
E5 total lignite m3	4,688,601.42	4,280,202.42	4,425,280.84	4,021,518.58	4,566,388.14	4,760,769.95	4,337,704.16	3,720,295.90	4,254,950.06	4,584,430.81
E5 total lignite t	5,626,292.96	5,136,242.64	5,310,335.40	4,825,839.53	5,479,659.59	5,712,938.99	5,205,257.45	4,464,353.90	5,105,925.74	5,501,311.29
E5 total waste m3	9,590,320.32	9,840,532.99	9,945,918.25	10,153,837	9,483,059.14	9,429,757.86	9,399,498.64	10,505,060	9,877,978.40	9,807,541.66
E6 total lignite m3	2,437,638.23	2,252,961.46	2,613,136.09	2,471,976.13	2,544,002.38	2,502,974.70	2,411,338.41	2,430,644.37	2,536,071.61	2,531,199.66
E6 total lignite t	2,925,172.28	2,703,553.97	3,135,751.89	2,966,371.87	3,052,784.21	3,003,563.67	2,893,604.21	2,916,775.52	3,043,277.74	3,037,458.44
E6 total waste m3	3,504,407.00	3,508,910.34	3,342,562.48	3,023,498.29	3,370,596.21	3,471,907.24	3,385,289.68	3,320,876.02	3,355,947.40	3,406,770.18
Final statistics time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00
K exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K total lignite m3	6,824,312.23	6,647,047.98	6,963,035.60	6,592,073.85	6,904,491.50	7,096,869.62	6,974,600.60	6,174,046.82	6,776,409.70	6,813,313.18
K total lignite t	8,189,162.48	7,976,422.55	8,355,644.94	7,910,501.98	8,285,356.65	8,516,218.58	8,369,532.27	7,408,852.70	8,131,693.43	8,175,988.86
KB exception m3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB total lignite m3	4,360,055.19	3,812,976.46	4,017,843.08	3,698,831.79	3,949,041.24	4,507,439.46	3,768,419.85	3,680,386.51	4,240,516.95	4,278,589.27
KB total lignite t	5,232,066.17	4,575,584.43	4,821,419.23	4,438,618.35	4,738,854.03	5,408,939.00	4,522,109.96	4,416,475.47	5,088,596.60	5,134,307.75
Simulation termination time	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00	527,040.00

