



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μέθοδοι Βελτιστοποίησης / Επιτάχυνσης  
Χρονοδιαγράμματος**



Εκπόνηση: Παπαδοπούλου Ευαγγελία  
Επιβλέπων: Παντουβάκης Πάρις

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

## **Περιεχόμενα**

<b>Περιεχόμενα.....</b>	<b>0</b>
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΠΙΝΑΚΕΣ.....</b>	<b>7</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....</b>	<b>8</b>
<b>Περίληψη.....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>10</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>11</b>
1.1 Σκοπός/Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	11
1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	11
1.3 Διατύπωση του προβλήματος που αντιμετωπίζει η διπλωματική....	12
1.4 Περιγραφή της εργασίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής.....	12
1.5 Περιορισμοί / Ευκαιρίες του περιβάλλοντος.....	12
1.6 Βασικά Συμπεράσματα.....	13
1.7 Οδηγός κεφαλαίων.....	14
1.8 Βασικές Έννοιες.....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Επιτάχυνση Χρονοδιαγράμματος Τεχνικού Έργου: Χρόνος, Κόστος &amp; Ποιότητα.....</b>	<b>19</b>
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Λόγοι επιτάχυνσης χρονοδιαγράμματος.....	19
2.2.1 Καθυστερήσεις Χρονοδιαγράμματος.....	20
2.2.2 Καθυστερήσεις στον ελληνικό χώρο.....	21
2.3 Επίδραση επιτάχυνσης στο κόστος και την ποιότητα του έργου.....	21
2.3.1 Διάρκεια τεχνικού έργου και κόστος.....	22
2.3.1.1 Είδη κόστους.....	22

2.3.1.2 Καμπύλη διάρκειας – κόστους κατασκευής τεχνικού έργου.....	23
2.3.2 Διάρκεια τεχνικού έργου και ποιότητα.....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:.....</b>	<b>26</b>
<b>Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Χρονοδιαγράμματος Έργου.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>26</b>
<b>A). Μέθοδοι βελτιστοποίησης Χρονικού Προγραμματισμού.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Συνεταιρισμός – Partnering.....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Γενικά – Ορισμός.....	26
3.2.2 Βήματα εφαρμογής.....	27
3.2.3 Πλεονεκτήματα – Οφέλη.....	28
3.2.4 Κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας.....	28
<b>3.3 Κρίσιμη Αλυσίδα (Critical Chain Project Management).....</b>	<b>29</b>
3.3.1 Γενικά.....	29
3.3.2 Προγραμματισμός με τη μέθοδο Κρίσιμης Αλυσίδας.....	30
3.3.3 Πλεονεκτήματα – Οφέλη.....	33
3.3.4 Προβλήματα – Περιορισμοί.....	34
<b>3.4 Fast track – Επιτάχυνση/Συμπίεση διάρκειας κατασκευής.....</b>	<b>35</b>
3.4.1 Γενικά – Ορισμός.....	35
3.4.2 Οφέλη / Πλεονεκτήματα.....	36
3.4.3 Προβλήματα / Περιορισμοί.....	36
3.4.4 Κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας.....	37
<b>B). Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Χρονοδιαγράμματος Τεχνικού Έργου.....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 Εντατικοποίηση χρονοδιαγράμματος με προσθήκη/αύξηση χρήσης πόρων (Crashing).....</b>	<b>38</b>
3.5.1 Γενικά – Ορισμός.....	38
3.5.2 Προβλήματα – Περιορισμοί.....	38
3.5.3 Εφαρμογή εντατικοποίησης χρονοδιαγράμματος.....	39
<b>3.6 Επιτάχυνση Γραμμικών Έργων χωρίς Αύξηση του Βαθμού Χρήσης των Μέσων Παραγωγής (Καλλαντζής και Λαμπρόπουλος, 2005).....</b>	<b>42</b>
3.6.1 Γενικά.....	42
3.6.2 Προτεινόμενη Μέθοδος Επιτάχυνσης Γραμμικών Έργων.....	43
3.6.2.1 Ομοιόμορφη μείωση έντασης μέσων παραγωγής.....	43
3.6.2.2 Διακοπές εργασίας σε υπολογιζόμενες θέσεις.....	44

3.6.2.3 Διακοπές εργασίας σε συγκεκριμένες θέσεις .....	44
3.6.3 Επίδραση της μεθόδου στο κόστος του έργου .....	45
<b>3.6.4 Συμπεράσματα .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7 Συγκριτική Αξιολόγηση .....</b>	<b>46</b>
<b>Γ). Μοντέλα Βελτιστοποίησης με εφαρμογή στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων .....</b>	<b>48</b>
<b>3.8 Γραμμικός Προγραμματισμός .....</b>	<b>48</b>
3.8.1 Γενικά .....	48
3.8.2 Ακέραιος και μικτός προγραμματισμός .....	49
<b>3.8.3 Ο Γραμμικός προγραμματισμός στη διαχείριση τεχνικών έργων .</b>	<b>50</b>
3.8.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου .....	51
<b>3.9 Βελτιστοποίηση με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks).....</b>	<b>52</b>
3.9.1 Γενικά .....	52
3.9.2 Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων .....	53
3.9.2.1 Βελτιστοποίηση με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων.....	53
3.9.2.2 Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization – ACO).....	55
3.9.2.3 Βελτιστοποίηση με Σμήνη Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO).....	56
<b>3.10 Προγραμματισμός χρήσης μέσων με περιορισμούς χρόνου.....</b>	<b>57</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:.....</b>	<b>59</b>
<b>Εφαρμογή GSO σε Προβλήματα Βελτιστοποίησης .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1. Εισαγωγή .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2: Περιγραφή αλγορίθμου Group Search Optimizer .....</b>	<b>60</b>
4.2.1 Γενικά.....	60
4.2.2 Ο παραγωγός (producer) .....	60
4.2.3 Οι τρακαδόροι (scroungers) .....	62
4.2.4 Τα περιφερόμενα μέλη (rangers).....	63
4.2.5 Η ροή του GSO .....	64

<b>4.3 Σύγκριση GSO με PSO, ACO.....</b>	<b>65</b>
<b>4.4 Εκτίμηση απόδοσης με Benchmark συναρτήσεις .....</b>	<b>66</b>
<b>4.4.1: Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (Benchmark functions).....</b>	<b>66</b>
<b>4.4.2: Ρύθμιση παραμέτρων αλγορίθμου GSO .....</b>	<b>67</b>
<b>4.4.3: Unimodal Συναρτήσεις .....</b>	<b>69</b>
<b>4.4.4: Multimodal Συναρτήσεις.....</b>	<b>71</b>
4.4.4.1 Multimodal Συναρτήσεις με πολλά τοπικά ελάχιστα.....	71
4.4.4.2 Multimodal Συναρτήσεις με λίγα τοπικά ελάχιστα .....	72
4.4.4.3 Multimodal Συναρτήσεις 300 διαστάσεων.....	74
<b>4.5. Παράμετροι ελέγχου .....</b>	<b>75</b>
<b>4.5.1: Ο αριθμός των producers .....</b>	<b>75</b>
<b>4.5.2 Το ποσοστό των rangers .....</b>	<b>77</b>
<b>4.5.3 Άλλοι παράμετροι ελέγχου .....</b>	<b>77</b>
4.5.3.1 Αρχική γωνία κεφαλής, $\varphi$ .....	78
4.5.3.2 Η μέγιστη γωνία αναζήτησης, $\theta_{\max}$ .....	79
4.5.3.3 Η μέγιστη γωνία στροφής, $\alpha_{\max}$ .....	80
4.5.3.4 Η μέγιστη απόσταση αναζήτησης, $l_{\max}$ .....	81
<b>4.6. Εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (GSOANN).....</b>	<b>82</b>
<b>4.6.1: Fisher Iris Dataset .....</b>	<b>83</b>
<b>4.6.2: Wisconsin Breast Cancer Dataset.....</b>	<b>85</b>
<b>4.6.3: Pima Indian Diabetes Dataset .....</b>	<b>86</b>
<b>4.8. Εφαρμογή στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων .....</b>	<b>87</b>
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα .....</b>	<b>90</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>93</b>

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 3.1: Γραφική παράσταση διάρκειας-κόστους τεχνικού έργου (Πηγή: Gray&Larson, 2008).....	22
Σχήμα 3.2: Γραφική απεικόνιση δραστηριοτήτων με τα buffer τους (www.salesprocessing.net).....	28
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα buffer έργου (www.salesprocessing.net).....	30
Σχήμα 3.4: Παράδειγμα buffer τροφοδότη (www.salesprocessing.net).....	30
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση μεθόδου fast track. Οι εργασίες χωρίζονται σε δύο πακέτα εργασίας που πραγματοποιούνται παράλληλα. (Πηγή: <a href="http://www.timeline-m.com">http://www.timeline-m.com</a> ).....	34
Σχήμα 3.6: Γράφημα κόστους – διάρκειας δραστηριότητας. (Πηγή: Gray C.F. & Larson E.W., 2008).....	40
Σχήμα 3.7: Απλό μοντέλο feed-forward νευρωνικού δικτύου (πηγή: <a href="http://http://www.mediamax.gr/articles">http://http://www.mediamax.gr/articles</a> ).....	50
Σχήμα 3.8: Διαδικασία Βελτιστοποίησης Γενετικού Αλγορίθμου.....	52
Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της συμπεριφοράς αναζήτησης τροφής των μυρμηγκιών (πηγή: <a href="http://www.wikipedia.org">http://www.wikipedia.org</a> ).....	53
Σχήμα 3.10: Μη ομαλοποιημένο διάγραμμα χρήσης πόρων. (Πηγή: <a href="http://www.pec.org.pk/sCourse_files/cec4_LEC2.PPT">http://www.pec.org.pk/sCourse_files/cec4_LEC2.PPT</a> ).....	56
Σχήμα 3.11: Ομαλοποιημένο (ιδεατό) διάγραμμα χρήσης πόρων. (Πηγή: <a href="http://www.pec.org.pk/sCourse_files/cec4_LEC2.PPT">http://www.pec.org.pk/sCourse_files/cec4_LEC2.PPT</a> ).....	56
Σχήμα 4.1 Pomoxis Annularis.....	59
Σχήμα 4.2 Πεδίο αντίχνευσης σε τρισδιάστατο χώρο.....	60
Σχήμα 4.2 Πεδίο αντίχνευσης σε τρισδιάστατο χώρο (πηγή:He et al., 2006).....	60
Σχήμα 4.3 Passer Domesticus.....	61
Σχήμα 4.4 Οι χαρακτηριστικές πορείες 5 τρακαδόρων κινουμένων προς τον παραγωγό (πηγή: He et al., 2009).....	61
Σχήμα 4.5 Panthera Leo.....	62
Σχήμα 4.6 Ο αλγόριθμος ACO, PSO.....	63
Σχήμα 4.7 Αριθμός εκτιμήσεων ανά τρέξιμο (*1000) για τις benchmark συναρτήσεις f1-f23.....	66

Σχήμα 4.8 Μέσος υπολογιστικός χρόνος (sec) (Σύγκριση GSO με GA, PSO).....	68
Σχήμα 4.9 Μέσος υπολογιστικός χρόνος (sec) (Σύγκριση GSO με GA, PSO).....	70
Σχήμα 4.10 Μέσος υπολογιστικός χρόνος (sec) (Σύγκριση GSO με GA, PSO).....	71
Σχήμα 4.11 Μεταβολή του καθολικού ελαχίστου με την αύξηση των producers (f8, f9, f10, f13).....	74
Σχήμα 4.12 Μεταβολή του καθολικού ελαχίστου με την αύξηση των rangers (f8, f9, f10, f13).....	75
Σχήμα 4.13 Επίδραση της αρχικής γωνίας κεφαλής φ.....	76
Σχήμα 4.14 Επίδραση της μέγιστης γωνίας αναζήτησης $\theta_{max}$ .....	77
Σχήμα 4.15 Επίδραση της μέγιστης γωνίας στροφής $\alpha_{max}$ .....	78
Σχήμα 4.16 Επίδραση της μέγιστης απόστασης αναζήτησης $l_{max}$ .....	79
Σχήμα 4.17 Σχηματικό διάγραμμα του GSOANN (He et al., 2009).....	80
Σχήμα 4.18 Τρία είδη αγριόκρινου: Setosa, Versicolour, Virginica.....	81
Σχήμα 4.19 Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ρυθμού σφάλματος.....	82
Σχήμα 4.20 Μέσος ρυθμός σφάλματος.....	82
Σχήμα 4.21 Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ρυθμού σφάλματος.....	83
Σχήμα 4.22 Μέσος ρυθμός σφάλματος.....	83
Σχήμα 4.23 Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ρυθμού σφάλματος.....	84
Σχήμα 4.24 Μέσος ρυθμός σφάλματος.....	84

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1: Σύγκριση Παραδοσιακών Μεθόδων.....	46
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (πηγή: He et al., 2009).....	65
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (multimodal, 300 διαστάσεις) (πηγή: He et al., 2009).....	65
Πίνακας 4.3: Μέσο καθολικό ελάχιστο των f1-f7 (Σύγκριση GSO με GA, PSO) (πηγή: He et al., 2009).....	68
Πίνακας 4.4: Μέσο καθολικό ελάχιστο των f1-f7 (Σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES) (πηγή: He et al., 2009).....	69
Πίνακας 4.5: Μέσο καθολικό ελάχιστο των f8-f13 (Σύγκριση GSO με GA, PSO) (πηγή: He et al., 2009).....	70
Πίνακας 4.6: Μέσο καθολικό ελάχιστο των f8-f13 (Σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES) (πηγή: He et al., 2009).....	71
Πίνακας 4.7 Μέσο καθολικό ελάχιστο των f14-f23 (Σύγκριση GSO με GA, PSO) (πηγή: He et al., 2009).....	72
Πίνακας 4.8 Μέσο καθολικό ελάχιστο των f14-f23 (Σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES) (πηγή: He et al., 2009).....	73
Πίνακας 4.9 Μέσο καθολικό ελάχιστο των f8-f13 (Σύγκριση GSO με GA, PSO, EP, ES) (πηγή: He et al., 2009).....	74



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πάρι Παντουβάκη, Διευθυντή του τομέα Διαχείρισης και Προγραμματισμού Τεχνικών Έργων ΕΜΠ, για την καθοδήγησή του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένειά μου και την φίλη μου Ευγενία για την συνεχή ηθική στήριξη που μου προσέφεραν σε αυτό το δύσκολο διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**  
**Διπλωματική εργασία: Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Χρονοδιαγράμματος**  
**Εκπόνηση: Παπαδοπούλου Ευαγγελία**  
**Επιβλέπων: Παντουβάκης Πάρις**  
**Συνεπιβλέπων: Καλλιάνης Διονύσιος**

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των κυριότερων μεθόδων βελτιστοποίησης χρονικού προγραμματισμού τεχνικών έργων, η συγκριτική τους αξιολόγηση και ο εντοπισμός της βέλτιστης. Αρχικά, αναλύθηκαν ο συνεταιρισμός, η κρίσιμη αλυσίδα και η ταχεία πορεία. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επιλογή της εντατικοποίησης των εργασιών και ειδικότερα η εξειδικευμένη περίπτωση των γραμμικών έργων, καθώς επίσης και τα μοντέλα βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού. Κατόπιν, η έρευνα πραγματεύεται την τεχνητή μάθηση και τη νοημοσύνη σμήνους. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι νοημοσύνης σμήνους έχουν κερδίσει έδαφος τα τελευταία χρόνια λόγω υψηλής απόδοσης, προσαρμοστικής ικανότητας σε πολύ διαφορετικές συνθήκες προβλημάτων (ευρεία εφαρμογή) και δυνατότητας να πραγματοποιούν βελτιστοποίηση πολλών κριτηρίων.

Θεωρώντας τη νοημοσύνη σμήνους ως την πιο αποδοτική, περιγράφεται με λεπτομέρεια η πιο πρόσφατη πρόταση των He, Wu, Saunders (2009), ο αλγόριθμος Group Search Optimizer (GSO). Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη συμπεριφορά κάθε μέλους και στη βέλτιστη τιμή των παραμέτρων του αλγορίθμου. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα αξιολόγησης με 23 benchmark συναρτήσεις (σύγκριση αριθμητικών με αναλυτικές τιμές) και εφαρμογής τεχνητών νευρωνικών δικτύων (σύγκριση μέσου σφάλματος) σε πραγματικά προβλήματα (γεωπονία, ιατρική) διαφόρων δημοσιεύσεων, παρουσιάζεται και τεκμηριώνεται εποπτικά μέσω πλειάδας σχημάτων και διαγραμμάτων (δημιουργήθηκαν με Excel) και επεξηγηματικών σχολίων, η αριθμητική υπεροχή του GSO έναντι των έως τώρα χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους (Αποικία Μυρμηγκιών, Σμήνη Σωματιδίων) και άλλων μορφών προγραμματισμού (εξελικτικού προγραμματισμού, στρατηγικών εξέλιξης, γενετικών αλγορίθμων). Διαπιστώνεται ότι η αριθμητική αυτή υπεροχή μεταξύ άλλων έγκειται στο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του GSO, που αποτελεί η παρουσία των περιφερόμενων μελών, τα οποία απεγκλωβίζουν τον αλγόριθμο από τοπικά ελάχιστα όχι μόνο κατά τις πρώτες επαναλήψεις αλλά καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσής του. Συνδυάζει με τον πλέον βέλτιστο τρόπο ακρίβεια και ταχύτητα επίλυσης, άρα αποδίδει καλύτερα από τους υπόλοιπους.

Η καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας έγκειται όχι μόνο στο ότι περιγράφει συγκροτημένα την πιο πρόσφατη πρόταση νοημοσύνης σμήνους (GSO) και αναλύει την αριθμητική της υπεροχή, αλλά κυρίως στο ότι επεκτείνει την εφαρμογή της σε προβλήματα βελτιστοποίησης τεχνικών έργων (βελτιστοποίηση σχέσης κόστους – χρόνου σε συνδυασμό με ορθολογική χρήση πόρων). Η πρόταση αυτή έχει βασιστεί σε μοντέλο γενετικού προγραμματισμού και προσαρμοστεί, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, στις απαιτήσεις του GSO.

**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND  
MANAGEMENT**

**Diploma thesis: Methods of Optimization of the time schedule**

**Submitted by: Papadopoulou Evangelia**

**Supervisor: Dr. John-Paris Pantouvakis**

**Co Supervisor: Kallianis Dionysios**

## **Abstract**

This thesis presents the main project time-cost optimization techniques, compares them and proposes the optimum one. Firstly, partnering, critical chain and fast track are analyzed. Then, project crashing (special attention to linear projects) and linear programming optimization models are presented. Finally, machine learning and swarm intelligence are examined. Swarm Intelligence Evolutionary Algorithms are quite popular the last decade due to their high computational performance, their adaptive ability to many different problem conditions (wide application) and their potential to optimize large number of parameters.

Considering swarm intelligence as the most efficient optimization model, the most recent (He, Wu, Saunders, 2009) swarm intelligence algorithm Group Search Optimizer (GSO) is described in detail. Special attention is given to each member's behaviour and to the optimum parameters' values of this algorithm. Results published in different papers from 23 benchmark function evaluations (comparison between numerical and analytical solutions) and from artificial neural network training (real world problems, comparing mean test error) have been used. These results have been processed via Excel and have been presented with a number of figures and graphs. This process proved that GSO is more numerical efficient than Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization and other algorithms such as evolutionary programming, evolutionary strategies and genetic algorithms. This advantage is created by GSO's special feature, the rangers. Rangers are dispersed from the initial population and perform random walks to avoid entrapments in local minima not only in the earlier search bouts but throughout the whole run. GSO combines with the optimum way numerical accuracy and computational robustness.

This thesis' innovation is that not only the most recent swarm intelligence paradigm (Group Search Optimizer) and its computational advantage are described thoroughly, but mainly that it presents an extended GSO application in project management optimization problems (time-cost trade off, resources).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή**

### **1.1 Σκοπός/Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- ο προσδιορισμός και η ανάλυση των κυριότερων μεθόδων βελτιστοποίησης χρονοδιαγράμματος τεχνικού έργου,
- η σύγκριση αυτών και
- η πρόταση ενός αποτελεσματικού μοντέλου βελτιστοποίησης χρονοδιαγράμματος.

### **1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας**

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση της βελτιστοποίησης χρονοδιαγράμματος τεχνικού έργου. Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας είναι οι παρακάτω:

- Κατανόηση των αιτιών που επιβάλλουν την επιτάχυνση του χρονοδιαγράμματος ενός τεχνικού έργου και των πλεονεκτημάτων που αυτή μπορεί να αποφέρει στα ενδιαφερόμενα μέρη.
- Μελέτη και κατανόηση της αλληλεξάρτησης μεταξύ διάρκειας χρονοδιαγράμματος, κόστους και ποιότητας έργου και περιορισμών.
- Παράθεση και συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων μεθόδων βελτιστοποίησης χρονοδιαγράμματος έργου.
- Παράθεση και συγκριτική αξιολόγηση εμπνευσμένων από τη φύση εξελικτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης και εφαρμογή στη διαχείριση τεχνικών έργων.
- Επιλογή μοντέλου βελτιστοποίησης.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου στο τεχνικό έργο.

### 1.3 Διατύπωση του προβλήματος που αντιμετωπίζει η διπλωματική

Ο διαχειριστής ενός έργου αναγκάζεται συχνά να μειώσει τον αρχικά προγραμματισμένο χρόνο ολοκλήρωσης ενός έργου καθώς έρχεται αντιμέτωπος με απρόβλεπτες καθυστερήσεις ενώ, πολλές φορές, υποχρεούται να συμμορφωθεί σε επιβληθείσες ημερομηνίες παράδοσης του έργου, που απαιτούν συμπίεση του τυπικού χρόνου υλοποίησης του. Η διαδικασία αυτή είναι συχνά πολύπλοκη και έχει συνέπειες στη διατήρηση του προγραμματισμένου κόστους και στην επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας. Κύριος στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης (χρόνος, κόστος).

### 1.4 Περιγραφή της εργασίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας γίνεται:

- εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση χρησιμοποιώντας: Επιστημονικά περιοδικά (π.χ. Journal of construction engineering and management, Construction Management and Economics, International Journal of Project Management κ.α.), βιβλία (π.χ. Διαχείριση Κατασκευών, Σημειώσεις Διαχείρισης Τεχνικών Έργων-τεύχος Α' κ.α.), πρακτικά συνεδρίων (π.χ. Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Advanced Management Science, Management and Service Science (MASS), 2010 International Conference κ.α.), ιστοσελίδες ( π.χ. <http://www.techrepublic.com> κ.α.), προηγούμενες διπλωματικές εργασίες που εκπονήθηκαν στον Τομέα (π.χ. Ανάλυση κυριότερων αιτιών χρονικών καθυστερήσεων στα Ελληνικά τεχνικά έργα και προτάσεις για την αντιμετώπιση τους)
- ανάλυση της σχέσης κόστους, ποιότητας και χρόνου.
- παρουσίαση και σύγκριση των κυριότερων μεθόδων επιτάχυνσης.
- παρουσίαση και σύγκριση των δημοφιλέστερων εξελικτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης
- επιλογή του καταλληλότερου εξ αυτών για την εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων και την εφαρμογή αυτών για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης τεχνικών έργων.
- αξιολόγηση της παραπάνω εργασίας, εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

### 1.5 Περιορισμοί / Ευκαιρίες του περιβάλλοντος

Στον ελληνικό χώρο δεν έχουν πραγματοποιηθεί, μέχρι την παρούσα χρονική στιγμή πολλές εκτεταμένες έρευνες ή/και εφαρμογές στο θέμα της βελτιστοποίησης της διάρκειας των τεχνικών έργων με τη χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ειδικά δε των εκπαιδευμένων με εξελικτικούς εμπνευσμένους από τη φύση αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Συνεπώς, η διπλωματική εργασία βασίζεται κυρίως σε ξένη βιβλιογραφία, η πρόσβαση στην οποία καθορίστηκε κατά το μεγαλύτερο βαθμό, στις δυνατότητες πρόσβασης σε άρθρα που παρέχονται μέσω της βιβλιοθήκης του Ε.Μ.Π.

## 1.6 Βασικά Συμπεράσματα

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της συνολικής διάρκειας και του συνολικού κόστους ενός τεχνικού έργου έχει απασχολήσει κατά καιρούς σε μεγάλο βαθμό τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση του προβλήματος αυτού, καθεμία από τις οποίες είναι κατάλληλη για συγκεκριμένο τύπο τεχνικών έργων.

Πρώτη κατηγορία μεθόδων. Τέτοιες μέθοδοι είναι ο συνεταιρισμός (partnering), η μέθοδος κρίσιμης αλυσίδας, η μέθοδος fast-track, η εντατικοποίηση με αύξηση των πόρων, η επιτάχυνση γραμμικών έργων χωρίς την αύξηση του βαθμού χρήσης των μέσων παραγωγής και η βελτιστοποίηση με γραμμικό προγραμματισμό.

Μία δεύτερη κατηγορία μεθόδων, πιο σύγχρονη και εξελιγμένη, που κερδίζει συνεχώς έδαφος, είναι τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία μπορούν να εκπαιδευτούν με πλειάδα γενετικών και εξελικτικών αλγορίθμων.

Η δεύτερη μέθοδος των νευρωνικών δικτύων είναι πιο εξελιγμένη και ακριβής. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα κατάλληλα δημοσιευμένα σε διάφορα papers αποτελέσματα και από την επεξεργασία τους αξιολογήθηκε πλειάδα αλγορίθμων βελτιστοποίησης, όπως εξελικτικοί αλγόριθμοι, γενετικοί αλγόριθμοι και στρατηγικές εξέλιξης, με ιδιαίτερη έμφαση σε εκείνους που έχουν εμπνευσθεί από τη συμπεριφορά των ζώων. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε συναρτήσεις αναφοράς (benchmark functions) τόσο μίας (unimodal) όσο και περισσοτέρων μεταβλητών (multimodal). Η αξιολόγηση αυτή απέδειξε ότι ο αλγόριθμος Group Search Optimizer εμφανίζει την καλύτερη απόδοση, δηλαδή συνδυάζει με τη μεγαλύτερη επιτυχία, ακρίβεια και ταχύτητα, σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων.

Μετά από την αξιολόγηση αυτή, προτείνεται η εφαρμογή του αλγορίθμου Group Search Optimizer για την βελτιστοποίηση της διάρκειας της κατασκευής του έργου.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία προτείνει την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης προγραμματισμού τεχνικών έργων με την εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks), τα οποία έχουν εκπαιδευτεί με τον εμπνευσμένο από τη φύση εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης (nature-inspired evolutionary optimization algorithm) Group Search Optimizer. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτείνεται έπειτα από ενδελεχή αξιολόγηση και σύγκριση με άλλους εμπνευσμένους από τη φύση αλγορίθμους βάσει ήδη δημοσιευθέντων αποτελεσμάτων στη διεθνή βιβλιογραφία. Ειδικότερα, γίνεται σύγκριση με αλγόριθμο βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (Ant Colony Optimizer), με αλγόριθμο βελτιστοποίησης με σμήνη (Particle Swarm Optimizer), με γενετικό αλγόριθμο (Genetic Algorithm), με συμβατικό και γρήγορο εξελικτικό προγραμματισμό (Conventional & Fast Evolutionary Programming) και με συμβατικές και γρήγορες στρατηγικές εξέλιξης (Conventional & Fast Evolutionary Strategies).

## **1.7 Οδηγός κεφαλαίων**

Κεφάλαιο 2: Επιτάχυνση Χρονοδιαγράμματος Τεχνικού Έργου: Χρόνος, Κόστος & Ποιότητα

Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι επιτάχυνσης χρονοδιαγράμματος έργου - Συγκριτική αξιολόγηση

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή GSO σε Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

## 1.8 Βασικές Έννοιες

**Τεχνικό έργο** είναι μία ακολουθία μοναδικών, συνθέτων και αλληλοσχετιζόμενων δραστηριοτήτων, οι οποίες στοχεύουν στην επίτευξη κάποιου συγκεκριμένου σκοπού. Όλες οι δραστηριότητες ενός τεχνικού έργου θα πρέπει να ολοκληρωθούν εντός περιορισμένου χρόνου και κόστους, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτούμενες προδιαγραφές ποιότητας. Τρεις γενικά αποδεκτές βασικές κατηγορίες τεχνικών έργων είναι τα οικοδομικά έργα, τα μεγάλα έργα υποδομών και τα βιομηχανικά έργα.

**Ο προγραμματισμός ενός τεχνικού έργου** καλύπτει το μεγάλο κενό που υπάρχει μεταξύ της φάσης του θεωρητικού σχεδιασμού και της φάσης της παραγωγής. Περιλαμβάνει την μετατροπή του στόχου και των μέτρων απόδοσης του έργου σε ένα εφικτό και λεπτομερειακό πλάνο, το οποίο καλύπτει θέματα τεχνικά, οικονομικά, οργανωτικά, επικοινωνίας, ελέγχου και χρονοδιαγράμματος. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι πρόκειται για μία δυναμική και εξελισσόμενη διαδικασία, η οποία συνδέει τους εναλλασσόμενους στόχους και την απόδοση με τα τελικά αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι ο προγραμματισμός δεν ολοκληρώνεται όταν ξεκινά η εκτέλεση καθώς η ανάγκη για αλλαγές είναι συνεχής.

**Διοίκηση – Διαχείριση** είναι η οργανωμένη διαδικασία που αποσκοπεί στην εκπλήρωση ενός ή περισσοτέρων στόχων. Κάθε μορφή επιτυχημένης διοίκησης πρέπει να περιλαμβάνει τις ακόλουθες τέσσερις δραστηριότητες:

- Καθορισμός σκοπού
- Σχεδιασμός
- Οργάνωση
- Έλεγχος, ώστε να επιτευχθεί η επιτυχής ολοκλήρωση του σκοπού του συγκεκριμένου έργου.

### Ως βελτιστοποίηση:

- στα μαθηματικά προβλήματα, ορίζεται η εύρεση των ακρότατων τιμών (ελάχιστης, μέγιστης τιμής) μιας συνάρτησης μίας μεταβλητής ή πολλών μεταβλητών. Ενώ στην ελαχιστοποίηση/ μεγιστοποίηση συναρτήσεων μίας μεταβλητής μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές και αλγεβρικές μέθοδοι για την ακριβή εύρεση ελαχίστων (ή μεγίστων), στην περίπτωση των συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι για έναν προσεγγιστικό ορισμό ελαχίστων (ή μεγίστων) σημείων.
- στα προβλήματα πολιτικού μηχανικού, ορίζεται η αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός συνήθως περίπλοκου συστήματος. Προβλήματα βελτιστοποίησης απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία πολιτικού μηχανικού, ένα από τα οποία είναι και η διαχείριση τεχνικών έργων.

**Χρονοδιάγραμμα** ονομάζεται ο πίνακας προθεσμιών της κάθε δραστηριότητας του έργου. Αποτελείται από μία λίστα τερματικών στοιχείων με τις επιθυμητές ημερομηνίες έναρξης και λήξης αυτών. Ως τερματικά ορίζονται τα χαμηλότερα στοιχεία του χρονοδιαγράμματος, τα οποία δεν υποδιαιρούνται και συχνά εκτιμώνται με βάση τις απαιτήσεις πόρων, τον προϋπολογισμό και την χρονική διάρκεια, ενώ συνδέονται με σχέσεις αλληλεξάρτησης και τελικά προγραμματίζονται.



**Μέθοδος CPM / Μέθοδος των κατά βέλη προσανατολισμένων δικτυωτών γραφημάτων :** Η μέθοδος CPM (Critical Path Method) είναι μία μέθοδος δικτυωτής ανάλυσης. Η μέθοδος CPM προέκυψε στα τέλη της δεκαετίας του '50 ως αποτέλεσμα ερευνητικής προσπάθειας με σκοπό τον προσδιορισμό της μέγιστης δυνατής μείωσης του χρόνου της κατασκευής με το ελάχιστο πρόσθετο κόστος. Τα βέλη, στη μέθοδο, συμβολίζουν δραστηριότητες και οι κόμβοι γεγονότα (δηλ. χρονικές στιγμές έναρξης και λήξης μιας δραστηριότητας). Με τη μαθηματική επίλυση του γραφήματος προκύπτουν οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης των δραστηριοτήτων και τα χρονικά περιθώρια καθυστέρησης που έχει κάθε δραστηριότητα. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι ο εντοπισμός των εργασιών που βρίσκονται στην κρίσιμη διαδρομή, δηλαδή των εργασιών που εάν καθυστερήσει η ολοκλήρωσή τους, θα καθυστερήσει και η ολοκλήρωσή του έργου. Παράλληλα εντοπίζεται η ελάχιστη δυνατή διάρκεια του έργου καθώς και τα σημεία στα οποία μπορούν να διεξαχθούν παράλληλες δραστηριότητες

**Μέθοδος LSM / Πρότυπο Γραμμικού σχεδιασμού:** Η μέθοδος LSM (Linear scheduling method) είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο προγραμματισμού που βελτιώνει το γραμμικό σχεδιασμό που βασίζεται στη μέθοδο CPM. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για τον προγραμματισμό των πόρων σε επαναλαμβανόμενες δραστηριότητες σε γραμμικά έργα. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου σε σύγκριση με την CPM, είναι ότι βασίζεται στην συνεχή χρήση των πόρων. Συγκεκριμένα ο προγραμματισμός των δραστηριοτήτων γίνεται ώστε να ισχύουν τα εξής: μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων, ελαχιστοποίηση των διακοπών/ενοχλήσεων σε δραστηριότητες που βρίσκονται σε εξέλιξη, ελαχιστοποίηση του φαινομένου της καμπύλης μάθησης. Δηλαδή, σε αντίθεση με την CPM, η ημερομηνία έναρξης μιας δραστηριότητας δεν είναι απαραίτητα η νωρίτερη δυνατή αλλά εκείνη που θα παρέχει συνεχή χρήση των πόρων.

**Γενετικός αλγόριθμος (Genetic algorithm)** Οι ΓΑ βασίζονται στην τυχαία ανασυγκρότηση ενός πληθυσμού και την αξιολόγηση των μελών του πληθυσμού μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας (Fitness ή Quality function), που σε προβλήματα βελτιστοποίησης ισούται με το άθροισμα της αντικειμενικής συνάρτησης και των παραβιάσεων των συναρτήσεων περιορισμού. Τα μέλη του πληθυσμού των ΓΑ κωδικοποιούνται σε δυαδική (binary) μορφή, ώστε να προσομοιάζουν καλύτερα τα βιολογικά χρωμοσώματα (strings). Με τη χρήση των γενετικών τελεστών του συνδυασμού και της μετάλλαξης, οι ΓΑ επιλέγουν το καλύτερο μέλος του πληθυσμού, δηλαδή αυτό που δίνει την καλύτερη τιμή στη συνάρτηση ποιότητας.

**Εξελικτικός αλγόριθμος (Evolutionary algorithm):** Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (EA) χρησιμοποιούν υπολογιστικά μοντέλα εξελικτικών διαδικασιών σαν βασικά στοιχεία σχεδιασμού και υλοποίησης υπολογιστικών συστημάτων επίλυσης προβλημάτων. Οι EA είναι αλγόριθμοι ανίχνευσης-αναζήτησης, βασισμένοι στη μηχανική της φυσικής επιλογής και της φυσικής γενετικής. Οι EA μιμούνται τις διαδικασίες βιολογικής εξέλιξης με την υλοποίηση των ιδεών της φυσικής επιλογής και της επικράτησης του ισχυρότερου, έτσι ώστε να παρέχουν αποτελεσματικές λύσεις σε προβλήματα αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

**Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies - ES)** είναι μία από τις πιο διαδεδομένες εξελικτικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Η μέθοδος μιμείται τη βιολογική εξέλιξη στη φύση και έχει δύο χαρακτηριστικά τα οποία την κάνουν να διαφέρει από τους συμβατικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης:

- Στη θέση των συνήθων αιτιοκρατικών (ντετερμινιστικών) τελεστών, η μέθοδος των ES χρησιμοποιεί τυχηματικούς τελεστές: μετάλλαξη (mutation), ανασυνδυασμό (recombination) και επιλογή (selection).
- Αντί της διερεύνησης ενός σημείου σχεδιασμού σε κάθε βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, η μέθοδος των ES δουλεύει ταυτόχρονα με έναν πληθυσμό σημείων σχεδιασμού μέσα στο πεδίο αναζήτησης.

**Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence)** είναι η συλλογική συμπεριφορά αποκεντρωμένων, αυτοοργανωμένων συστημάτων, φυσικών ή τεχνητών. Ο όρος αναφέρεται συνήθως στην γενικότερη ομάδα αλγορίθμων που προκύπτουν βάση αυτής. Η όλη ιδέα βρίσκει εφαρμογές στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Ο όρος εισήχθη από τους Gerardo Beni και Jing Wang το 1989, στο πλαίσιο των κυβελωτών ρομποτικών συστημάτων. Τα συστήματα νοημοσύνης σμήνους κατά κανόνα αποτελούνται από έναν πληθυσμό απλών παραγόντων που αλληλεπιδρούν τοπικά ο ένας με τον άλλον και με το περιβάλλον τους. Οι παράγοντες ακολουθούν πολύ απλούς κανόνες, και μολονότι δεν υπάρχει καμία συγκεντρωτική δομή ελέγχου να υπαγορεύει το πως θα πρέπει να συμπεριφέρονται οι παράγοντες μεμονωμένα, τοπικές - και έως ένα βαθμό τυχαίες - αλληλεπιδράσεις μεταξύ τέτοιων παραγόντων οδηγούν στην εμφάνιση μιας ευφυούς, παγκόσμιας συμπεριφοράς, άγνωστη στους μεμονωμένους παράγοντες. Παραδείγματα νοημοσύνης σμήνους αποτελούν οι αποικίες μυρμηγκιών, η συρροή πουλιών, η βακτηριακή ανάπτυξη και η εκπαίδευση ψαριών.

**Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks)** Το νευρωνικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο από απλούς υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες, νευρώνια), διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Είναι εμπνευσμένο από το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), το οποίο προσπαθεί να προσομοιώσει. Οι νευρώνες είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Το κύριο χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι η εγγενής ικανότητα μάθησης. Ως μάθηση μπορεί να οριστεί η σταδιακή βελτίωση της ικανότητας του δικτύου να επιλύει κάποιο πρόβλημα (π.χ. η σταδιακή προσέγγιση μίας συνάρτησης). Η μάθηση επιτυγχάνεται μέσω της εκπαίδευσης, μίας επαναληπτικής διαδικασίας σταδιακής προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου (συνήθως των βαρών και της πόλωσής του) σε τιμές κατάλληλες ώστε να επιλύεται με επαρκή επιτυχία το προς εξέταση πρόβλημα. Αφού ένα δίκτυο εκπαιδευτεί, οι παράμετροί του συνήθως «παγώνουν» στις κατάλληλες τιμές και από εκεί κι έπειτα είναι σε λειτουργική κατάσταση. Το ζητούμενο είναι το λειτουργικό δίκτυο να χαρακτηρίζεται από μία ικανότητα γενίκευσης: αυτό σημαίνει πως δίνει ορθές εξόδους για εισόδους καινοφανείς και διαφορετικές από αυτές με τις οποίες εκπαιδεύτηκε.

**Συναρτήσεις Αναφοράς (Benchmark Functions).** Πρόκειται για συναρτήσεις με πολύπλοκο μαθηματικό τύπο και με γνωστά ακρότατα (αναλυτικές λύσεις). Χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης ευρείας κατηγορίας αλγορίθμων.

**Κατά Pareto κριτήριο** είναι εκείνο το κριτήριο κατά το οποίο, μία μεταβολή στην τιμή ή στην ποσότητα βελτιώνει τη θέση κάποιου χωρίς όμως παράλληλα να χειροτερεύει τη θέση κάποιου άλλου. Με λίγα λόγια το κατά Pareto κριτήριο βεβαιώνει ότι υπάρχει βελτίωση της κοινωνικής ευημερίας στο σύνολό της αφού έχουμε την καλυτέρευση ενός ατόμου ή μιας ομάδας ατόμων χωρίς να χειροτερεύει η θέση κανενός άλλου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Επιτάχυνση Χρονοδιαγράμματος Τεχνικού Έργου: Χρόνος, Κόστος & Ποιότητα**

### **2.1 Εισαγωγή**

Η ανάγκη για μείωση της διάρκειας του έργου είναι συχνά επιτακτική και προκύπτει από διάφορες αιτίες, με σκοπό την επίτευξη κάποιου κέρδους. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή έχει συχνά αρνητικές επιπτώσεις και μπορεί να περιλαμβάνει απρόβλεπτες δαπάνες. Είναι σημαντικό, λοιπόν, να αξιολογούνται εκ των προτέρων οι επιπτώσεις σε κόστος και ποιότητα λόγω της μείωσης της διάρκειας του έργου. Για τον λόγο αυτό γίνεται συνήθως χρήση της γραφικής παράστασης κόστους και χρόνου. Οι καταστάσεις αυτές είναι πολύ συνηθισμένες στην πράξη και είναι γνωστές ως εξισορρόπηση κόστους και χρόνου.

### **2.2 Λόγοι επιτάχυνσης χρονοδιαγράμματος**

Οι παράγοντες και τα (φυσικά & νομικά) πρόσωπα που επηρεάζουν τη διάρκεια της κατασκευής είναι πολλά. Οι λόγοι που επιβάλλουν την επιτάχυνση του χρονοδιαγράμματος ενός τεχνικού έργου περιγράφονται στη βιβλιογραφία ως εξής:

«Η ανταγωνιστική φύση των επιχειρήσεων απαιτεί από τους ιδιοκτήτες να χρησιμοποιούν στρατηγικές που σκοπό έχουν την όσο το δυνατόν γρηγορότερη είσοδο στην αγορά για να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα και να αυξήσουν τα περιθώρια κέρδους, ενώ συχνά απαιτούνται από αυτούς αλλαγές στην έκταση του έργου την τελευταία στιγμή, όντας αντιμέτωποι με συμπιεσμένους χρόνους κύκλου κατασκευής του έργου» (Hastak et al., 2008).

Υπάρχουν σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη όταν το έργο μπορεί να ολοκληρωθεί εντός του χρονοδιαγράμματος ή νωρίτερα από τον προγραμματισμένο χρόνο σύμφωνα με την ορθολογική κατανομή των πόρων.

«Οι πιο συχνοί λόγοι που απαιτούν την επιτάχυνση της κατασκευής είναι οι εξής: επιβληθείσες ημερομηνίες διάρκειας κατασκευής, συγκεκριμένος χρόνος διάθεσης του έργου στην αγορά, προσπάθεια επίτευξης κέρδους λόγω προμοδότησης για νωρίτερη ολοκλήρωση και αποφυγή επιβολής προστίμων σε περίπτωση καθυστέρησης, ανάγκες βασικών πόρων, αύξηση γενικών εξόδων, καθώς και γενικές απρόβλεπτες καθυστερήσεις» (Gray & Larson, 2008).

«Υπάρχουν πολλοί καλοί λόγοι για να μειωθεί η διάρκεια ενός έργου. Μία από τις πιο συχνές αιτίες είναι γνωστή στον τομέα ως επιβληθείσα ημερομηνία ολοκλήρωσης έργου. Για παράδειγμα ένας πολιτικός κάνει μια δημόσια δήλωση ότι ένα νέο κτίριο θα είναι διαθέσιμο σε δύο χρόνια. Οι δηλώσεις αυτές γίνονται πολύ συχνά επιβληθείσες ημερομηνίες διάρκειας έργου, χωρίς καμία εξέταση για τα προβλήματα ή το κόστος επίτευξης μιας τέτοιας ημερομηνίας. Ένας άλλος λόγος για τη μείωση του χρόνου του έργου εμφανίζεται όταν απρόβλεπτες καθυστερήσεις – για παράδειγμα δυσμενείς καιρικές συνθήκες, βλάβη εξοπλισμού – προκαλούν σημαντικές καθυστερήσεις στη μέση του έργου.» (Huang et al., 2008)

«Το πρόβλημα της επιταχύνσεως του προγράμματος των κατασκευών εμφανίζεται στην πράξη με τις εξής τρεις μορφές:

α) Κατά τη διάρκεια της κατασκευής ο έλεγχος προόδου του έργου, ο οποίος βασίζεται στα χρονικά και οικονομικά στοιχεία του προγραμματισμού, δίνει σε πολλές περιπτώσεις καθυστέρηση ή και υπέρβαση κόστους. Η διεύθυνση του εργοταξίου είναι στην περίπτωση αυτή, υποχρεωμένη να επαναφέρει το έργο στις προγραμματισμένες προθεσμίες μετά από αναθεώρηση των αρχικών χρονικών τιμών.

β) Το δεύτερο πρόβλημα εμφανίζεται όταν ο εργοδότης επιθυμεί τη μείωση της διάρκειας κατασκευής του έργου. Και στην περίπτωση αυτή πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι βελτιστοποίησης, έτσι ώστε η επιτάχυνση του έργου να γίνει στην ελάχιστη δυνατή αύξηση του κόστους.

γ) Μια τρίτη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης της συνάρτησης κόστους – χρόνου αναφέρεται σε έργα, τα οποία χρηματοδοτούνται από τον δημόσιο τομέα. Όταν ο Εργοδότης ζητήσει από τον Ανάδοχο μείωση του συμβατικού χρόνου εκτελέσεως του έργου, τότε οι αντικειμενικές τιμές που δίνονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του κόστους επιταχύνσεως, θεμελιώνουν και δικαιολογούν την επιπλέον αποζημίωση.» (Εφραιμίδης Χ. Ι., 2001)

Επομένως, όσο νωρίτερα ολοκληρωθεί το έργο, τόσο αυξάνονται τα κέρδη του κατασκευαστή μέσω των αντίστοιχων πριμοδοτήσεων, ενώ συχνά εξοικονομεί και χρήματα λόγω της μικρότερης σε διάρκεια χρήσης των πόρων και της απασχόλησης του ανθρώπινου δυναμικού. Επίσης, ο ιδιοκτήτης του έργου επωφελείται με το κέρδος που προκύπτει από την νωρίτερη είσοδο του στην αγορά. Τέλος, η ολοκλήρωση ενός έργου σε συγκεκριμένη ημερομηνία αποτελεί σε ορισμένες περιπτώσεις δημόσια δέσμευση, επομένως δεν μπορεί να παραβλεφθεί.

### 2.2.1 Καθυστερήσεις Χρονοδιαγράμματος

Λόγω του ότι η πραγματική πρόοδος των εργασιών συχνά διαφέρει από την προγραμματισμένη το χρονοδιάγραμμα υφίσταται συνεχή μεταβολή και ανανέωση. Οι καθυστερήσεις που εμφανίζονται, οφείλονται σε κάποια προβλήματα, τα οποία πρέπει να εντοπίζονται εγκαίρως και να επιλύονται. Τα προβλήματα που ενδέχεται να παρουσιάζονται είναι τα εξής: (Δαγαράκης Ε., 2010)

- Καθυστερήσεις στις κρίσιμες εργασίες παρατείνουν την ημερομηνία λήξης
- Μη αναγκαίες αλληλεξαρτήσεις εργασιών συντελούν σε καθυστέρηση της ημερομηνίας λήξης του έργου κατά την αναθεώρηση του χρονοδιαγράμματος
- Μη αναγκαίοι περιορισμοί επιδρούν στην ευελιξία του χρονοδιαγράμματος.

Οι αιτίες των καθυστερήσεων μπορεί να σχετίζονται με διάφορους παράγοντες ενώ ποικίλλουν και οι πιθανοί υπεύθυνοι για αυτές. Γενικά, μπορεί να αφορούν οικονομικά θέματα, υλικά, συμβατικές σχέσεις, αλλαγές, κανονισμούς και προδιαγραφές, εργατικό δυναμικό, χρονοδιάγραμμα και έλεγχο, εξοπλισμό, περιβάλλον. Υπεύθυνοι μπορεί να είναι ο εργολάβος, ο ιδιοκτήτης ή ο κύριος του έργου και οι μελετητές ή οι σύμβουλοι.

## 2.2.2 Καθυστερήσεις στον ελληνικό χώρο

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως για τον εντοπισμό των αιτιών και των επιπτώσεων των καθυστερήσεων στον κατασκευαστικό χώρο. Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Δαγαράκη Ε. (2010), οι κυριότερες αιτίες καθυστερήσεων στον ελληνικό χώρο είναι οι εξής:

1. «Αναζήτηση για έγκριση από τις αρμόδιες υπηρεσίες»
2. «Έργασίες με συγκρούσεις με τις αντίστοιχες δημόσιες υπηρεσίες (Διευθύνουσα Αρχή (ΔΑ))»
3. «Υπερβολικά μικρές προσφορές από τον εργολάβο»
4. «Προβλήματα ρευστότητας»
5. «Καθυστέρηση στις πληρωμές από τον Ιδιοκτήτη»
6. «Έλλειψη οργάνωσης στην εκτίμηση διάρκειας δραστηριοτήτων & πόρων»
7. «Σχεδιαστικές αλλαγές από τον ιδιοκτήτη κατά την κατασκευή»
8. «Εσφαλμένος προγραμματισμός από τον εργολάβο»
9. «Χρονοβόρα διαδικασία έγκρισης των προτάσεων που γίνονται από τον εργολάβο»
10. «Λάθη και ανακατασκευές κατά την διάρκεια της κατασκευής»

Επίσης, οι σημαντικότερες επιπτώσεις των καθυστερήσεων για το έργο αλλά και για τους συντελεστές παραγωγής του είναι:

- Επέκταση του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου
- Υπέρβαση του προϋπολογισμού του έργου
- Διαφορές μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων έργου
- Συμβιβασμός
- Προσφυγές στα δικαστήρια
- Ολική εγκατάλειψη του έργου

## 2.3 Επίδραση επιτάχυνσης στο κόστος και την ποιότητα του έργου

Η επιτάχυνση ή αλλιώς συμπίεση του χρονοδιαγράμματος επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τα διάφορα είδη του κόστους του έργου καθώς και την ποιότητά του και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην πρόβλεψη των επιπτώσεων της διαδικασίας αυτής. Οι Zhao et al. (2007) κατασκεύασαν ένα μοντέλο ανάλυσης των επιπτώσεων που προκύπτουν στο έργο λόγω της άσκησης πίεσης στο χρονοδιάγραμμα. Όπως αναφέρουν: «*Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι, όταν κατά την πρόοδο της κατασκευής χρησιμοποιηθεί επιθετικό χρονοδιάγραμμα, προκαλούνται σοβαρές καταστάσεις, εφόσον αγνοηθούν η διαχείριση του κόστους, η διαχείριση της ποιότητας, και η διαχείριση ανθρωπίνων πόρων*».

Επίσης, οι Sakellariopoulos & Chassiakos (2004) αναφερόμενοι στο μέγεθος του προβλήματος εξισορρόπησης χρόνου και κόστους επισημαίνουν: «*Η βιβλιογραφία σχετικά με το πρόβλημα αποδοτικότητας χρόνου και κόστους είναι πλούσια και αυτό υποδεικνύει το επιστημονικό ενδιαφέρον σε αυτό το θέμα καθώς και την ανεπάρκεια των υπάρχοντων μεθόδων να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αποτελεσματικά και με ακρίβεια*».

### 2.3.1 Διάρκεια τεχνικού έργου και κόστος

#### 2.3.1.1 Είδη κόστους

Οι δαπάνες που γίνονται στα πλαίσια της κατασκευής ενός τεχνικού έργου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: το άμεσο κόστος και το έμμεσο κόστος.

*«Το άμεσο κόστος συνήθως αντιπροσωπεύει την εργασία, τα υλικά, τον εξοπλισμό και μερικές φορές τους υπεργολάβους. Το άμεσο κόστος αυξάνεται κατά αυξανόμενο ρυθμό καθώς ο χρόνος του έργου μειώνεται από τον αρχικά προγραμματισμένο χρόνο.»* (Huang et al., 2010)

*«Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει τα κανονικά έξοδα που μπορούν να αποδοθούν απευθείας σε ένα συγκεκριμένο πακέτο έργου ή μια δραστηριότητα του έργου. Περιλαμβάνει το εργατικό δυναμικό, τα υλικά, τον εξοπλισμό και τους υπεργολάβους. Η επιτάχυνση του έργου αυξάνει τις άμεσες δαπάνες.»* (Gray & Larson, 2008).

*«Το έμμεσο κόστος ενός έργου περιλαμβάνει δαπάνες που δεν μπορούν να συνδεθούν με κάποια συγκεκριμένη ομάδα εργασιών ή με μία δραστηριότητα του έργου. Περιλαμβάνει κόστη που αφορούν την επίβλεψη, τη διοίκηση, τους συμβούλους κτλ. Οι δαπάνες αυτές αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, επομένως μείωση της διάρκειας του έργου μειώνει τις έμμεσες δαπάνες.»* (Gray & Larson, 2008).

*«Το έμμεσο κόστος γενικά αντιπροσωπεύει τα γενικά έξοδα, όπως η επιτήρηση, η διοίκηση, οι σύμβουλοι και οι τόκοι. Το έμμεσο κόστος συνεχίζεται για τη διάρκεια ζωής του έργου και η πιθανή μείωση του χρόνου του έργου σημαίνει μείωση του έμμεσου κόστους.»* (Huang et al., 2010)

*«Οι έμμεσες δαπάνες του έργου περιλαμβάνουν γενικά έξοδα που δεν μπορούν άμεσα να αποδοθούν σε συγκεκριμένες δραστηριότητες και υπάρχουν ανεξάρτητα από την πρόοδο των δραστηριοτήτων (π.χ. γενικά έξοδα γραφείου). Οι έμμεσες δαπάνες συνήθως θεωρείται ότι είναι ανάλογες με τη διάρκεια του σχεδίου. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις, εφαρμόζονται κυρώσεις για την καθυστερημένη ολοκλήρωση του έργου ή πριμοδοτήσεις έγκαιρης παράδοσης του έργου. Αυτές οι κυρώσεις/ μπόνους μπορούν να αντιμετωπισθούν με τρόπο παρόμοιο με τις έμμεσες δαπάνες.»* (Sakellariopoulos S. , Chassiakos A.P. 2004)

Επομένως, η τιμή του άμεσου κόστους μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η διάρκεια του έργου και συγκεκριμένα αυξάνεται καθώς η διάρκεια μειώνεται. Αντίθετα η τιμή του έμμεσου κόστους αυξάνεται όταν αυξάνεται η διάρκεια του έργου. Το συνολικό κόστος του έργου είναι το άθροισμα του άμεσου και του έμμεσου κόστους, είναι δηλαδή άθροισμα δύο μεγεθών με αντίθετη μεταβολή σε σχέση με τον χρόνο. Για το λόγο αυτό δεν είναι προφανής η επίδραση της επιτάχυνσης του χρονοδιαγράμματος στο κόστος του έργου.

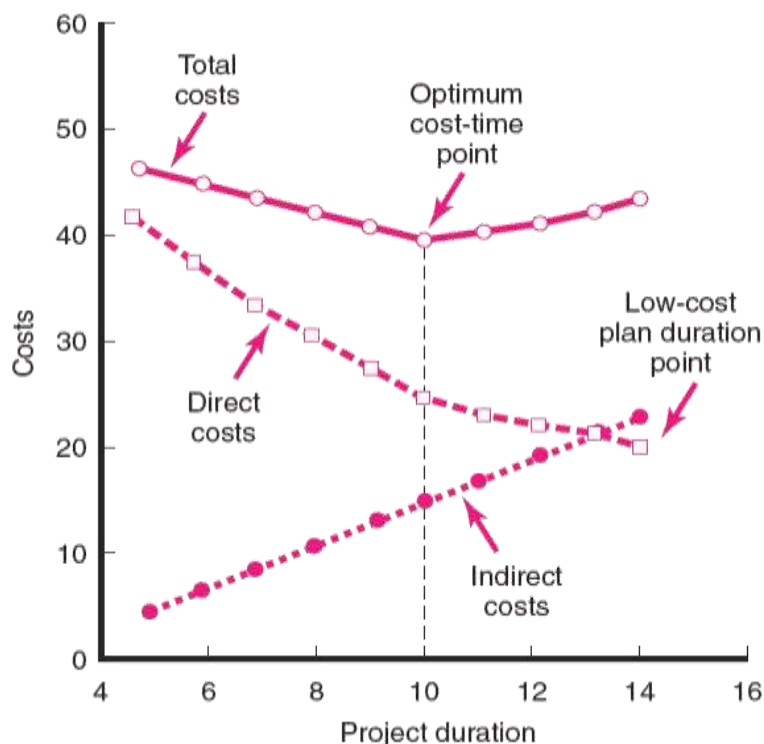
### 2.3.1.2 Καμπύλη διάρκειας – κόστους κατασκευής τεχνικού έργου

Προκειμένου να εντοπισθεί το σημείο με την ελάχιστη δυνατή διάρκεια χωρίς να αυξηθεί το συνολικό κόστος κατασκευάζεται η καμπύλη χρονικής διάρκειας – κόστους για το τεχνικό έργο, με παραδοχή γραμμικής σχέσης μεταξύ τους.

Σύμφωνα με τους Gray & Larson (2008) τα βήματα για την κατασκευή της καμπύλης είναι τα εξής:

- Εύρεση ολικών άμεσων κοστών για επιλεγμένες διάρκειες κατασκευής του έργου.
- Εύρεση ολικών έμμεσων κοστών για επιλεγμένες διάρκειες κατασκευής του έργου.
- Άθροιση άμεσων και έμμεσων κοστών για αυτές τις επιλεγμένες διάρκειες κατασκευής έργου.
- Σύγκριση των εναλλακτικών κοστών ώστε να εντοπισθεί η πιο πλεονεκτική θέση για μείωση της διάρκειας.

Ακολουθώντας τα παραπάνω θα προκύψει ένα διάγραμμα της παρακάτω μορφής. Στο διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες άμεσου κόστους - διάρκειας, έμμεσου κόστους-διάρκειας, συνολικού κόστους – διάρκειας καθώς και το βέλτιστο σημείο επιτάχυνσης, δηλαδή η μικρότερη δυνατή διάρκεια χωρίς αύξηση του συνολικού κόστους.



Σχήμα 3.1: Γραφική παράσταση διάρκειας – κόστους τεχνικού έργου (Πηγή: Gray & Larson, 2008)



### 2.3.2 Διάρκεια τεχνικού έργου και ποιότητα.

Η ποιότητα είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, μαζί με το χρονοδιάγραμμα και το κόστος της.

Η ποιότητα είναι ένα από τα κεντρικά περιεχόμενα της διαχείρισης τεχνικών έργων. Το χρονοδιάγραμμα της κατασκευής και ο έλεγχος των επενδύσεων πρέπει να βασίζονται σε ένα ορισμένο επίπεδο ποιότητας. Χωρίς εγγύηση της ποιότητας, το έργο δεν έχει αξία και οδηγεί μόνο σε σπατάλη πόρων είτε ολοκληρωθεί γρήγορα είτε όχι. Ο αυστηρός έλεγχος της ποιότητας ενός έργου μπορεί να μειώσει ή να αποφύγει τις νέες διεργασίες και να διασφαλίσει ότι το έργο θα ολοκληρωθεί εντός του χρονοδιαγράμματος. Μπορεί επίσης να μειώσει το κόστος συντήρησης και να βελτιώσει το συνολικό κέρδος του έργου.

Οι Gray & Larson αναφέρουν σχετικά με την ποιότητα ότι: «πρέπει να ικανοποιεί τις λειτουργίες και την αξία ενώ οι χρήστες ασχολούνται με την παραγωγή του και την διαβίωση και θα πρέπει να ικανοποιεί τις σχεδιαστικές απαιτήσεις και τα πρότυπα ποιότητας που προβλέπονται από την σύμβαση. Από συστηματικής απόψεως, η ποιότητα ενός έργου είναι μια πολυεπίπεδη, πολύπλευρη απαίτηση και θα πρέπει να βελτιστοποιείται ώστε να επιτυγχάνεται ο γενικός σκοπός. Το συγκεκριμένο περιεχόμενο του έργου, είναι αυτό που θα πρέπει να περιλαμβάνει την έννοια της ποιότητας, λειτουργικότητα, αξία και ποιότητα των οικοδομικών εργασιών.»

Για τη σχέση μεταξύ δραστηριότητας και ποιότητας οι Huang et al. 2008 εξηγούν: «Η βασική μονάδα της κατασκευής είναι η δραστηριότητα. Η ποιότητα του έργου εξαρτάται από την ποιότητα της κάθε δραστηριότητας, οπότε η ποιότητα της δραστηριότητας είναι η πιο θεμελιώδης πτυχή της ποιότητας του έργου. Κάθε δραστηριότητα χρειάζεται χρόνο για να ολοκληρωθεί, και η ποιότητα της κάθε δραστηριότητας σχηματίζεται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Διαφορετικές διάρκειες θα αποτελέσουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας της δραστηριότητας.»

«Διασφάλιση της διάρκειας δεν είναι «κόψιμο γωνιών» (υποβιβασμός της ποιότητας), αλλά επιδίωξη να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της κατασκευής. Στον πραγματικό έλεγχο της προόδου υπάρχει συχνά βιασύνη να ληφθούν μέτρα για την επιτάχυνση των έργων, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή διάρκεια των στόχων, τα οποία τείνουν να επηρεάζουν την ποιότητα του έργου.» (Huang et al. 2009)

«Ένα από τα κρίσιμα μέτρα επιτυχίας του έργου είναι η ποιότητα της απόδοσης του που μπορεί να επηρεαστεί από την προσπάθεια να εντατικοποιηθεί ο χρόνος ολοκλήρωσης με επιπλέον χρηματοδότηση.» (Khang et al. , 1999)

Σύμφωνα με τους Zhao et al. (2007): «Μόνο με επιθετικό χρονοδιάγραμμα δεν μπορεί να βελτιωθεί η κατάσταση. Οι διαχειριστές του έργου πρέπει επίσης να δώσουν προσοχή στη διαχείριση της ποιότητας και τη διαχείριση της παραγωγικότητας που είναι επίσης πολύ σημαντικές. Διαφορετικά το στρες που προκαλείται από την πίεση του χρονοδιαγράμματος δεν μπορεί να απελευθερωθεί.»

Επομένως κατά την επιτάχυνση των δραστηριοτήτων, και κατά συνέπεια του χρονοδιαγράμματος, η επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας επισκιάζεται από την ανάγκη ελαχιστοποίησης της χρονικής διάρκειας. Δηλαδή μία από τις συνέπειες της επιτάχυνσης του χρονοδιαγράμματος είναι ο υποβιβασμός της ποιότητας. Ωστόσο, όπως αναφέρεται και από τους Gray & Larson, ο υποβιβασμός της ποιότητας είναι και μία από τις επιλογές που κάνουν οι διαχειριστές του έργου προκειμένου να επιταχύνουν το έργο, ειδικά σε περιπτώσεις με περιορισμένους πόρους.

«Στο πλαίσιο αυτό, η παραδοσιακή μέθοδος CPM είναι ανεπαρκής για να βοηθήσει τον project manager να προβεί σε ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την πρόοδο του έργου και των επιδόσεων.» (Khang & Myint., 1999).

Για τη συσχέτιση μεταξύ διάρκειας και ποιότητας συνήθως γίνεται παραδοχή γραμμικής σχέσης μεταξύ τους. Το 1996 οι Babu & Suresh προτείνουν μια μέθοδο για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ του χρόνου, του κόστους και της ποιότητας με τρία αλληλένδετα γραμμικά μοντέλα προγραμματισμού. Ωστόσο, όπως επισημαίνουν οι Khang & Myint (1999) η εκτίμηση της μεταβολής της ποιότητας είναι πιο δύσκολη από την αντίστοιχη εκτίμηση για το κόστος και βασίζεται αρκετά στην κρίση του διαχειριστή του έργου. Οι Huang et al. (2010), προτείνουν ένα μοντέλο εξισορρόπησης διάρκειας και ποιότητας με υπόθεση γραμμικής σχέσης μεταξύ των δύο μεγεθών και δίνοντας μοναδιαία τιμή στην αναμενόμενη ποιότητα από εργασίες σε κανονική διάρκεια, υπολογίζουν την αναμενόμενη ποιότητα σε διάφορες χρονικές διάρκειες ως ποσοστό της κανονικής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:** **Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Χρονοδιαγράμματος Έργου**

### **3.1 Εισαγωγή**

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με το πέρασμα του χρόνου, η ανάγκη για γρήγορη και οικονομική ολοκλήρωση των έργων γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές και μοντέλα που σκοπό έχουν την επιτάχυνση της κατασκευής του τεχνικού έργου, ενώ πολλές είναι οι έρευνες σχετικά με την εξέλιξη των τεχνικών αυτών και των κρίσιμων παραγόντων για την επιτυχή εφαρμογή τους, και κατά συνέπεια την επιτυχή και έγκαιρη ολοκλήρωση του έργου. Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει η παρουσίαση και σύγκριση των σημαντικότερων εξ αυτών.

### **A). Μέθοδοι βελτιστοποίησης Χρονικού Προγραμματισμού**

Οι ακόλουθες μέθοδοι χρησιμοποιούνται στον αρχικό σχεδιασμό της κατασκευής προκειμένου επιτευχθεί η βέλτιστη διάρκεια με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

### **3.2 Συνεταιρισμός – Partnering**

#### **3.2.1 Γενικά – Ορισμός**

Όπως αποδείχθηκε και από την έρευνα του Δαγαράκη Ε. (2010) που παρουσιάστηκε παραπάνω (βλέπε 2.2.2), ένας από τους συνηθέστερους λόγους καθυστερήσεων στα τεχνικά έργα είναι τα προβλήματα με τις συμβατικές σχέσεις μεταξύ των διαφόρων μερών και προσώπων που σχετίζονται και πρέπει να συνεργαστούν για την κατασκευή αυτών.

Από τη στιγμή που υπάρχουν πολλοί ανεξάρτητοι οργανισμοί σε ένα κατασκευαστικό έργο, όπως οι πελάτες, οι αρχιτέκτονες, οι μηχανικοί, οι γενικοί κατασκευαστές, οι προμηθευτές, οι υπεργολάβοι κ.α., πρέπει να γίνει μια ολοκληρωμένη προσπάθεια ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του έργου. Όμως κάθε μία από τις παραπάνω ανεξάρτητες μονάδες είναι ένας ανεξάρτητος οργανισμός, που έχει τους δικούς του στόχους και σκοπούς, τεχνικές διαχείρισης και διαδικασίες λειτουργίας. Έτσι, συχνά εμφανίζονται διαφωνίες στην επικοινωνία και τη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων οργανισμών, ενώ εξελίσσονται ακόμη και σε διαμάχες και αντιδικίες.

Η κατασκευαστική βιομηχανία ταλαιπωρείται από διάφορα προβλήματα όπως η έλλειψη συνεργασίας, περιορισμένη εμπιστοσύνη και αναποτελεσματική επικοινωνία που οδηγούν σε μια σχέση αντιπαράθεσης μεταξύ όλων των συμμετεχόντων στο έργο. Αυτού του είδους η σχέση αντικατοπτρίζεται σε καθυστερήσεις του έργου, υπερβάσεις του κόστους, επιλύσεις διαφορών και ένα κλίμα όχι αμοιβαίου οφέλους. Η σχέση αυτή υποκινεί με όλο και πιο επείγον τρόπο την ανάγκη για μια προσέγγιση μεταξύ των επιμέρους συμμετεχόντων. Η ανάγκη αυτή μεγαλώνει λόγω των εμπειριών πολλών φυσικών προσώπων στη βιομηχανία, που στο παρελθόν, είχαν ως αποτέλεσμα αντιδικίες ή διαδικασίες επίλυσης διαφορών καθώς γινόταν προσπάθεια αντιμετώπισης των δυσκολιών.

Για την αντιμετώπιση της παραπάνω κατάστασης, αναπτύχθηκε η πολιτική του συνεταιρισμού μεταξύ των εταιρών που συμμετέχουν στο έργο. Έχουν διατυπωθεί διάφοροι ορισμοί για αυτή την τεχνική διαχείρισης. Ακολουθούν κάποιοι από αυτούς που παρατίθενται συχνότερα:

«Συνεταιρισμός επιχειρήσεων είναι η ανάπτυξη επιτυχημένων, μακροχρόνιων, στρατηγικών σχέσεων μεταξύ πελατών και προμηθευτών, με βάση την επίτευξη των βέλτιστων πρακτικών και ένα βιώσιμο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.» (Αναφορά της Wikipedia στον Lendrum, 1997)

Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Κατασκευαστικής Βιομηχανίας (ΗΠΑ), συνεταιρισμός είναι η δέσμευση μεταξύ δύο ή περισσότερων οργανισμών με σκοπό να επιτύχουν συγκεκριμένους επιχειρηματικούς σκοπούς μεγιστοποιώντας την αποτελεσματικότητα των πόρων κάθε συμμετέχοντα. Τα παραπάνω απαιτούν την αλλαγή παραδοσιακών σχέσεων σε μία κοινή κουλτούρα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα όρια των οργανισμών. Η σχέση βασίζεται στην εμπιστοσύνη, στην αφοσίωση σε κοινούς στόχους και στην αμοιβαία κατανόηση προσδοκιών & αξιών.»

Ένας ακόμη ορισμός από τους Bennet και Jayes (1998) είναι: «Συνεταιρισμός είναι ένα σύνολο στρατηγικών ενεργειών που προσφέρουν σπουδαίες βελτιώσεις στις επιδόσεις της κατασκευής. Δημιουργείται από μια σαφή κατανόηση των κοινών στόχων και από την λήψη αποφάσεων μέσω της συνεργασίας από ένα αριθμό εταιρειών οι οποίες εστιάζουν στη χρήση ανατροφοδότησης για τη συνεχή βελτίωση της κοινής τους επίδοσης.»

Από τα παραπάνω είναι κατανοητό ότι η τεχνική του συνεταιρισμού διασφαλίζει ουσιαστικά τις καλές προθέσεις και το κλίμα συνεργασίας μεταξύ των επαγγελματιών που εμπλέκονται με την κατασκευή. Έτσι, προλαμβάνονται τυχόν προβλήματα και καθυστερήσεις που θα προέκυπταν λόγω διαφωνιών και συγκρούσεων μεταξύ αυτών.

### **3.2.2 Βήματα εφαρμογής**

Η διαδικασία εγκαθίδρυσης του συνεταιρισμού γίνεται σε τρία στάδια (Cheng et al., 2002):

#### Στάδιο σχηματισμού του συνεταιρισμού:

Περιλαμβάνει την προετοιμασία των μερών για τον συνεταιρισμό, τη δημιουργία ομάδας για το συνεταιρισμό, τον ορισμό κοινών στόχων προς επίτευξη και τον προγραμματισμό συναντήσεων και «εργαστηρίων» (workshops).

#### Στάδιο εφαρμογής:

Περιλαμβάνει τη δημιουργία συστήματος ελέγχου στόχων και επίλυσης συγκρούσεων και τη διαχείριση πόρων που κατανέμονται στην ομάδα.

#### Στάδιο ολοκλήρωσης / επανενεργοποίησης:

Μετά την ολοκλήρωση του έργου συχνά διατηρείται μια ανεπίσημη σχέση μεταξύ των εταίρων και ακολουθεί έρευνα για το αν υπάρχουν οι λόγοι και οι συνθήκες προκειμένου να ξανασηματιστεί ο συνεταιρισμός.

### 3.2.3 Πλεονεκτήματα – Οφέλη

Τα γενικότερα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή του συνεταιρισμού είναι πολλά και αρκετές είναι οι μελέτες και οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για τον εντοπισμό τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής, που επισημαίνεται σχεδόν από όλους τους ερευνητές, είναι ότι αποφέρει σημαντικά οφέλη με πολύ μικρό κόστος.

Η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην δημοπρασία νέων συμβολαίων όσο και στην εκτέλεση αυτών, αλλά και στη δημιουργία νέων οργανισμών. Μέσω του συνεταιρισμού επιτυγχάνεται μακροχρόνια δέσμευση, αμοιβαία εμπιστοσύνη και θετική σχέση κόστους αποτελεσματικότητας (Cheng et al., 2000). Στην περίπτωση δε που συνδυαστεί με τη μέθοδο επιτάχυνσης fast track, ελαχιστοποιεί τους πιθανούς κινδύνους που απειλούν την κατασκευή, αποτρέπει καθυστερήσεις στην κατασκευή και συμβάλλει στην συνολική επιτυχία του έργου (Cho et al., 2010).

### 3.2.4 Κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας

Ο εντοπισμός των κρίσιμων παραγόντων επιτυχίας της διαδικασίας του συνεταιρισμού είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές τόσο σε εθνικό (κατασκευαστική βιομηχανία χώρας) όσο και σε διεθνές επίπεδο ( Chan et al., 2004; Cheng et al., 2002; Love et al. 2000).

Η επιτυχημένη εφαρμογή του συνεταιρισμού είναι θέμα όλων των συμμετεχόντων. Ειδικότερα,

Ανώτατη Διοίκηση.

- ικανότητα να επιλύει πιθανές συγκρούσεις μεταξύ επιμέρους συνεργατών
- αποτελεσματική επικοινωνία και συντονισμός των συμβαλλομένων μερών
- δημιουργία κλίματος συνεργασίας και εμπιστοσύνης
- δέσμευση στην τήρηση της συμφωνίας του συνεταιρισμού
- τακτικός έλεγχος.
- τα καθήκοντα να είναι ξεκάθαρα ορισμένα

Λοιπά Συμβαλλόμενα Μέρη.

- αμοιβαία εμπιστοσύνη
- να είναι πρόθυμοι να μοιραστούν τους πόρους
- μακροχρόνια δέσμευση σε μια συμπεριφορά επίτευξης αμοιβαίου οφέλους
- δημιουργικότητα, πρωτοτυπία
- κατάλληλη τεχνική κατάρτιση
- συνέπεια στους στόχους
- δέσμευση στην ποιότητα

### 3.3 Κρίσιμη Αλυσίδα (Critical Chain Project Management)

#### 3.3.1 Γενικά

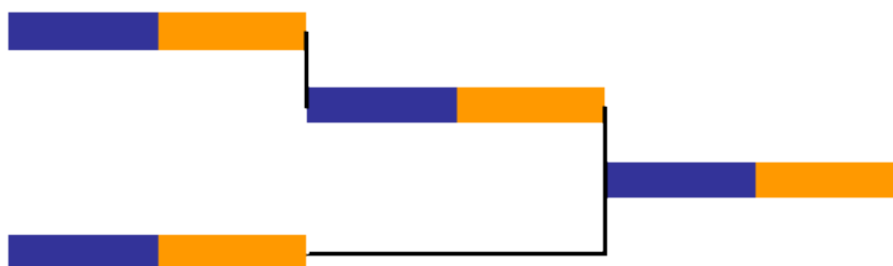
Η μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας στη διαχείριση έργων αναπτύχθηκε από τον Eliyahu M. Goldratt το 1997 στο βιβλίο του: «Critical Chain». Η διαχείριση έργου με κρίσιμη αλυσίδα έχει παρουσιαστεί ως εναλλακτική λύση για τη μέθοδο κρίσιμης διαδρομής (CPM). Ωστόσο, οι βασικές έννοιες της μεθοδολογίας κρίσιμης αλυσίδας χρησιμοποιούνται εύκολα ως επέκταση της CPM.

Συνοπτικά, οι δύο στόχοι της μεθόδου είναι:

- Η ταχύτερη ολοκλήρωση κάθε έργου.
- Η ολοκλήρωση περισσότερων έργων από τον οργανισμό, χωρίς την προσθήκη πόρων.

Η Κρίσιμη Αλυσίδα (Critical Chain) διαφέρει από την Κρίσιμη Διαδρομή (Critical Path), η οποία λαμβάνει υπόψη μόνον τις αλληλεξαρτήσεις των εργασιών και όχι των πόρων. Η μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας θεωρεί ένα δίκτυο κρίσιμης διαδρομής στο οποίο έχει γίνει αποτελεσματική εξομάλυνση πόρων. Κατά συνέπεια, βελτιώνει την ικανότητα βελτιστοποίησης προγραμματισμού του έργου και θέτει τη βάση για καλύτερη παρακολούθηση και έλεγχό του. Εναλλακτική ονομασία είναι μέθοδος εξισορροπημένης κρίσιμης διαδρομής (leveled critical path).

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι τα περιθώρια ασφαλείας στις διάρκειες δραστηριοτήτων και οι καθυστερήσεις που προκύπτουν ανάλογα με αυτά. Τα περιθώρια ασφαλείας (buffer) προστίθενται σε κάθε εργασία, αφού λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα. Συνήθως είναι αρκετά για να υπάρχει μια πιθανότητα 90% να περατωθεί στην ώρα της η εργασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική αύξηση της συνολικής διάρκειας του έργου.



Σχήμα 3.2: Γραφική απεικόνιση δραστηριοτήτων με τα buffer τους.  
([www.salesprocessengineering.net](http://www.salesprocessengineering.net))

Ωστόσο, πέρα από την αύξηση του χρόνου που προκύπτει εμφανώς από το μέγεθος του περιθωρίου ασφαλείας, η πραγματική καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη και οφείλεται στην προσαρμογή της ανθρώπινης συμπεριφοράς στα παραπάνω χρονικά περιθώρια. Αυτή καθορίζεται από το Σύνδρομο του Μαθητή (Student Syndrome) και από το Νόμο του Parkinson.

Σύμφωνα με το Σύνδρομο του Μαθητή, η έναρξη μιας εργασίας αναβάλλεται μέχρι την τελευταία πιθανή στιγμή. Ο εργαζόμενος, δηλαδή, εξαντλεί όλο το περιθώριο ασφαλείας καθυστερώντας την έναρξη της εργασίας. Παράλληλα, σύμφωνα με το νόμο του Parkinson, ο απαραίτητος χρόνος για την εκτέλεση μιας εργασίας είναι ο εκάστοτε διατιθέμενος. Όταν γίνει πλέον εμφανές ότι το ενσωματωμένο στην εργασία buffer είναι άχρηστο, ο εργαζόμενος θα χρησιμοποιήσει το χρόνο του buffer ούτως ή άλλως, καθώς δεν έχει μεγάλο κίνητρο για να τελειώσει νωρίτερα. Από την άλλη πλευρά, καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση των εργασιών στην κρίσιμη αλυσίδα μεταβιβάζονται στις ακόλουθες εργασίες. Έτσι, τα κέρδη χάνονται, οι καθυστερήσεις μεταβιβάζονται ως έχουν και το έργο πιθανότατα θα καθυστερήσει να τελειώσει ακόμη και αν, κατά μέσο όρο, υπάρχουν αρκετά κρυμμένα buffers.

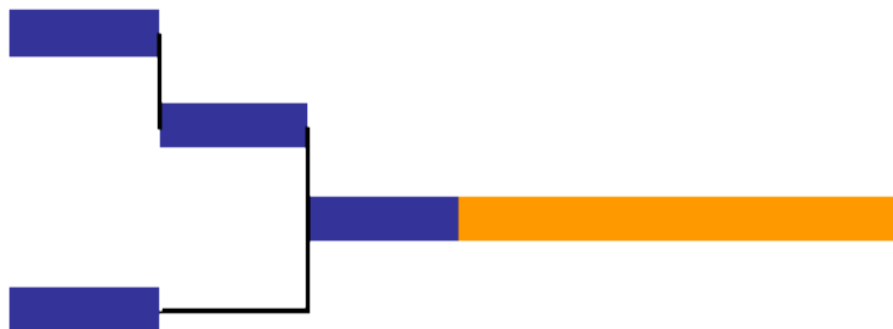
Με εφαρμογή των παραπάνω οι εργασίες γενικά καθυστερούν καθώς βάσει αυτών οι εργαζόμενοι συχνά υπερεκτιμούν τον χρόνο που θα χρειαστεί για την ολοκλήρωση της εργασίας που θα τους ζητηθεί. Εξ αιτίας του νόμου του Parkinson και του συνδρόμου του μαθητή, οι εργασίες που αναμένονται να ολοκληρωθούν νωρίς, τελειώνουν στην ώρα τους ή καθυστερούν και αυτές στις οποίες αναμένεται καθυστέρηση, καθυστερούν. Το αποτέλεσμα είναι ότι το έργο καθυστερεί. Αναπόφευκτα λοιπόν τα έργα ξεπερνούν τους προβλεπόμενους χρόνους, παρά τα τεράστια περιθώρια ασφαλείας που εμπεριέχονται.

### 3.3.2 Προγραμματισμός με τη μέθοδο Κρίσιμης Αλυσίδας

Προς αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος λόγω των ενσωματωμένων περιθωρίων ασφαλείας στις εργασίες, η μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας τοποθετεί όλα τα περιθώρια ασφαλείας συνολικά στο τέλος του έργου (buffer έργου), αφού πρώτα θεωρήσει ότι η πιθανότητα περάτωσης των εργασιών έγκαιρα πρέπει να μειωθεί από το 90% στο 50% (λαμβάνοντας υπόψη το νόμο Parkinson και το σύνδρομο του μαθητή). Αυτό γίνεται διότι αυτό που έχει σημασία είναι να ολοκληρωθεί το έργο στην ώρα του και όχι η κάθε μεμονωμένη εργασία.

Στην προσέγγιση με μεθόδους PERT/CPM ένας χρόνος ασφαλείας προστίθεται στο τέλος κάθε δραστηριότητας, ενώ στην Κρίσιμη Αλυσίδα οι χρόνοι ασφαλείας, που αντιμετωπίζονται ως 'παραγέμισμα': (Kerzner H., 2003)

- αθροίζονται
- ρυθμίζονται
- και επανατοποθετούνται σε στρατηγικές θέσεις για να προστατεύσουν την συνολικά κρίσιμη αλυσίδα».

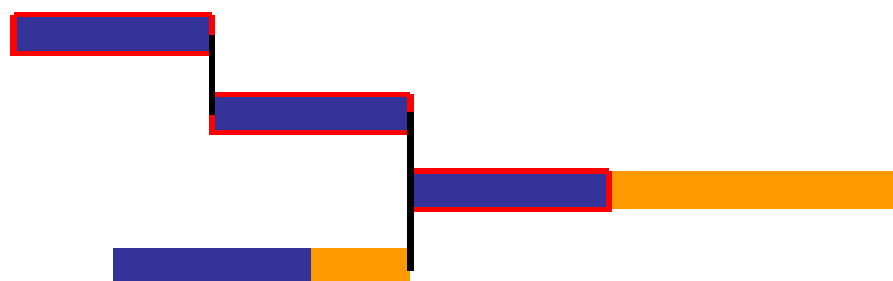


**Σχήμα 3.3: Παράδειγμα buffer έργου**  
([www.salesprocessengineering.net](http://www.salesprocessengineering.net))

Παρά τη δυνατότητα υπολογισμού του buffer του έργου ως τη ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων της κάθε ασφάλειας κάθε εργασίας της κρίσιμης αλυσίδας, το buffer του έργου που απαιτείται για 90% πιθανότητα περάτωσης στην ώρα του ισούται με το 50% της διάρκειας της μακρύτερης αλληλουχίας (αλυσίδας) εργασιών (Leach L., 2000). Δηλαδή, ισούται με το 50% της διάρκειας της Κρίσιμης Αλυσίδας που είναι αυτή που επηρεάζει και τη διάρκεια του έργου.

Οι Shou & Yeo (2000), ωστόσο, διαφωνούν με αυτήν την προσέγγιση και αναπτύσσουν μέθοδο υπολογισμού του μεγέθους των buffer, συσχετίζοντας το με τις διάφορες πιθανές αβεβαιότητες του έργου, τους διάφορους τύπους έργων και την διαχείριση κινδύνων του έργου.

Στη συνέχεια, δίδεται προσοχή στις εργασίες που δεν ανήκουν στην κρίσιμη αλυσίδα. Εάν αυτές καθυστερήσουν υπέρμετρα μπορεί να επηρεάσουν τη διάρκεια του έργου και άρα η Κρίσιμη Αλυσίδα τεχνικά να έχει μεταλλαχθεί. Προκειμένου να υπάρχει πρόβλεψη για ένα τέτοιο ενδεχόμενο, η αλληλουχία αυτών των εργασιών εξετάζεται ως ένα μίνι-έργο και προστατεύεται με την προσθήκη ενός άλλου buffer, το buffer του τροφοδότη, που ισούται με το 50% της διάρκειας εκτέλεσης αυτών των εργασιών. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται ότι οι εργασίες που είναι απαραίτητες για την κρίσιμη αλυσίδα θα είναι διαθέσιμες όταν χρειαστούν. Το buffer αυτό ονομάζεται έτσι διότι τοποθετείται εκεί που η αλληλουχία τροφοδοτείται στην κρίσιμη αλυσίδα. (Raz et al. 2003)



**Σχήμα 3.4: Παράδειγμα buffer τροφοδότη.**  
([www.salesprocessengineering.net](http://www.salesprocessengineering.net))



Ένα ακόμη είδος buffer, το buffer πόρων, προστίθεται στην κρίσιμη αλυσίδα ώστε να κρατά τους πόρους έτοιμους για εργασία στην κρίσιμη αλυσίδα. Σύμφωνα με τους Raz et al. (2003), «πρόκειται για μία εικονική διαδικασία που τοποθετείται πριν από διαδικασίες της κρίσιμης αλυσίδας που χρειάζονται κρίσιμους πόρους. Αυτή η 'αφύπνιση' θα προκαλέσει τους πόρους να συντομεύσουν κάθε μη κρίσιμη δραστηριότητα και να είναι έτοιμοι να ξεκινήσουν εργασία στην κρίσιμη αλυσίδα μόλις ολοκληρωθούν οι προηγούμενες εργασίες.»

Οι Shou & Yeo (2000) επισημαίνουν: «Στη μέθοδο Κρίσιμης Αλυσίδας, τα buffer πόρων προστίθενται για τις δραστηριότητες της κρίσιμης αλυσίδας για να διασφαλισθεί ότι γίνονται οι κατάλληλες προετοιμασίες για να ξεκινήσουν οι δραστηριότητες όταν ολοκληρωθεί το προηγούμενο στάδιο».

Συνολικά, τα βασικά βήματα εφαρμογής της Μεθόδου Κρίσιμης Αλυσίδας δίνονται από τον Kerzner H. (2003), ως εξής:

- Αφαίρεση κάθε buffer από τις εκτιμήσεις διάρκειας των εργασιών. Το βήμα αυτό αποκλείει κάθε πιθανότητα εμφάνισης του Συνδρόμου του Μαθητή.
- Εξομάλυνση πόρων του έργου. Στην μέθοδο αυτή, τα ζητήματα κατανομής πόρων επιλύονται εξ αρχής.
- Δεν θεωρείται ότι το προσωπικό θα ολοκληρώσει τις εργασίες του έγκαιρα ή τηρώντας την ακρίβεια στις αντίστοιχες εκτιμήσεις ολοκλήρωσης.
- Προτροπή προς το προσωπικό για εργασία με «αφοσίωση». Με τον όρο αφοσίωση υπονοείται ότι από τη στιγμή που ένα πρόσωπο ξεκινά να εργάζεται σε μία εργασία, θα εργάζεται μόνο στην εργασία αυτή μέχρι η εργασία να ολοκληρωθεί ή μέχρι να έχει σημειωθεί κατάλληλη πρόοδος ώστε να την αναλάβει ο επόμενος εργαζόμενος/πόρος. Επίσης, θεωρείται ότι εάν ο επόμενος πόρος σκοπεύει να επιστρέψει την εργασία στον προηγούμενο εντός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος (μικρότερο από την διεκπεραίωση άλλης εργασίας), ο προηγούμενος θα πρέπει να περιμένει χωρίς να ξεκινήσει να εργάζεται σε επόμενη εργασία.
- Αλλαγή της προσέγγισης διαχείρισης πόρων του οργανισμού με σκοπό οι συμμετέχοντες να κατανοήσουν και να εφαρμόσουν ότι στην μέθοδο Κρίσιμης Αλυσίδας, οι πόροι έχουν την ευελιξία να αναλάβουν εργασία νωρίτερα από ότι αναμενόταν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του buffer πόρων
- Τοποθέτηση του buffer έργου ώστε να προστατευθεί η Κρίσιμη Αλυσίδα του έργου. Το buffer αυτό προστατεύει το σύνολο των εργασιών στην Κρίσιμη Αλυσίδα από κάθε κοινή απόκλιση χρόνου
- Τοποθέτηση buffer τροφοδότη σε κάθε αντίστοιχη αλληλουχία δραστηριοτήτων, ώστε να προστατευθεί η Κρίσιμη Αλυσίδα από αποκλίσεις σε οποιαδήποτε διαδρομή που τροφοδοτεί την Κρίσιμη Αλυσίδα.

### 3.3.3 Πλεονεκτήματα – Οφέλη

Μία από τις δυνατότητες που προσφέρει η μέθοδος, είναι η δυνατότητα ελέγχου της εξέλιξης των εργασιών και άρα η δυνατότητα λήψης αποφάσεων και πρόβλεψης του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.

Μαζεύοντας όλες τις επιμέρους ασφάλειες από τις επιμέρους εργασίες στο τέλος του έργου, είμαστε σίγουροι ότι παρά το ότι οι πιθανότητες να τελειώσει κάθε επιμέρους εργασία του έργου στον εκτιμώμενο χρόνο είναι 50 %, δεν διακινδυνεύει το έργο στο σύνολό του. Κάθε φορά που ο χρόνος μιας επιμέρους εργασίας ξεφεύγει, κάποιο μέρος της ασφάλειας που προστατεύει αυτόν τον κλάδο αναλώνεται. Κάθε φορά που μια επιμέρους εργασία τελειώνει πριν τον καθορισμένο χρόνο, ένα μέρος του χρόνου πιστώνεται πίσω στο αρχικό buffer. Εάν συγκριθεί το ποσοστό ανάλωσης του buffer έως τη στιγμή αυτή, δίνεται μια ένδειξη της εξέλιξης της πορείας σχετικά με αυτό που αναμένεται..

Μια αλλαγή της προσέγγισης από την κλασσική διαχείριση έργων στην Κρίσιμη Αλυσίδα θα έχει ως αποτέλεσμα τα παρακάτω πλεονεκτήματα: σημαντική μείωση της διάρκειας των έργων (20% - 50%), ταχύτερη Απόδοση της Επένδυσης – Return on Investment (ROI), καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων και αποτελεσματικότερη διαχείριση των αβεβαιοτήτων που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση των έργων, καλύτερη πληροφόρηση της διοίκησης.

Οι Raz et al. (2003) συνοψίζουν τα θετικά της μεθόδου στα εξής:

- Λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα στις διάρκειες κάνοντας σαφή τα buffers, κοινοποιώντας τη γνώση για το μέγεθος των buffers και την τοποθέτηση εργαζομένων, χορηγών κτλ
- Λαμβάνει υπόψη τη διαθεσιμότητα των πόρων
- Εστιάζει στις βασικές εργασίες και πόρους
- Ελέγχει συνεχώς το μέγεθος των buffer στο πρόγραμμα
- Παρέχει προειδοποίηση για επερχόμενη εργασία στους κρίσιμους πόρους (κρίσιμοι πόροι: πόροι που χρειάζονται για την εκτέλεση εργασιών της κρίσιμης αλυσίδας)
- Δεν διασπά την προσοχή μεταξύ πολυάριθμων εργασιών

### 3.3.4 Προβλήματα – Περιορισμοί

Μία από τις σημαντικές ελλείψεις της μεθόδου Κρίσιμης Αλυσίδας είναι ότι από τις μεταβλητές χρονοδιάγραμμα, κόστος και μέγεθος του έργου, λαμβάνει υπόψη μόνο το χρονοδιάγραμμα. Οι πληροφορίες (από τη μέθοδο) μπορούν να γίνουν ακόμη πιο χρήσιμες αν συνδυαστούν με το κόστος και την έκταση (του έργου). Υποθέσεις για την έκταση και το κόστος πρέπει να γίνονται πάντα, με εκτιμήσεις τριών σημείων. Συχνά, όταν υπάρχουν διαδικασίες αορίστου χρόνου, η αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί σημαντικά με μία μικρή αύξηση του κόστους ή αλλαγή στην έκταση. Αυτή η ολιστική προσέγγιση θα παρέχει πιο σημαντικές συζητήσεις κατά την οριστικοποίηση της πραγματικής έκτασης του έργου και θα έχει ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στην πιθανότητα επιτυχίας.

Η μέθοδος θεωρεί ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των διαδρομών, γεγονός που δεν ισχύει καθώς πολύ συχνά υπάρχουν αρκετοί σύνδεσμοι μεταξύ των αλυσίδων. Έτσι, η παρουσία ισχυρών συνδέσμων μεταξύ διαφόρων διαδρομών μπορεί να μεταβάλλει τη στατιστική ανάλυση, απαιτώντας μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας από αυτό που σχεδιάστηκε. Αντί να πραγματοποιηθεί πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση που θα οδηγήσει σε υπέρβαση του χρονοδιαγράμματος, η παρουσία των συζεύξεων μεταξύ των διαδρομών πρέπει να εντοπιστεί και να γίνει διαχείριση αυτής ως κίνδυνος κατά την εκτέλεση του έργου.

Οι Raz et al. (2003), μελέτησαν τη μέθοδο προσπαθώντας να εντοπίσουν τις αδυναμίες της και τους παράγοντες που περιορίζουν την εφαρμογή της. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν για τις προϋποθέσεις που πρέπει να τηρεί ένας οργανισμός για να εφαρμόσει αποτελεσματικά τη μέθοδο είναι: « Η Μέθοδος κρίσιμης Αλυσίδας στη Διαχείριση Έργων (CCPM) θα μπορούσε να είναι ευεργετική εφόσον ο οργανισμός στερείται αποτελεσματικού προγραμματισμού έργων και ελέγχου διαδικασιών, αναλαμβάνει ένα σχετικά μεγάλο αριθμό παρόμοιων έργων σε ένα περιβάλλον matrix και ο βασικός στόχος είναι η ικανοποίηση προθεσμιών. Διαφορετικά, οι συγγραφείς προτείνουν να γίνεται ένα προσεκτικό ζύγισμα των περιορισμών της μεθόδου και του κόστους της, με την προοπτική της συμβολής της στην μακροχρόνια επιχειρηματική επιτυχία της εταιρείας.»

Επίσης, οι Shou & Yeo (2000), διαφωνούν με την προσέγγιση του μεγέθους των buffer ως το 50% της διάρκειας της αλυσίδας που προστατεύουν. Συγκεκριμένα, «Η διαχείριση με buffer είναι καίριας σημασίας στη μέθοδο Κρίσιμης Αλυσίδας αλλά η πρόταση του Goldratt, που θεωρεί το μέγεθος του buffer έργου ως το μισό της διάρκειας του έργου, είναι προφανώς πολύ απλοϊκή και αυθαίρετη». (Shou & Yeo, 2000)

### 3.4 Fast track – Επιτάχυνση/Συμπίεση διάρκειας κατασκευής

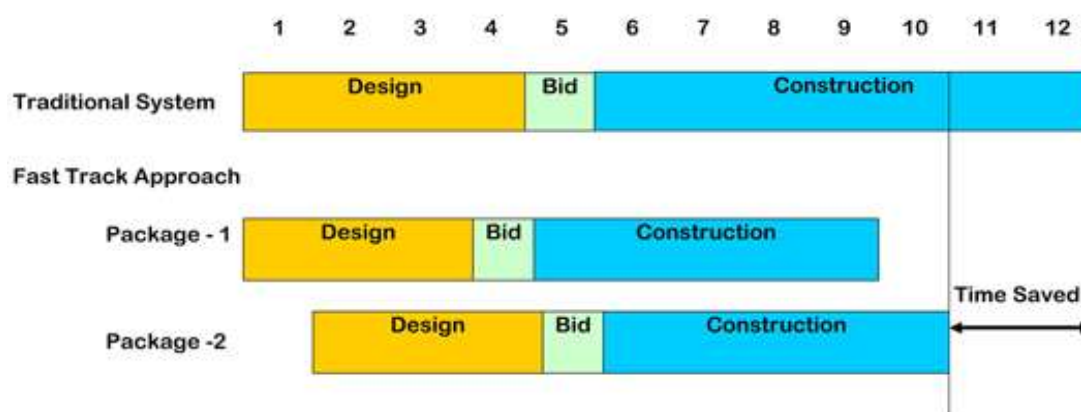
#### 3.4.1 Γενικά – Ορισμός

Η μέθοδος fast – track για τον σχεδιασμό και την κατασκευή αναπτύχθηκε αρχικά στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και έγινε πιο δημοφιλής στη δεκαετία του 1970. Αυτό συνέβη καθώς, η τεχνική πολυπλοκότητα των έργων, οι αυξημένοι κρατικοί κανονισμοί, η απότομη αύξηση του πληθωρισμού και οι πολιτικές πιέσεις συνέβαλλαν στην αύξηση του κόστους της κατασκευής που είχε ως αποτέλεσμα στην αναζήτηση για νέες, εφευρετικές διαδικασίες για τη διασφάλιση ταχύτερων και οικονομικότερων ολοκληρώσεων των έργων. Με τις παραδοσιακές μεθόδους παράδοσης έργων να αποτυγχάνουν στην αντιμετώπιση των προκλήσεων του έργου, οι ιδιοκτήτες θεώρησαν αναγκαίο να εμπλακούν περισσότερο με τη διοίκηση και τη διαχείριση των έργων τους.

Ένας από τους δημοφιλέστερους ορισμούς της μεθόδου διατυπώνεται ως εξής:

«Η μέθοδος fast track γενικά ορίζεται ως η συμπίεση του σχεδιασμού ή/και του προγράμματος κατασκευής μέσω της αλληλοεπικάλυψης δραστηριοτήτων ή μέσω μείωσης της διάρκειας των δραστηριοτήτων.»

(Fazio et al. 1998, Clough and Sears 1991, Williams 1995, Songer et al. 2000)



**Σχήμα 3.5:** Απεικόνιση μεθόδου fast track. Οι εργασίες χωρίζονται σε δύο πακέτα εργασίας που πραγματοποιούνται παράλληλα. (Πηγή: <http://www.timeline-pm.com>)

Πρακτικά, δραστηριότητες που θα είχαν προκαθορισμένη σειρά και η έναρξη της μίας θα γινόταν αμέσως μετά τη λήξη της άλλης, τώρα γίνονται παράλληλα. Για παράδειγμα, η κατασκευή θα ξεκινήσει προτού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός όλου του έργου, για κάθε τμήμα που έχει σχεδιασθεί. Σε ένα τυπικό έργο fast track, η θεμελίωση και τα απαραίτητα σίδερα αγοράζονται πριν οριστικοποιηθεί το πλάνο κατασκευής. Τα σχέδια μπορεί να προηγούνται της κατασκευής για όχι περισσότερο

από μία εβδομάδα και χιλιάδες αποφάσεις σχετικές με το σχεδιασμό λαμβάνονται επί του σημείου κατασκευής. Οι δραστηριότητες, δηλαδή, χωρίζονται σε πακέτα εργασίας που πραγματοποιούνται παράλληλα.

«Η εφαρμογή της επιτάχυνσης fast track παράγει πολλαπλά σχεδιαστικά πακέτα, που επιτρέπουν την επιθετική αλληλοεπικάλυψη σχεδιασμού και κατασκευής.» (Cho et al. 2010)

### 3.4.2 Οφέλη / Πλεονεκτήματα

Πέρα από το προφανές κέρδος σε χρόνο, τα σημεία στα οποία η μέθοδος επιδρά θετικά και αποτελούν κίνητρα για την εφαρμογή της, περιγράφονται ως εξής:

1. Οικονομικές συνθήκες: Με την μείωση της διάρκειας του έργου μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές μειώσεις στο κόστος και συνολικά υψηλότερη αποδοτικότητα του έργου.
2. Πολυπλοκότητα έργου: Είναι επωφελέστερο να ικανοποιούνται ξεχωριστές συμβάσεις για μέρη του έργου που μπορεί να θεωρηθούν ως πιθανοί περιορισμοί.
3. Πολιτικές συνθήκες: Πολιτικές αποφάσεις και οικονομικές πολιτικές μπορεί να οριστικοποιούν τις ημερομηνίες έναρξης και λήξης της κατασκευής.
4. Συνθήκες αγοράς: Όσον αφορά σε βιομηχανικά κτίρια, υπάρχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα στο να είναι ήδη στην παραγωγή ενώ οι ανταγωνιστές είναι ακόμα στο σχεδιασμό ή στην κατασκευή.

Άρα η μέθοδος είναι μια επιλογή για να μην ξεφύγει η κατασκευή από το χρονοδιάγραμμα, ενώ δίνει τη δυνατότητα να μειωθεί η διάρκεια αυτού και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των πελατών για γρήγορη παράδοση του έργου.

### 3.4.3 Προβλήματα / Περιορισμοί

Η επιτάχυνση των εργασιών της κατασκευής με την παράλληλη πραγματοποίηση τους συχνά κρύβει παγίδες και χρειάζεται προσεκτικό χειρισμό που δυσκολεύει τους διαχειριστές, ειδικά στην περίπτωση που δεν έχουν προηγούμενη παρόμοια εμπειρία. Η εφαρμογή fast track σε ένα έργο, συχνά επιφέρει απροσδόκητα επιπλέον κόστη και δεν οδηγεί απαραίτητα σε μικρότερη διάρκεια έργου. Προκειμένου η προσέγγιση να επιφέρει κέρδος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα ακόλουθα: σχεδιαστικά λάθη και παραλείψεις, αλλαγές στα σχέδια, συντονισμός μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής και συντονισμός μεταξύ των πακέτων εργασίας. (Fazio et al. 1988)

Δηλαδή, η έλλειψη χρόνου στην αρχική φάση του σχεδιασμού μπορεί να είναι η αιτία λαθών που δύσκολα μπορούν να διορθωθούν άμεσα λόγω της παράλληλης έναρξης της κατασκευής. Έτσι, συχνά φαίνεται να προκύπτει η ανάγκη για νέες, επιπλέον, διορθωτικές εργασίες που μεταφράζονται σε καθυστερήσεις και έξοδα.

Επίσης, η περίπτωση να αλλάξουν οι στόχοι λόγω σχεδιαστικών λαθών ή άλλου θέματος συντονισμού των σχεδίων αυξάνεται αν τα σχέδια δεν έχουν διαμορφωθεί σε συνδυασμό με την άποψη του κατασκευαστή. Επομένως, στις σύγχρονες διαδικασίες fast track, η έλλειψη συμμετοχής του κατασκευαστή στη φάση του σχεδιασμού είναι πολύ επικίνδυνη.

Τελικά, μετά από εφαρμογή της μεθόδου σε πολυάριθμα κατασκευαστικά έργα προκύπτει το εξής συμπέρασμα: η πραγματοποίηση της κατασκευής προηγούμενων πακέτων χωρίς ολοκληρωμένο σχεδιασμό των επόμενων πακέτων, διατρέχει τον κίνδυνο αύξησης του κόστους και καθυστέρησης της κατασκευής λόγω αλλαγών.

### 3.4.4 Κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας

Τα στοιχεία που πρέπει να υπάρχουν προκειμένου να εφαρμοστεί επιτυχώς η μέθοδος fast track, είναι τα εξής: (Cho et al., 2010)

- Πρέπει στην αρχή του σχεδιασμού να γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις ώστε να αποφευχθούν οι αλλαγές στην πορεία της κατασκευής, ενώ πρέπει να έχει διαμορφωθεί το κατάλληλο σύστημα λήψης αποφάσεων στην περίπτωση που πρέπει να αντιμετωπισθούν αλλαγές και το κατάλληλο σύστημα επικοινωνίας.
- Πρέπει να υπάρχει συστηματικός έλεγχος για την τήρηση του χρονοδιαγράμματος και της διάρκειας των προμηθειών.
- Πρέπει να γίνεται ακριβής ορισμός των λεπτομερειών των σχεδίων και ελαχιστοποίηση των λαθών σε αυτά (με τη συμμετοχή όλων των συμμετεχόντων) καθώς βάση αυτών εξελίσσεται η διαδικασία fast track.
- Πρέπει να γίνεται διαχείριση των σχέσεων μεταξύ των συμμετεχόντων στο σχεδιασμό.
- Πρέπει να γίνεται σχηματισμός ενιαίας ομάδας που περιλαμβάνει τον ιδιοκτήτη και τον κατασκευαστή πριν από το σχεδιασμό ώστε να προληφθούν λάθη και αλλαγές στην πορεία της κατασκευής.
- Πρέπει να γίνεται σωστή διαχείριση των λαθών και των αλλαγών, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη επιτυχία του έργου αφού σχεδιασμός και κατασκευή αλληλεπικαλύπτονται.
- Πρέπει να υπάρχει στρατηγική για την προμήθεια πόρων και εξοπλισμού καθώς καθυστερήσεις σε αυτήν προκαλούν καθυστερήσεις στην κατασκευή αλλά μειώνουν και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η εμπειρία της ομάδας διοίκησης και η σειρά προτεραιοτήτων της παίζουν σημαντικό ρόλο στην σωστή εφαρμογή της μεθόδου. Η ομάδα του έργου πρέπει να είναι ευέλικτη και να ανταποκρίνεται γρήγορα σε επιπλοκές που προκύπτουν από τον συνδυασμό ελλιπών σχεδίων και αλληλοεπικάλυψης σχεδιασμού και κατασκευής.

## **B). Μέθοδοι Βελτιστοποίηση Χρονοδιαγράμματος Τεχνικού Έργου**

Εφόσον παρατηρηθεί καθυστέρηση στην εξέλιξη των εργασιών η παρακάτω μέθοδος μπορεί να βοηθήσει στην ολοκλήρωση του έργου στην επιθυμητή διάρκεια.

### **3.5 Εντατικοποίηση χρονοδιαγράμματος με προσθήκη/αύξηση χρήσης πόρων (Crashing)**

#### **3.5.1 Γενικά – Ορισμός**

Η εύρεση της βέλτιστης καμπύλης διάρκειας – κόστους του έργου είναι από τους στόχους του σχεδιασμού της κατασκευής του έργου. Εντατικοποιώντας το χρονοδιάγραμμα μπορεί να κατασκευασθεί μια τέτοια καμπύλη.

Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τη δομή ενός έργου (τις απαιτούμενες δραστηριότητες και την αλληλουχία των λειτουργιών) και ότι κάθε δραστηριότητα μπορεί γενικά να ολοκληρωθεί με ένα αριθμό διαφορετικών τρόπων (καθένας από τους οποίους μπορεί να συνδεθεί με συγκεκριμένη διάρκεια και κόστος), ο στόχος της ανάλυσης (σχεδιασμού της κατασκευής) είναι να βρεθεί η κατάλληλη επιλογή εκτέλεσης για κάθε δραστηριότητα έτσι ώστε το έργο να ολοκληρωθεί μέχρι μια συγκεκριμένη προθεσμία και με τον βέλτιστο τρόπο, δηλαδή με το ελάχιστο κόστος. Εάν αυτή η ανάλυση επαναληφθεί για κάθε εφικτή διάρκεια έργου (μια διαδικασία γνωστή ως project crashing), δημιουργείται η βέλτιστη καμπύλη διάρκειας – κόστους για το έργο. Συνυπολογίζοντας, επιπροσθέτως, άλλα κόστη που συνδέονται με το έργο (γενικά έξοδα), καθορίζεται η βέλτιστη δυνατή διάρκεια (δηλαδή αυτή που ανταποκρίνεται στο χαμηλότερο συνολικό κόστος) (Sakellaropoulos & Chassiakos, 2004).

Ο όρος εντατικοποίηση χρονοδιαγράμματος ορίζεται ως η προσθήκη επιπλέον πόρων κατά τη διάρκεια της κατασκευής προκειμένου να επιταχυνθεί η εκτέλεση των εργασιών και άρα η ολοκλήρωση του έργου. Συχνά η εντατικοποίηση πραγματοποιείται και με προγραμματισμό εργασιών με υπερωρίες της ήδη υπάρχουσας ομάδας εργασίας.

Οι επιπλέον πόροι μπορεί να προέλθουν από την ομάδα του έργου ή μπορεί να είναι προσωρινό δάνειο από αλλού, εκτός της ομάδας.

#### **3.5.2 Προβλήματα – Περιορισμοί**

Παρόλο που η προσθήκη των πόρων συνεπάγεται σχεδόν αυτονόητα την επιτάχυνση της εργασίας, καθώς για την ίδια εργασία απασχολούνται περισσότερα άτομα ή εξοπλισμός, δεν πρέπει να παραβλέπεται η επίδραση της καμπύλης μάθησης και η αποδοτικότητα που αντιστοιχεί σε κάθε πόρο.

Η προσθήκη πόρων δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση. Συχνά καταλήγει να χρειάζεται περισσότερο χρόνο στην πορεία. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω. Οι νέοι πόροι δεν θα είναι εξοικειωμένοι με τις εργασίες, οπότε πιθανότατα θα είναι λιγότερο παραγωγικοί από τα ήδη υπάρχοντα μέλη της ομάδας. Τα πιο παραγωγικά μέλη θα είναι αυτά που θα καθοδηγήσουν τα καινούρια, ενώ θα μπορούσαν να εργάζονται για να ολοκληρώσουν πιο γρήγορα. Πολλές φορές τα επιπλέον 'χέρια' είναι μόνο επιφανειακά καταρτισμένα για την εργασία και ακόμα και αν έχουν τις κατάλληλες ικανότητες μπορεί να μην είναι στο ίδιο επίπεδο με τα υπάρχοντα μέλη της ομάδας.

Η αύξηση του μεγέθους του συνεργείου πάνω από το φυσιολογικό συντελεί σε μείωση του διαθέσιμου χώρου εργασίας ανά εργαζόμενο, σε χαμηλής ποιότητας επικοινωνία, σε περιττή εξάρτηση από τα άλλα μέλη της ομάδας, και άρα μειώνει την αποδοτικότητα της εργασίας. Σύμφωνα με τον Singh A. (2003) οι δύο έρευνες, των Waldorn (1969) και O'Connor (1969) δείχνουν μια μέγιστη απώλεια αποδοτικότητας 29%, όταν γίνεται 50% αύξηση προσωπικού. Αντίθετα, το διάγραμμα του Σώματος Μηχανικών Στρατού των Η.Π.Α. δείχνει ότι πραγματοποιείται 20% απώλεια αποδοτικότητας, με 100% αύξηση προσωπικού.

Συνοψίζοντας, τα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν με την ανάθεση υπερωριακής εργασίας ή με την εισαγωγή πρόσθετου ανθρώπινου δυναμικού, είναι:

- απώλεια αποδοτικότητας,
- εργασία εκτός ακολουθίας,
- γέννηση περισσότερων ελαττωμάτων στην εργασία, 'κόψιμο γωνιών' (βιαστική εργασία με ελλείψεις), αποκλίσεις στην ποιότητα
- απώλεια κίνητρου για εργασία, επιπλέον διορθωτικές εργασίες,
- εξάντληση του προσωπικού.

Επομένως, τα προβλήματα που προκύπτουν είναι ποικίλα και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και διαχείριση για την εφαρμογή αυτών των τακτικών. Η διαδικασία που ακολουθείται για την αποδοτικότερη εντατικοποίηση αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

### 3.5.3 Εφαρμογή εντατικοποίησης χρονοδιαγράμματος

Γενικά, η συνολική διάρκεια της κατασκευής αλλά και οι διάρκειες που αντιστοιχούν σε κάθε δραστηριότητα ξεχωριστά έχουν μια συγκεκριμένη τιμή, την κανονική διάρκεια και τη διάρκεια που αντιστοιχεί στη διαδικασία εντατικοποίησης, την ελάχιστη διάρκεια. Για κάθε διάρκεια εκτιμάται και αντιστοιχίζεται το ανάλογο κόστος.

Ο χρόνος κατασκευής μιας δραστηριότητας  $T_k$  μεταβάλλεται μιας γενικής τιμής  $T_{kN}$ , η οποία ονομάζεται "κανονικός χρόνος κατασκευής" και μιας ελάχιστης δυνατής τιμής  $T_{kMin}$ :



$$T_{kMin} \leq T_k \leq T_{kN}$$

Ο κανονικός χρόνος αναφέρεται στο χρόνο κατασκευής κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, χωρίς εντατικοποίηση, και για το κανονικό κόστος. Ο ελάχιστος χρόνος κατασκευής καθορίζεται αφού εξαντληθούν όλες οι δυνατότητες εντατικοποιήσεως των εργασιών, στις οποίες αναφέρεται η δραστηριότητα.

Γενικά υπάρχει μια ημερομηνία ολοκλήρωσης που αποτελεί προθεσμία και το έργο χρειάζεται να επισπευτεί. Κάτι τέτοιο υπονοεί ότι κάποιες δραστηριότητες πρέπει να ολοκληρωθούν ταχύτερα από το κανονικό. Για κάθε δραστηριότητα καθορίζεται ο κανονικός χρόνος ολοκλήρωσης και ο εντατικός χρόνος ολοκλήρωσης και αντίστοιχα εκτιμώνται για τη δραστηριότητα το κανονικό κόστος και το εντατικό κόστος. (Babu A.J.G & Suresh N., 1996)

Η εντατική ολοκλήρωση μιας δραστηριότητας μπορεί να περιλαμβάνει επιβαρύνσεις υπερωριών, εξειδικευμένους πόρους, και ταχύτερη φθορά λόγω χρήσης του εξοπλισμού. Έτσι, η εντατικοποίηση μιας δραστηριότητας εξοικονομεί χρόνο αλλά αυξάνει το κόστος. Ένα πρόβλημα αποφάσεων που εξετάζεται στη βιβλιογραφία της διαχείρισης τεχνικών έργων είναι ο καθορισμός των δραστηριοτήτων προς εντατικοποίηση και η έκταση της εντατικοποίησης.

Η εντατικοποίηση της διαδικασίας της κατασκευής γίνεται με σκοπό τη μείωση της διάρκειας του έργου, ωστόσο δεν χρειάζεται να εντατικοποιηθούν όλες οι δραστηριότητες του έργου καθώς το κόστος για κάτι τέτοιο είναι πολύ μεγάλο.

«Είναι γνωστό ότι η ανάθεση υπερωριών ή/και απασχόληση επιπλέον πληρώματος είναι αποφάσεις που βασίζονται στις δραστηριότητες (δεν βασίζονται στο έργο). Έτσι, η υπερωριακή εργασία (ή πρόσληψη επιπλέον πόρων) συνήθως γίνεται σε μια συγκεκριμένη δραστηριότητα ή σε κάποιες επιλεγμένες δραστηριότητες αντί σε ολόκληρο το έργο» (Li et al., 2000)

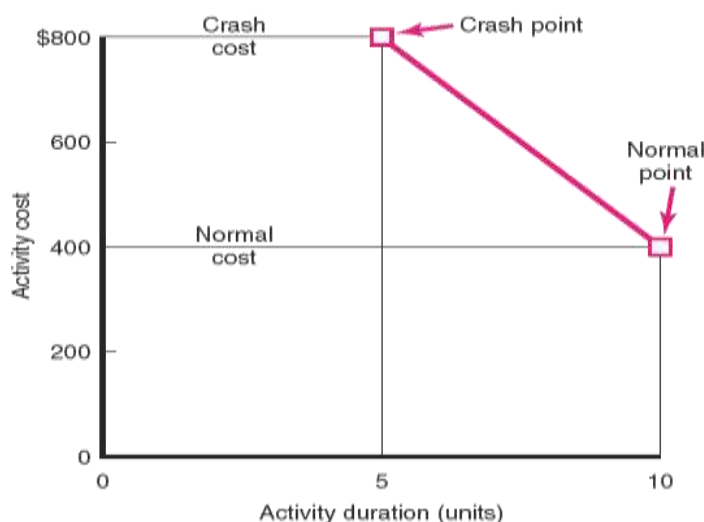
Επομένως το πρόβλημα προς επίλυση, είναι ο εντοπισμός των δραστηριοτήτων που πρέπει να εντατικοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί το υψηλότερο κέρδος. Όπως επισημάνθηκε και στην μέθοδο Κρίσιμης Αλυσίδας (CCPM), οι δραστηριότητες της κρίσιμης διαδρομής είναι αυτές που επηρεάζουν την συνολική διάρκεια του έργου και άρα σε αυτές τείνει να γίνει η εντατικοποίηση.

Το μέγεθος της μείωσης της διάρκειας του έργου από τον κανονικό χρόνο προς το βέλτιστο εξαρτάται από την ευαισθησία του δικτύου του έργου.

Ευαίσθητο δίκτυο είναι αυτό το οποίο έχει αρκετές κρίσιμες ή σχεδόν κρίσιμες διαδρομές. Πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή κατά τη μείωση του μεγέθους ευαίσθητων δικτύων ώστε να αποφευχθούν αυξανόμενοι κίνδυνοι στο έργο. Αντίστροφα, τα μη ευαίσθητα δίκτυα αποτελούν ευκαιρίες για πιθανώς μεγάλη εξοικονόμηση στο κόστος του έργου μέσω εξάλειψης μερικών γενικών εξόδων, με μικρό κίνδυνο αρνητικών αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βήματα που πρέπει να γίνουν για την επιλογή δραστηριοτήτων προς εντατικοποίηση και τις ενέργειες που απαιτούνται για την επιτάχυνση αυτών (Gray & Larson, 2008):

1. Υπολογισμός κλίσεων κόστους – διάρκειας για κάθε δραστηριότητα. Εντοπισμός της δραστηριότητας με το χαμηλότερο κόστος εντατικοποίησης ανά μονάδα, που μπορεί να επιταχυνθεί. (πρώτα για δραστηριότητες της κρίσιμης διαδρομής)



**Σχήμα 3.6: Γράφημα κόστους – διάρκειας δραστηριότητας. (Πηγή: Gray C.F. & Larson E.W., 2008)**

2. Μείωση διάρκειας της συγκεκριμένης δραστηριότητας κατά το μέγιστο δυνατό. Εκ νέου υπολογισμός συνολικού χρόνου και κόστους.
3. Επανάληψη των βημάτων 1 και 2. Προσοχή στο σχηματισμό νέων κρίσιμων διαδρομών και στις επιπτώσεις στο κόστος που αυτό μπορεί να συνεπάγεται. Πιθανώς να απαιτείται η ταυτόχρονη επιτάχυνση διαφορετικών δραστηριοτήτων.
4. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν οι δραστηριότητες που επηρεάζουν τη διάρκεια του έργου έχουν την ελάχιστη δυνατή διάρκεια και επιπλέον μείωση σε κάποια από τις άλλες δραστηριότητες δεν θα μειώσει περαιτέρω τη διάρκεια του έργου.

Σε αντίθεση με την παραπάνω μέθοδο, στα γραμμικά έργα μπορεί να εφαρμοσθεί η αντίθετη στρατηγική για την επιτάχυνση της κατασκευής. Η τεχνική αυτή παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

### **3.6 Επιτάχυνση Γραμμικών Έργων χωρίς Αύξηση του Βαθμού Χρήσης των Μέσων Παραγωγής (Καλλαντζής και Λαμπρόπουλος, 2005)**

#### **3.6.1 Γενικά**

Οι γραμμικές μέθοδοι χρονικού προγραμματισμού έχουν κύριο στόχο τη διατήρηση της συνέχειας στην χρήση των μέσων παραγωγής, η οποία ελαχιστοποιεί τον μη παραγωγικό χρόνο τους και μεγιστοποιεί τα οφέλη από την εκμετάλλευση του φαινομένου της καμπύλης μάθησης. Όμως η αυστηρή προσκόλληση στον περιορισμό της συνέχειας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.

Έτσι πολλοί ερευνητές άρχισαν να παρατηρούν ότι στα γραμμικά έργα είναι δυνατό να επιτευχθεί σύντμηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης με επέκταση της διάρκειας ορισμένων δραστηριοτήτων, χωρίς να απαιτηθεί αύξηση στην ένταση χρήσης των μέσων παραγωγής. Η αύξηση της διάρκειας των παραπάνω δραστηριοτήτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους, αλλά η μείωσή της διάρκειας του έργου έχει θετικές επιπτώσεις στο συνολικό κόστος.

Η αναγνώριση των δραστηριοτήτων εκείνων που η αύξηση της διάρκειας προκαλεί μείωση της συνολικής διάρκειας του έργου, στηρίζεται στον αλγόριθμο χρονικού προγραμματισμού και προσδιορισμού κρίσιμης διαδρομής γραμμικών έργων KLRPM (Kallantzis & Lambropoulos 2004).

Η KLRPM απεικονίζει την πρόοδο των εργασιών σε άξονες Χρόνου – Θέσης/Απόστασης (άξονας Y και X αντίστοιχα) και στηρίζεται στους περιορισμούς ελάχιστου χρόνου και ελάχιστης θέσης/απόστασης, παρόμοια με τη διαφορά χρόνου (time buffer) και τη διαφορά σταδίου (stage buffer), όπως αυτές ορίστηκαν από τον Reda (1990).

Η μέθοδος προσδιορισμού της κρίσιμης διαδρομής αποτελείται από δύο βήματα.

Πρώτα αναγνωρίζονται οι δυνητικά κρίσιμες δραστηριότητες (κρίσιμη ακολουθία) και κατόπιν υπολογίζονται τα κρίσιμα τμήματά τους. Στα γραμμικά χρονοδιαγράμματα, σε αντίθεση με τα δικτυωτά όπου οι δραστηριότητες είναι διακριτές, η κρίσιμη διαδρομή μπορεί να μεταπέσει από μια δραστηριότητα σε άλλη οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Για την αναγνώριση της κρίσιμης ακολουθίας η διαδικασία ξεκινά από την τελευταία χρονικά δραστηριότητα. Η τερματική δραστηριότητα ανήκει στην κρίσιμη ακολουθία. Συνεχίζει ακολουθώντας τον καθοριστικό της προκάτοχο (driving predecessor) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εξεταστεί και η πρώτη χρονικά δραστηριότητα (αρχική). Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει ότι έχει επιλεγεί η μεγαλύτερη διαδρομή στο έργο.

Αφού αναγνωριστεί η κρίσιμη ακολουθία, καθορίζονται τα κρίσιμα τμήματα των δραστηριοτήτων. Ξεκινώντας από το τέλος της τερματικής δραστηριότητας η κρίσιμη

διαδρομή κινείται μέχρι να συναντήσει το σημείο όπου βρίσκεται ο περιορισμός (χρόνου ή απόστασης) με την καθοριστική προκάτοχη δραστηριότητα. Στο σημείο αυτό η διαδρομή μεταπηδά στην επόμενη δραστηριότητα κατά τη διεύθυνση της Θέσης/Απόστασης ή του Χρόνου, ανάλογα με τον αν ο περιορισμός είναι Θέσης/Απόστασης ή Χρόνου αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να εξεταστεί και η αρχική δραστηριότητα.

Αν η προβολή του περιορισμού με την ακόλουθη δραστηριότητα βρίσκεται δεξιά από τον περιορισμό με την προκάτοχη, το τμήμα της δραστηριότητας μεταξύ των περιορισμών είναι κρίσιμο. Αν η προβολή του περιορισμού της ακόλουθης βρίσκεται αριστερά του περιορισμού με την προκάτοχη, τότε η δραστηριότητα αυτή ανήκει στην κατηγορία των υπό αναζήτηση δραστηριοτήτων, δηλαδή εκείνων των οποίων εάν αυξηθεί η διάρκεια θα μειωθεί η συνολική διάρκεια του έργου. Η τερματική δραστηριότητα θεωρείται ότι έχει περιορισμό ακόλουθης στο τελευταίο σημείο της και η αρχική δραστηριότητα περιορισμό προκάτοχης στο πρώτο σημείο της.

Τα τμήματα των δραστηριοτήτων, τα οποία βρίσκονται έξω από τους περιορισμούς των καθοριστικών προκατόχων και ακολούθων αποκτούν χρονικό περιθώριο, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί.

Μετά τον εντοπισμό των υπόψη δραστηριοτήτων ακολουθεί η διαδικασία αύξησης της διάρκειάς τους. Ο απλούστερος και επιθυμητός τρόπος αύξησης της διάρκειας μιας δραστηριότητας είναι με ομοιόμορφη μείωση των μέσων παραγωγής, που είναι καταναμημένα σε αυτή. Ο συγκεκριμένος τρόπος έχει όμως περιορισμένο πεδίο εφαρμογής, καθώς παίρνει τιμές όχι από συνεχές, αλλά από διακριτό πεδίο τιμών. Εάν η επιθυμητή διάρκεια, ανήκει στο σύνολο των ανωτέρω διακριτών τιμών, τότε η αύξηση της διάρκειάς της δύναται να επιτευχθεί ομοιόμορφα.

Αν όμως η απαιτούμενη διάρκεια δεν ανήκει στο σύνολο των διακριτών τιμών ή το ελάχιστο απαιτούμενο συνεργείο για την εκπόνηση της δραστηριότητας εκτελεί το απαιτούμενο έργο σε μικρότερο χρόνο από τον επιθυμητό, τότε η αύξηση της διάρκειας επιτυγχάνεται με την εισαγωγή διακοπών εργασίας.

Ως ελάχιστη διακοπή εργασίας ορίζεται ο ελάχιστος χρόνος κατά τον οποίο ένα μέσο παραγωγής δύναται να μην εργάζεται και εξαρτάται από τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του μέσου αυτού σε κάποια άλλη δραστηριότητα. Αντιστοίχως, η μετακίνηση ενός μέσου παραγωγής μπορεί να μη δύναται να πραγματοποιηθεί παρά σε συγκεκριμένες θέσεις. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η διακοπή εργασίας να εισαχθεί στις επιτρεπόμενες θέσεις.

### **3.6.2 Προτεινόμενη Μέθοδος Επιτάχυνσης Γραμμικών Έργων**

#### **3.6.2.1 Ομοιόμορφη μείωση έντασης μέσων παραγωγής**

Έστω ότι η αύξηση της διάρκειας μιας δραστηριότητας  $B$  πραγματοποιείται με ομοιόμορφη ένταση των μέσων παραγωγής, που είναι καταναμημένα σε αυτή. Ο αλγόριθμος επιτάχυνσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- i. Αυξάνεται η διάρκεια της δραστηριότητας B κατά μία ημέρα.
- ii. Επαναυπολογίζεται το ωρότερο πέρας του έργου.
- iii. Αν το νέο ωρότερο πέρας του έργου είναι μικρότερο ή ίσο με το προηγούμενο, αυξάνεται η διάρκεια της B κατά μία ακόμη ημέρα.
- iv. Τα βήματα ii και iii επαναλαμβάνονται μέχρι το νέο πέρας να είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο.

Στην περίπτωση, που η δραστηριότητα αποτελείται από τμήματα με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής, επιβάλλεται ομοιόμορφη μείωση του ρυθμού σε όλα.

### 3.6.2.2 Διακοπές εργασίας σε υπολογιζόμενες θέσεις

Ο αλγόριθμος επιτάχυνσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- i. Η δραστηριότητα B σαρώνεται από το τέλος της κατά βήμα, το οποίο είναι συνάρτηση του συνολικού μήκους της (το βήμα μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας και την ταχύτητα του υπολογιστή). Σε κάθε βήμα ελέγχεται εάν είναι δυνατή η εισαγωγή της ελάχιστης διακοπής εργασίας χωρίς να καθυστερήσει το πέρας της B. Αν με την εισαγωγή της διακοπής εργασίας καθυστερεί το πέρας της B προχωρά η σάρωση κατά ένα βήμα ακόμη, ειδάλλως εισάγεται η διακοπή εργασίας.

- ii. Η διαδικασία σάρωσης συνεχίζεται από το πέρας της παραπάνω διακοπής μέχρι να ελεγχθεί όλη η δραστηριότητα.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται και στην περίπτωση κατά την οποία οι δραστηριότητες αποτελούνται από τμήματα με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής.

Η λύση αυτή όπου η προκαθορισμένη διακοπή εργασίας έχει τιμή δύο ημερών, είναι υποδεέστερη αυτής της ομοιόμορφης μείωσης της έντασης χρήσης των μέσων παραγωγής όπου η αύξηση της διάρκειας της B έχει επιτευχθεί ομοιόμορφα.

### 3.6.2.3 Διακοπές εργασίας σε συγκεκριμένες θέσεις

Ο αλγόριθμος επιτάχυνσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- i. Η δραστηριότητα B σαρώνεται από το τέλος προς την αρχή. Στο πρώτο προκαθορισμένο σημείο εισάγεται διακοπή ίση με την ελάχιστη επιθυμητή και ελέγχεται εάν καθυστερεί το πέρας της δραστηριότητας.

- ii. Αν συμβαίνει αυτό η διαδικασία προχωρά στο επόμενο σημείο όπου υπάρχει η δυνατότητα διακοπής εργασιών, ειδάλλως αυξάνεται η διακοπή κατά μία ημέρα στο σημείο εκείνο και επαναλαμβάνεται ο έλεγχος.

Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου προκληθεί αύξηση στο πέρας αυτής.

- iii. Ο έλεγχος συνεχίζεται στο επόμενο σημείο εισαγωγής διακοπής εργασιών.

Ο αλγόριθμος καλύπτει και την περίπτωση κατά την οποία οι δραστηριότητες αποτελούνται από τμήματα με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής.

### 3.6.3 Επίδραση της μεθόδου στο κόστος του έργου

Η επιβάρυνση που επιφέρει η επιτάχυνση στο συνολικό κόστος του έργου, είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Οι συγκεκριμένες συνθήκες προγραμματισμού των πόρων για την εκτέλεση των δραστηριοτήτων είναι από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, παράγοντες που επιδρούν στην επιβάρυνση του κόστους είναι το κατά πόσο κάποιες δραστηριότητες εκτελούνται με τα ίδια μέσα ή όχι καθώς επίσης και το αν υπάρχει η δυνατότητα απασχόλησης των μέσων παραγωγής κατά την διάρκεια των διακοπών εργασίας σε άλλες δραστηριότητες.

Συνήθως, οι δραστηριότητες προς επιβράδυνση αφορούν δευτερεύουσες εργασίες, που είτε δεν έχουν μεγάλο κόστος, είτε έχουν μικρό κόστος επιβράδυνσης. Επομένως, σημειώνονται μικρές επιβαρύνσεις κόστους κατά τη συμπίεση του χρόνου.

Ωστόσο, αν ληφθούν υπόψη πιθανά επιπρόσθετα οφέλη από πιθανή πριμοδότηση για νωρίτερη ολοκλήρωση του έργου, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη αποτελεσματικότητα κόστους.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, ο υπολογισμός της αποτελεσματικότητας της μεθόδου και των επιπτώσεων της στο κόστος του έργου πρέπει να γίνεται ξεχωριστά για κάθε έργο.

### 3.6.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα μέθοδος αναπτύσσει μεθοδολογία επιτάχυνσης σε γραμμικά έργα με επιμήκυνση της διάρκειας ορισμένων δραστηριοτήτων χωρίς αύξηση στην ένταση χρήσης των μέσων παραγωγής. Οι εν λόγω δραστηριότητες αφορούν συνήθως σε δευτερεύουσες εργασίες που είτε δεν έχουν μεγάλο κόστος είτε έχουν μικρό κόστος επιβράδυνσης.

Η αύξηση της διάρκειας τους επιτυγχάνεται ή με ομοιόμορφη μείωση της έντασης των καταναμημένων μέσων παραγωγής, είτε με την εισαγωγή διακοπών εργασίας σε υπολογιζόμενες θέσεις είτε με την εισαγωγή διακοπών εργασίας σε συγκεκριμένες θέσεις στο έργο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, εκτός του ότι η διάρκεια του έργου μειώνεται, στην περίπτωση ομοιόμορφης μείωσης στην ένταση χρήσης των μέσων παραγωγής, ο χρόνος ολοκλήρωσης του έργου γίνεται μικρότερος και από αυτόν της δικτυωτής μεθόδου.

### 3.7 Συγκριτική Αξιολόγηση

Μετά από την παρουσίαση των θετικών και αρνητικών χαρακτηριστικών των μεθόδων επιτάχυνσης, προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας.

Ο πίνακας καθιστά εύκολη την εποπτεία των μεθόδων και βοηθά στην επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου ανάλογα με το έργο και τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

<u>Μέθοδοι</u> Χαρακτηριστικά	Συνεταιρισμός (Partnering)	Κρίσιμη Αλυσίδα (CCPM)	Επιτάχυνση (Fast Track)	Εντατικοποίηση (Crashing)
Πρόσθετο κόστος			X	X
Κλίμα συνεργασίας	X			
Συμβολή σε συνολική επιτυχία έργου	X			
Έλεγχος εξέλιξης εργασιών		X		
Θεώρηση αβεβαιότητας διαρκειών		X		
Εξέταση διαθεσιμότητας πόρων		X		
Εξέταση κόστους	X			X
Παράλληλες δραστηριότητες			X	
Κίνδυνος Καθυστερήσεων			X	X
Χρήση Κρίσιμης Διαδρομής		X		X
Χρήση Buffer		X		
Κίνδυνος υποβιβασμού ποιότητας				X
Διαίρεση σε πακέτα εργασίας			X	
Μείωση αποδοτικότητας				X
Συνδυασμός με άλλες μεθόδους	X			

**Πίνακας 3.1: Σύγκριση Παραδοσιακών Μεθόδων**

Η μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας και η μέθοδος Fast-track χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση του αρχικού προγραμματισμού του έργου. Αντίθετα η εντατικοποίηση των εργασιών με προσθήκη πόρων ή με αύξηση του βαθμού χρήσης των πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί και κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Η μέθοδος του συνεταιρισμού είναι μία τεχνική η οποία αφορά τις σχέσεις μεταξύ των συμβαλλομένων μερών και μέσω της επίτευξης ενός κλίματος εμπιστοσύνης και εξουδετέρωσης των αντιδικιών να αποφευχθούν οι τυχόν σχετικές καθυστερήσεις και τα αντίστοιχα επιπλέον έξοδα. Συνεπώς, η τεχνική αυτή συστήνεται σε κάθε έργο και να συνδυαστεί με όλες τις υπόλοιπες τεχνικές και μοντέλα βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος της Κρίσιμης Αλυσίδας είναι η μόνη που εξετάζει την διαθεσιμότητα των πόρων και παρέχει τον πιο εποπτικό τρόπο παρακολούθησης των εργασιών. Η μέθοδος fast-track ωστόσο, με την διαίρεση των καθηκόντων σε πακέτα εργασίας, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ξεχωριστών συμβάσεων ανά πακέτα εργασίας, ικανοποιώντας έτσι ενδιάμεσες προθεσμίες πριν την τελική παράδοση του έργου.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους κίνδυνους που ελλοχεύουν στην εφαρμογή κάποιων μεθόδων. Η μέθοδος Crashing απαιτεί πρόσθετο κόστος επιτάχυνσης, πράγμα που δεν συμβαίνει με τη μέθοδο του Συνεταιρισμού και της Κρίσιμης Αλυσίδας. Επίσης, κίνδυνος αναπάντεχων κοστών υπάρχει στη μέθοδο Fast-Track. Απαιτείται ενδελεχής και προσεκτικός σχεδιασμός προκειμένου να διασφαλιστεί η αποφυγή λαθών και αλλαγών καθώς και άμεση αντιμετώπιση αυτών εάν τελικά αυτές εμφανιστούν.

Τέλος, και στις δύο αυτές μεθόδους υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης αναπάντεχων καθυστερήσεων. Στη μέθοδο Fast-track, αυτές οφείλονται σε πιθανές αλλαγές που μπορεί να εμφανιστούν και είναι δύσκολο να αντιμετωπισθούν άμεσα λόγω της παράλληλης διεξαγωγής εργασιών. Στη μέθοδο Crashing, οι καθυστερήσεις προέρχονται λόγω απειρίας των νέων πόρων, αλλά και λόγω πιθανή εξάντλησης του προσωπικού στην περίπτωση εφαρμογής υπερωριακής εργασίας. Ιδιαίτερη προσοχή επομένως χρειάζεται στην εφαρμογή και αυτής της μεθόδου.



## Γ). Μοντέλα Βελτιστοποίησης με εφαρμογή στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων

### 3.8 Γραμμικός Προγραμματισμός

#### 3.8.1 Γενικά

Ο γραμμικός προγραμματισμός αναπτύχθηκε πρώτη φορά από τον Ρώσο μαθηματικό Leonid Kantorovich το 1939.

Η μέθοδος μπορεί να ορισθεί ως εξής:

«Γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) είναι το σύνολο των υπολογιστικών τεχνικών για τον προσδιορισμό του μέγιστου ή του ελάχιστου μιας γραμμικής συνάρτησης της οποίας οι μεταβλητές απαιτείται να ικανοποιούν ένα σύστημα γραμμικών ανισοεξισώσεων. Τέτοιας μορφής προβλήματα αναφέρονται στον τρόπο αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων ενός συστήματος έτσι ώστε οι απαιτήσεις του συστήματος να ικανοποιούνται και η απόδοσή του να βελτιστοποιείται».

Είναι μια πολύ δημοφιλής μαθηματική τεχνική, ειδικά στους τομείς της επιχειρησιακής έρευνας και της διοικητικής επιστήμης, που εφαρμόζεται στην επίλυση προβλημάτων με γραμμικότητα.

Το μεγάλο εύρος χρήσης της μεθόδου είναι γνωστό καθώς κυριαρχεί η αντίληψη ότι, τρεις στις τέσσερις εφαρμογές μοντέλων επιχειρησιακής έρευνας σε πραγματικά προβλήματα διοίκησης παραπέμπουν στο γραμμικό προγραμματισμό (Γ.Π.).

Ο Γ.Π. χρησιμοποιείται από τους επιχειρησιακούς ερευνητές ή τους αναλυτές προβλημάτων απόφασης για τη προσέγγιση προβλημάτων κατανομής περιορισμένων πόρων ή μέσων σε εναλλακτικές και ανταγωνιστικές μεταξύ τους δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Με τον γραμμικό προγραμματισμό δηλαδή, καθορίζονται οι στάθμες των δραστηριοτήτων ενώ βελτιστοποιούνται κάποια κριτήρια επιλογής.

Σύμφωνα με τον Κολέτσο Ι. (2006,Β), το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα αυτών των αποφάσεων (κριτήρια απόφασης) μπορεί να αφορά τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους από πωλήσεις, την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής, τη μεγιστοποίηση της απασχόλησης, την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, κ.λπ.

Πιο συγκεκριμένα, ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να οριστεί ως το πρόβλημα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης μιας γραμμικής συνάρτησης, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση και υποβάλλεται σε γραμμικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισότητες ή ανισότητες.

Η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση είναι της μορφής:

$$\max Z = c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + \dots + c_n * x_n$$

(ή min)

και οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται της μορφής:

$$a_{11} * x_1 + a_{12} * x_2 + \dots + a_{1n} * x_n (\leq \geq) b_1$$
$$a_{21} * x_1 + a_{22} * x_2 + \dots + a_{2n} * x_n (\leq \geq) b_2$$

...

$$a_{m1} * x_1 + a_{m2} * x_2 + \dots + a_{mn} * x_n (\leq \geq) b_m$$

$$\text{και } x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Η ανισότητα  $\leq$  αντιστοιχούν σε πρόβλημα μεγιστοποίησης. Αντιθέτως, οι ανισότητες  $\geq$  σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Οι άγνωστες μεταβλητές προσδιορίζουν (μοντελοποιούν) το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και ονομάζονται για το σκοπό αυτό μεταβλητές απόφασης (decision variables).

Με το σχηματισμό τέτοιων κατάλληλων εξισώσεων σχηματίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο, με τη χρήση του οποίου γίνεται εφικτή η λήψη αποφάσεων. Πρακτικά, με αυτήν την μαθηματική μοντελοποίηση, περιγράφεται τόσο η δομή όσο και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων του συστήματος.

### 3.8.2 Ακέραιος και μικτός προγραμματισμός

Υπάρχουν κάποια προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού στα οποία όλες οι μεταβλητές μπορούν να λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές. Τα προβλήματα αυτά ονομάζονται προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού.

Σε άλλα προβλήματα, κάποιες μεταβλητές περιορίζονται στο να λαμβάνουν ακέραιες τιμές, ενώ άλλες όχι. Τα προβλήματα αυτά λέγονται προβλήματα μικτού προγραμματισμού. Προκειμένου να επιλυθούν οι παραπάνω κατηγορίες προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί κάποιες συγκεκριμένες μέθοδοι.

«Σε περιπτώσεις που οι μεταβλητές απόφασης ενός Γ.Π. είναι φραγμένες, παίρνουν δηλαδή περιορισμένο αριθμό ακέραιων τιμών, οι ιδεώδεις μέθοδοι επίλυσης ακέραιων Γ.Π. είναι οι μέθοδοι τύπου διακλάδωση και οριοθέτηση (branch and bound methods) οι οποίες στηρίζονται σε μια έμμεση απαρίθμηση των δυνατών ακέραιων λύσεων που επιδέχεται το πρόβλημα». (Κολέτσος Ι., 2006, Α)

### 3.8.3 Ο Γραμμικός προγραμματισμός στη διαχείριση τεχνικών έργων

Η εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού στη διαχείριση τεχνικών έργων ξεκινάει αρκετές δεκαετίες πριν. Πολλοί είναι οι μελετητές που κατασκεύασαν μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, ο Kelly (1961) και ο Fulkerson (1961) ανέπτυξαν μοντέλα, που προσπαθούσαν να λύσουν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σχέσης μεταξύ χρόνου και κόστους, χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό και υπολογισμούς της ροής δικτύων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν φραγμένες, γραμμικές σχέσεις με το κόστος, συνεχείς, μη αυξανόμενες σχέσεις μεταξύ χρόνου και κόστους. Η επίλυση αυτών έγινε με συγκεκριμένες μεθόδους. Όμως, *«οι καμπύλες κόστους δραστηριοτήτων ενός έργου, συχνά παραβιάζουν αυτές τις υποθέσεις αυτές [...] καθιστώντας την αξία ενός τέτοιου τύπου μοντέλου πολύ περιορισμένη»* (Cusack M., 1985).

Μερικά χρόνια αργότερα, οι Meyer & Shaffer (1965) χρησιμοποίησαν μεθόδους γραμμικού ακέрайου προγραμματισμού για τον χειρισμό περισσότερο πολύπλοκων συναρτήσεων αποδοτικότητας χρόνου και κόστους. *«Οι δυσκολίες που συνδέονται με αυτή την προσέγγιση είναι ο μεγάλος αριθμός μεταβλητών και σταθερών που απαιτούνται και η ανάγκη αρκετής μαθηματικής ανάλυσης για να μετατραπεί το έργο στις καθιερωμένες μορφές ακέрайου γραμμικού προγραμματισμού»* (Cusack M., 1985)

Αργότερα, ο Ferrera (1980) πρότεινε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του έργου για μια συγκεκριμένη χρονική προθεσμία ολοκλήρωσης χρησιμοποιώντας γραμμικά γραφήματα. Το 1985, ο Cusack M., πρότεινε ένα μοντέλο ακέрайου γραμμικού προγραμματισμού που βασίζεται σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης χρόνου – κόστους.

Οι Shtub et al. (1994), πρότειναν ένα μοντέλο ακέрайου προγραμματισμού το οποίο «ενσωματώνει τα έμμεσα κόστη στην αντικειμενική συνάρτηση και θεωρεί διακριτές καμπύλες χρόνου – κόστους πλησιάζοντας μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση των πραγματικών προβλημάτων» (Sakellariopoulos and Chassiakos, 2004). Ως συνέχεια του μοντέλου αυτού, οι Sakellariopoulos and Chassiakos (2004), διατυπώνουν ένα μοντέλο γραμμικού ακέрайου προγραμματισμού για σχέσεις αλληλουχίας δραστηριοτήτων τέλους – αρχής (FS), μοντελοποιώντας γενικευμένες σχέσεις προτεραιότητας, με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης διάρκειας του έργου και της βέλτιστης καμπύλης εντατικοποίησης του έργου.

Οι Babu και Suresh (1996), θεωρούν ότι η ποιότητα του έργου μπορεί να επηρεαστεί από την εντατικοποίηση της κατασκευής του έργου και αναπτύσσουν μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού για την μελέτη της εξισορρόπησης χρόνου, κόστους και ποιότητας. Οι Khang και Myint (1999), εφήρμοσαν τη μέθοδο σε ένα πραγματικό κατασκευαστικό έργο προσπαθώντας να εξετάσουν τη αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Καταλήγουν στην αποδοχή της μεθόδου όσο αφορά τη σχέση χρόνου και κόστους, ωστόσο, θεωρούν ότι η μέτρηση της ποιότητας δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως αντικειμενική και επομένως τα αποτελέσματα είναι σχετικά με τον τρόπο που επιλέγεται για την εντατικοποίηση της κατασκευής.

Ο Εφραιμίδης Χ.Ι. (2001), παρουσιάζει στο βιβλίο του «Διαχείριση των κατασκευών» τη διαδικασία επιτάχυνσης του χρονοδιαγράμματος όπως φαίνεται μέσα από το δικτυωτό γράφημα της κατασκευής και τελικά αναπτύσσει αλγόριθμο γραμμικού προγραμματισμού που προσδιορίζει τα μεγέθη βελτιστοποίησης της καμπύλης άμεσου κόστους – χρόνου με χρήση Η/Υ. Οι Khalaf et al. (2010), ανέπτυξαν μια μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους της κατασκευής μέσω της μεγιστοποίησης της διάρκειας των μη κρίσιμων δραστηριοτήτων του έργου.

Οι Huang et al. (2010, A), παρουσιάζουν ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που σκοπό έχει την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού χρόνου και κόστους (An application on time-cost trade-off for construction projects). Οι ίδια επιστημονική ομάδα (Huang et al., 2010B) διατύπωσε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης της σχέσης διάρκειας και κόστους και ένα μοντέλο βελτιστοποίησης της σχέσης διάρκειας και ποιότητας, ενσωματώνοντας στους υπολογισμούς την αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τα κατασκευαστικά έργα. (Research on Duration – Cost – Quality Model under Uncertainty in Construction Project Management).

### **3.8.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου**

Σε σύγκριση με προσεγγιστικές μεθόδους και μεθόδους αποδόμησης, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν γραμμικό ή/και ακέραιο προγραμματισμό επιτυγχάνουν τη βέλτιστη λύση.

Ωστόσο, το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν αρκετά μεγάλη διατύπωση του προβλήματος και μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Ειδικά στην περίπτωση ύπαρξης πολλών μεταβλητών και πολλών συναρτήσεων περιορισμών, απαραίτητη είναι η χρήση λογισμικού όπως το Lindo. Διαφορετικά η επίλυση ενός μοντέλου Γ.Π. μπορεί να πραγματοποιηθεί με την βοήθεια λογιστικών φύλλων (spreadsheets - Windows Excel).

Τα τελευταία χρόνια, η κατασκευή μοντέλων βελτιστοποίησης στρέφεται όλο και πιο έντονα στη χρήση μοντέλων Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, λόγω της ευελιξίας και της ακρίβειας ατών, έναντι των μοντέλων Γραμμικού Προγραμματισμού. Η μέθοδος αυτή αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

## 3.9 Βελτιστοποίηση με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks)

### 3.9.1 Γενικά

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (TNN) επινοήθηκαν το 1943 από τον νευροφυσιολόγο Warren McCulloch και τον Walter Pitts, πρωτοπόρο μαθηματικό. Τις τελευταίες δεκαετίες βρίσκονται σε φάση ταχείας ανάπτυξης και έχουν εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς τομείς όπως, όπως η διαγνωστική ιατρική, η πρόληψη φυσικών καταστροφών και η πρόβλεψη των εξελίξεων στο χρηματιστήριο.



Σχήμα 3.7: Απλό μοντέλο feed-forward νευρωνικού δικτύου.  
(πηγή: [http:// http://www.mediamax.gr/articles](http://www.mediamax.gr/articles))

Για την εφαρμογή ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο και ο κατάλληλος αλγόριθμος εκμάθησης, αφού ένα βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι μπορούν και εκπαιδεύονται να αναγνωρίζουν ένα σήμα στην είσοδό τους. Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από την εφαρμογή και την παρουσίαση των δεδομένων. Οι αλγόριθμοι εκμάθησης είναι πολυάριθμοι και έχουν διαφορετικά προσόντα.

Πρακτικά, σχεδόν οποιοσδήποτε αλγόριθμος μπορεί να είναι επαρκής με τις κατάλληλες υπερπαραμέτρους εκπαίδευσης για ένα συγκεκριμένο σύνολο πληροφοριών. Πιο συγκεκριμένα, τα νευρωνικά δίκτυα ονομάζονται και Παγκόσμιοι Προσεγγιστές (universal approximators), αφού μπορούν να προσεγγίσουν οποιαδήποτε συνάρτηση (data fitting).

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι, η επιλογή και ο συντονισμός ενός αλγορίθμου για προγραμματισμό άγνωστων πληροφοριών απαιτεί αρκετό πειραματισμό.

Εάν γίνει σωστή επιλογή μοντέλου, συνάρτησης κόστους και αλγόριθμου εκμάθησης, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο που θα προκύψει μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβές. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι η ικανότητά τους να χρησιμοποιηθούν ως μηχανισμοί προσεγγιστικού υπολογισμού μιας αυθαίρετης συνάρτησης που «μαθαίνει» από παρατηρούμενα στοιχεία.

Ωστόσο η εφαρμογή τους δεν είναι τόσο απλή ενώ είναι απαραίτητη μια σχετικά καλή κατανόηση του αντίστοιχου θεωρητικού υπόβαθρου.

Στα θετικά τους χαρακτηριστικά, ανήκει επίσης η ικανότητα τους να γενικεύουν τους κανόνες που έχουν εκπαιδευτεί να γνωρίζουν. Η γενίκευση μπορεί να γίνει πάντα μέσα σε κάποια όρια. Επίσης, μία ακόμα χαρακτηριστική τους ιδιότητα είναι η ανοχή τους στο «θόρυβο». Αυτό σημαίνει ότι αν το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδευτεί να αναγνωρίζει κάποια πρότυπα (π.χ. κάποια εικόνα), τότε αν παρουσιαστεί η εικόνα αυτή στην είσοδο του αλλοιωμένη (δηλαδή με θόρυβο), τότε το νευρωνικό θα την αναγνωρίζει και πάλι. Παρατηρείται επομένως, μεγάλη ευελιξία των μοντέλων και σημαντική προσομοίωση τους με την ανθρώπινη συμπεριφορά.

Κάθε «κύκλος» (νευρώνας) είναι μια συνάρτηση. Δέχεται μια είσοδο και παράγει μια έξοδο. Η επεξεργασία στα νευρωνικά δίκτυα είναι παράλληλη και κατανομημένη.

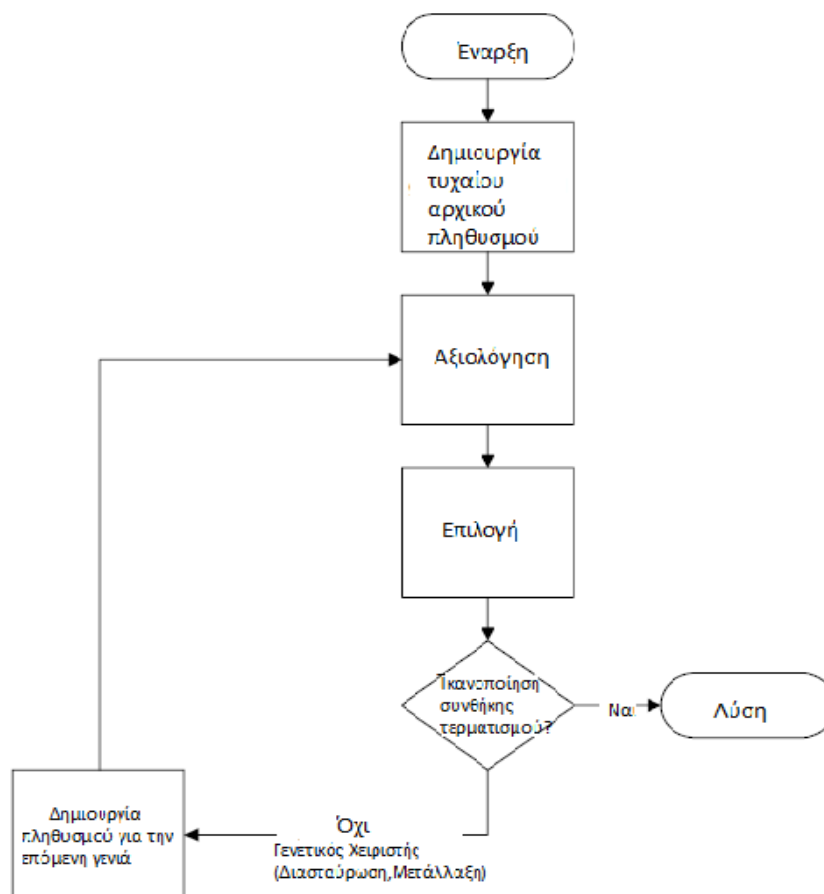
Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι κυριότεροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης TNN, οι οποίοι βασίζονται στη φυσική εξέλιξη και θεωρούνται από τις πλέον αποτελεσματικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της σχέσης χρόνου και κόστους.

### **3.9.2 Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων**

#### **3.9.2.1 Βελτιστοποίηση με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων**

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εφευρέθηκαν τη δεκαετία του 1960 από την έρευνα του John Holland για μία ευρετική μέθοδο που να μιμείται το μηχανισμό της φυσικής προσαρμογής.

Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία ενός πληθυσμού τυχαίως δημιουργημένων υποψήφιων λύσεων που εξελίσσεται προς μία βέλτιστη λύση μέσα από γενετική επανάληψη. Ο πληθυσμός αποτελείται από ακολουθίες χορδών ? κάθε μία από τις οποίες περιέχει πληροφορίες για μία λύση που λέγεται χρωμόσωμα. Σε κάθε γενιά, οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και επιλέγονται με βάση μία συνάρτηση ποιότητας (fitness function) που υποδεικνύει πόσο καλά η λύση λύνει το πρόβλημα. Αφού ένα τμήμα του πληθυσμού επιλεγεί με βάση αξίες ποιότητας (fitness), οι εναπομείνουσες λύσεις συνδυάζονται και μεταλλάσσονται από γενετικούς όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Ο χειριστής διασταύρωσης συνδυάζει υποψήφιες λύσεις και ένας χειριστής μετάλλαξης τις μεταλλάσει τυχαία. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για κάθε γενιά μέχρις ότου μία λύση μίας συγκεκριμένης αξίας να έχει επιτευχθεί ή να έχει επαναληφθεί έναν προκαθορισμένο αριθμό φορών.



**Σχήμα 3.8: Διαδικασία Βελτιστοποίησης Γενετικού Αλγορίθμου**

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έρευνα μίας βέλτιστης τιμής ή βελτιστοποίηση πολλαπλών τομέων όπου προσπάθεια εξισορρόπησης για αύξηση της συνολική αποδοτικότητα (tradeoff) πραγματοποιείται μεταξύ πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η τελευταία ιδιότητα είναι χρήσιμη ειδικά για ένα πολύπλοκο πρόβλημα που πρέπει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις πολλαπλών συμμετεχόντων αρχών. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων παρέχεται από τον αλγόριθμο και το θέμα της επιλογής μίας απόφασης από τις εναλλακτικές μπορεί να αφηθεί στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων.

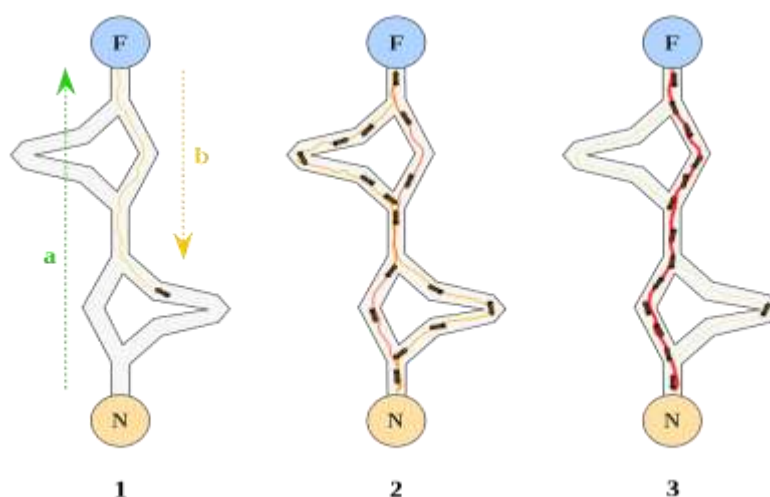
Ο Γενετικός Αλγόριθμος μπορεί να οδηγήσει την έρευνα προς το κριτήριο Pareto ώστε να κάνει δυνατό, στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να πληροφορηθεί για την καλύτερη δυνατή εξισορρόπηση μεταξύ κόστους και χρόνου και να αποφύγει την υπέρμετρη προσπάθεια για την αξιολόγηση υποβέλτιστων σημείων στον χώρο.

Αρκετοί μελετητές έχουν αναπτύξει μοντέλα προγραμματισμού με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων για την βελτιστοποίηση της σχέσης κόστους χρόνου κατασκευής, σε συνδυασμό και με την καλύτερη χρήση πόρων.

### 3.9.2.2 Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization – ACO)

Η Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών είναι μία σχετικά σύγχρονη τεχνική για προσεγγιστική βελτιστοποίηση. Η μέθοδος εμφανίστηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 1990 από τους Dorigo et al.

Η έμπνευση για τη δημιουργία της μεθόδου βελτιστοποίησης με Αποικίες Μυρμηγκιών είναι η συμπεριφορά αναζήτησης τροφής κάποιων ειδών μυρμηγκιών. Τα μυρμήγκια αυτά αφήνουν φερομόνες στο έδαφος ώστε να σημαδεύσουν κάποιο ευνοϊκό μονοπάτι που θα έπρεπε να ακολουθηθεί από άλλα μέλη της αποικίας. Η βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών χρησιμοποιεί έναν παρόμοιο μηχανισμό για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης (Dorigo et al.2006).



**Σχήμα 3.9:** Απεικόνιση της συμπεριφοράς αναζήτησης τροφής των μυρμηγκιών. Από τη στιγμή που το πρώτο μυρμήγκι εντοπίζει την τροφή (F), τα υπόλοιπα μέλη της αποικίας (N) ακολουθούν τη διαδρομή του πρώτου. Εάν υπάρχουν πολλές διαδρομές για τον ίδιο προορισμό, σταδιακά περισσότερα μέλη περνούν από την μικρότερη, η οποία και τελικά υπερισχύει λόγω της αυξημένης απουσίας φερομόνης. (πηγή: [http://: www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))

Τα τελευταία λίγα χρόνια, πολλά είναι τα μοντέλα βελτιστοποίησης προγραμματισμού τεχνικών έργων που χρησιμοποιούν Αποικίες Μυρμηγκιών (ACO). Οι Merkle et al. (2002), δημιούργησαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος χρονικού προγραμματισμού έργων με περιορισμό πόρων. Οι Abdallah et al. (2008), προτείνουν τη μέθοδο ACO για την επίλυση του προβλήματος λήψης αποφάσεων στη διαχείριση τεχνικών έργων. Οι Li & Wang (2009), εφήρμοσαν εξελιγμένη διατύπωση της μεθόδου για την μοντελοποίηση του προβλήματος εξισορρόπησης χρόνου-κόστους της κατασκευής. Οι Ning & Wang (2009), επιλύουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης της σχέσης κόστους-ποιότητας με χρήση ACO. Τέλος, μόλις το 2011, μελετητές όπως οι Mokhtari et al. και οι Kalhor et al., προσεγγίζουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης της σχέσης χρόνου – κόστους με χρήση ACO.



### 3.9.2.3 Βελτιστοποίηση με Σμήνη Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO)

Η Βελτιστοποίηση με Σμήνη Σωματιδίων αναπτύχθηκε από τους Kennedy και Eberhart και είναι ένας εξελικτικός αλγόριθμος που προσομοιάζει την κοινωνική συμπεριφορά της συγκέντρωσης και εγκατάστασης πουλιών σε ένα επιθυμητό μέρος.

Πρόκειται για μία μετευρετική μέθοδο που πραγματοποιεί έρευνα χρησιμοποιώντας ένα πληθυσμό, που λέγεται σμήνος, από ξεχωριστά άτομα, που λέγονται σωματίδια και ενημερώνονται από επανάληψη σε επανάληψη. Κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει μία υποψήφια θέση για το εν λόγω πρόβλημα, θυμίζοντας το χρωμόσωμα των γενετικών αλγορίθμων. Το σωματίδιο αντιμετωπίζεται ως σημείο ενός χώρου Μ-διαστάσεων και η κατάσταση του σωματιδίου χαρακτηρίζεται από τη θέση του και την ταχύτητά του (Kennedy & Eberhart, 1995)

Ξεκινώντας με ένα σμήνος τυχαίων σωματιδίων, η PSO επιτυγχάνεται με σωματίδια να πετούν στην τροχιά που θα ρυθμιστεί με βάση την καλύτερη εμπειρία ή θέση του ενός σωματιδίου (τοπικό βέλτιστο) και την καλύτερη εμπειρία ή θέση που έχει βρεθεί από όλα τα σωματίδια (συνολικό βέλτιστο) (Kennedy & Eberhart, 1995).

Η Βελτιστοποίηση με Σμήνη Σωματιδίων έχει πολλά κοινά σημεία με τους Γενετικούς Αλγορίθμους, όπως η τυχαία δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, η έρευνα για βέλτιστο μέσω της συνεχής ενημέρωσης από επανάληψη σε επανάληψη και η εκτίμηση της ποιότητας (fitness) ή του σκοπού για πιθανές λύσεις. Σε αντίθεση με τους Γενετικούς Αλγορίθμους που πραγματοποιούν αναγέννηση χρωμοσωμάτων μεταξύ αταξινόμητων επιζώντων για την επόμενη επανάληψη, η PSO ανανεώνει ένα πληθυσμό σωματιδίων με την εσωτερική ταχύτητα και επιχειρεί να επωφεληθεί από τις ανακαλύψεις αυτών και τις προηγούμενες εμπειρίες όλων των άλλων συνοδών (Zhang et al., 2005).

Στη διαχείριση τεχνικών έργων, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα βελτιστοποίησης χρονικού προγραμματισμού κυρίως στην περίπτωση του προβλήματος περιορισμένων πόρων (Resource Constrained Project Scheduling Problem- RCPSP) από διάφορους μελετητές όπως οι Zhang et al. (2004), Zhang et al. (2005) και οι Jarboui et al. (2008). Για το πρόβλημα βελτιστοποίησης σχέσης χρόνου-κόστους κατασκευής αναπτύχθηκαν επίσης μοντέλα όπως των Zhang & Li (2010).

### 3.10 Προγραμματισμός χρήσης μέσων με περιορισμούς χρόνου

Όταν γίνεται προγραμματισμός για ένα έργο με αυστηρά καθορισμένη ημερομηνία ολοκλήρωσης, με συγκεκριμένη πίεση χρόνου δηλαδή, σημαντικό κομμάτι του προγραμματισμού είναι και ο προγραμματισμός της χρήσης των πόρων.

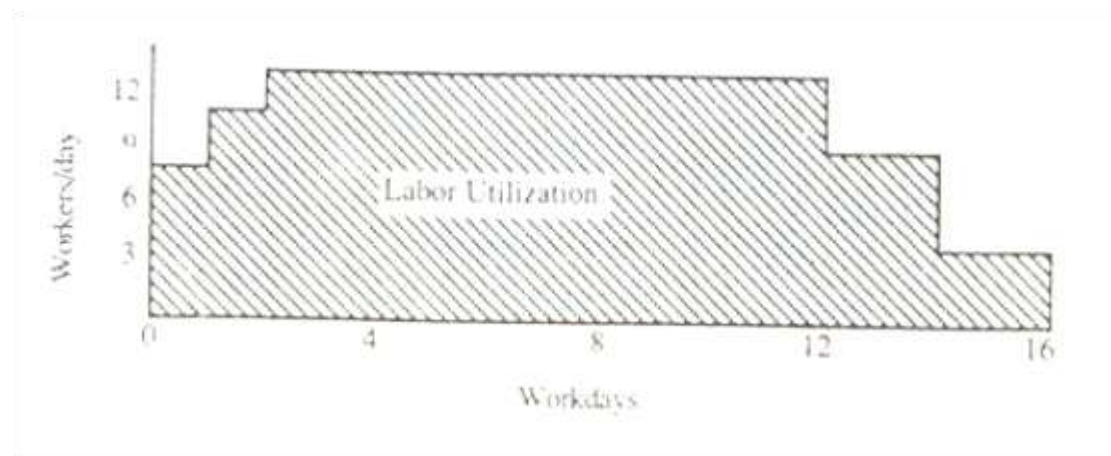
Σύμφωνα με τον Παντουβάκη Π. (2003): «Οι σκοποί του προγραμματισμού μέσω στην περίπτωση που υπάρχουν περιορισμοί χρόνου είναι δύο:

- α). να υπολογιστούν οι απαιτήσεις σε μέσα παραγωγής ώστε να προγραμματιστεί η διάθεση τους την κατάλληλη στιγμή στην πορεία υλοποίησης του έργου.
- β). να προγραμματιστεί χρονικά κάθε δραστηριότητα ώστε να υπάρχει ομαλοποιημένο διάγραμμα χρήσης των μέσων παραγωγής με το χρόνο. Με τον όρο 'ομαλοποιημένο' διάγραμμα χρήσης των μέσων εννοούμε ότι τα μέσα γίνονται διαθέσιμα 'ομαλά' ή αλλιώς προοδευτικά στο έργο μέχρι ενός αριθμού  $n$ , κατόπιν ο αριθμός τους παραμένει σταθερός για την εκτέλεση του έργου και στο τέλος αποχωρούν προοδευτικά».

Η σημασία της διαθεσιμότητας των πόρων την κατάλληλη στιγμή, τονίσθηκε και στην μέθοδο της Κρίσιμης Αλυσίδας όπου η ετοιμότητα των πόρων διασφαλίζεται με την τοποθέτηση κατάλληλου buffer (buffer πόρων – resource buffer).

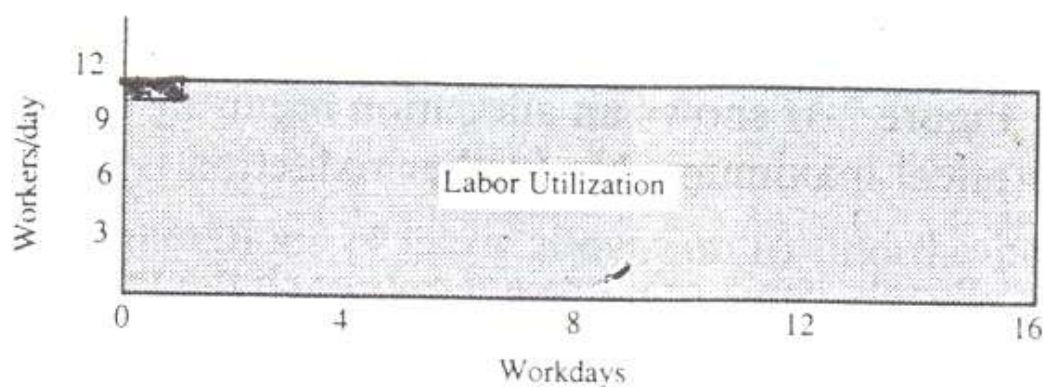
Όσον αφορά στη ομαλοποίηση του διαγράμματος πόρων, η σημασία του είναι μεγάλη τόσο στην μείωση κόστους διάθεσης και απομάκρυνσης (Παντουβάκης Π. 2003) όσο και στην απλοποίηση της ανίχνευσης και του ελέγχου των πόρων, στην μείωση κόστους της διαχείρισης πόρων και στην αύξηση των ευκαιριών για μάθηση. (Badiru B. 1996) Επίσης, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας μπορούν να ληφθούν συγκεκριμένες αποφάσεις διαχείρισης όπως «η μείωση της διάρκειας δραστηριοτήτων πληρώνοντας υπερωρίες, η πρόσληψη υπεργολάβων κτλ» (Παντουβάκης Π., 2003)

Προκειμένου να επιτευχθεί η ομαλοποίηση, αφού επιλυθεί το δικτυωτό γράφημα προσδιορισμού των χρονικών στοιχείων των δραστηριοτήτων, και σημειωθούν σε γράφημα τα χρονικά περιθώρια και οι απαιτήσεις σε μέσα παραγωγής των δραστηριοτήτων, γίνεται σχεδίαση του διαγράμματος χρήσης των μέσων παραγωγής σε σχέση με το χρόνο σύμφωνα με την κατάταξη των δραστηριοτήτων ανάλογα με το χρόνο έναρξης. Στη συνέχεια, «η διαδικασία της ομαλοποίησης των πόρων επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει τις μεταβολές στην διοχέτευση πόρων μέσω της μεταφοράς των δραστηριοτήτων εντός των διαθέσιμων χρονικών τους περιθωρίων». (Badiru B. 1996)



**Σχήμα 3.10:** Μη ομαλοποιημένο διάγραμμα χρήσης πόρων. (Πηγή: [http://www.pec.org.pk/sCourse\\_files/cec4\\_LEC2.PPT](http://www.pec.org.pk/sCourse_files/cec4_LEC2.PPT))

Στο σημείο αυτό εφαρμόζονται μέθοδοι εξομάλυνσης πόρων, όπως η μέθοδος Burgess. Η μέθοδος μέσα από επαναληπτική διαδικασία προσπαθεί «να επιτύχει τη μικρότερη δυνατή τιμή του αθροίσματος των τετραγώνων του αριθμού των μέσων παραγωγής σε κάθε χρονική στιγμή  $i$ . Η μέθοδος δεν προσδιορίζει τον ελάχιστο συνολικό αριθμό μέσων παραγωγής τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα στην υλοποίηση του έργου». (Παντουβάκης Π., 2003)



**Σχήμα 3.11:** Ομαλοποιημένο (ιδεατό) διάγραμμα χρήσης πόρων. (Πηγή: [http://www.pec.org.pk/sCourse\\_files/cec4\\_LEC2.PPT](http://www.pec.org.pk/sCourse_files/cec4_LEC2.PPT))

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, το διάγραμμα εξετάζεται ώστε να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις σχετικά με την ορθολογική διαχείριση των πόρων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:** **Εφαρμογή GSO σε Προβλήματα Βελτιστοποίησης**

### **4.1. Εισαγωγή**

Η ίδια η φύση χρησιμεύει ως μία γόνιμη πηγή εννοιών κατάλληλων για τον σχεδιασμό τεχνητών συστημάτων υπολογισμού, τα οποία συνδράμουν στην αποτελεσματική επίλυση σύνθετων υπολογιστικών προβλημάτων. Η συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων είναι μία (χαρακτηριστική για το είδος) ενεργή κίνηση με την οποία ανιχνεύουν πόρους όπως τροφή, σύντροφο προς αναπαραγωγή ή καταφύγιο. Έννοιες και στρατηγικές από τη συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων, όπως οι μηχανισμοί ανίχνευσης, έχουν χρησιμοποιηθεί μεταφορικά για να σχεδιασθούν στρατηγικές βέλτιστης αναζήτησης, προκειμένου να επιλυθούν συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Η απόλυτη επιτυχία της αναζήτησης εξαρτάται από:

1. την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής.
2. τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα των πόρων.
3. την ικανότητα του είδους να προσαρμόζεται σε μακροπρόθεσμες ή βραχυπρόθεσμες περιβαλλοντικές αλλαγές και την ικανότητα του μεμονωμένου ζώου να ανταποκριθεί σε αυτές.

Η ομαδική αναζήτηση (διαδομένη στο ζωικό βασίλειο) επιτρέπει στα μέλη να αυξήσουν την επιτυχία της αναζήτησης και να μειώσουν την απόκλιση της επιτυχίας αυτής. Αυτό συνήθως έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση δύο στρατηγικών αναζήτησης από τα μέλη μίας ομάδας. Αυτές είναι η παραγωγική (producing) αναζήτηση (όπως η αναζήτηση τροφής) και η παρασιτική (scrounging) αναζήτηση (όπως η αξιοποίηση των εφοδίων που απέμειναν από άλλα ζώα).

Ο GSO αποτελεί μία νέα πρόταση νοημοσύνης σμήνους, που προτάθηκε για συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση (η βέλτιστη αναζήτηση σε ένα χώρο αναζήτησης) είναι παρόμοια με τη διαδικασία με την οποία τα ζώα αναζητούν εφόδια. Πρόκειται για έναν πρωτότυπο εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης, ο οποίος έχει εμπνευσθεί από τη συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων. Βασίζεται σε μία απλοποιημένη μορφή του μοντέλου παραγωγού – τρακαδόρου (producer-scrounger, PS), σύμφωνα με το οποίο τα μέλη ενός συνόλου ερευνούν είτε για να ανιχνεύσουν πόρους (producer) είτε για να επωφεληθούν από τους πόρους άλλων (scrounger). Η πρωτοπορία του είναι ότι θεωρεί σε κάθε επανάληψη μόνο έναν παραγωγό και εισάγει την έννοια του διασκορπισμένου μέλους (ranger) (He et al., 2006). Είναι ιδιαίτερα απλός και ευέλικτος στην επίλυση επιστημονικών προβλημάτων μηχανικού.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί αρχικά ο αλγόριθμος GSO, οι λεπτομέρειες εφαρμογής του, καθώς επίσης οι ομοιότητες και διαφορές που εμφανίζει με τους ACO και PSO. Κατόπιν, θα εκτιμηθεί η απόδοση του GSO με 23 benchmark συναρτήσεις και θα ελεγχθεί κατά πόσο είναι ευαίσθητος σε μεταβολή παραμέτρων ελέγχου. Τέλος, θα προταθεί το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο GSOANN, η απόδοση του οποίου εκτιμάται με βάση την εφαρμογή σε τρία πραγματικά προβλήματα (γεωπονία, ιατρική) και προτείνεται η εφαρμογή σε προβλήματα βελτιστοποίησης χρονικής διάρκειας και κόστους τεχνικών έργων.

## 4.2: Περιγραφή αλγορίθμου Group Search Optimizer

### 4.2.1 Γενικά

Σε ένα χώρο αναζήτησης  $n$  διαστάσεων, το  $i$  μέλος της ομάδας στην  $k$  επανάληψη έχει τρέχουσα θέση  $\mathbf{X}_i^k \in \mathbb{R}^n$ , γωνία κεφαλής  $\boldsymbol{\varphi}_i^k = (\varphi_{i(1)}^k, \dots, \varphi_{i(n-1)}^k) \in \mathbb{R}^{n-1}$  και μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης  $\mathbf{D}_i^k(\boldsymbol{\varphi}_i^k) = (d_{i(1)}^k, \dots, d_{i(n)}^k) \in \mathbb{R}^n$ , οι συντεταγμένες του οποίου ισούνται με (He et al, 2009):

$$\begin{aligned}d_{i(1)}^k &= \prod_{q=1}^{n-1} \cos \varphi_{i(q)}^k \\d_{i(j)}^k &= \sin \varphi_{i(j-1)}^k \cdot \prod_{q=j}^{n-1} \cos \varphi_{i(q)}^k, \quad \text{όπου } j = 2, \dots, n-1 \\d_{i(n)}^k &= \sin \varphi_{i(n-1)}^k\end{aligned} \quad (4.1)$$

Διακρίνονται τρεις διαφορετικούς τύπους μελών, οι οποίοι είναι:

- **ο παραγωγός** (producer), του οποίου η συμπεριφορά βασίζεται στο μοντέλο PS.
- **τα παρασιτικά μέλη/ οι τρακαδόροι** (scroungers), των οποίων η συμπεριφορά βασίζεται στο μοντέλο PS.
- **τα περιφερόμενα μέλη** (rangers), τα οποία διασκορπίζονται από την ομάδα, δρουν ανεξάρτητα και πραγματοποιούν τυχαίες κινήσεις.

### 4.2.2 Ο παραγωγός (producer)

Για υπολογιστική ευκολία, απλοποιείται το μοντέλο PS, υποθέτοντας ότι υπάρχει μόνο ένας παραγωγός σε κάθε επανάληψη, ότι όλοι οι τρακαδόροι θα επωφεληθούν/μοιραστούν τα εφόδια του παραγωγού και ότι τα μέλη μπορούν να μεταπηδούν από τον ένα ρόλο στον άλλο (όμοια χαρακτηριστικά). Σε προβλήματα βελτιστοποίησης, τα μέλη ψάχνουν για τα άγνωστα βέλτιστα σημεία (τυχαία διασκορπισμένα στον χώρο αναζήτησης) με το να αλλάζουν θέση (He et al., 2006).

Σε κάθε επανάληψη, μόνο ένα μέλος, το οποίο βρίσκεται στην περισσότερο υποσχόμενη περιοχή, επιλέγεται ως παραγωγός. Ο παραγωγός σταματά και ανιχνεύει το περιβάλλον προς αναζήτηση εφοδίων (βέλτιστων σημείων). Κατά την ανίχνευση, τα ζώα κινούν τα αισθητήρια όργανα (κεφάλι) προκειμένου να αντλήσουν πληροφορίες από το περιβάλλον και να αποφασίσουν σχετικά με τον προσανατολισμό της έρευνας. Η ανίχνευση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της φυσικής επαφής ή μέσω οπτικών, χημικών, ακουστικών μηχανισμών. Οι γενικοί μηχανισμοί αναζήτησης των ζώων (όραση, ακοή, όσφρηση), χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από τον παραγωγό. Πολλά ζώα διαθέτουν ευρύ πεδίο όρασης και χρησιμοποιούν ταχύτατες κινήσεις των ματιών προκειμένου να εντοπίσουν πιθανές θέσεις πόρων.



**Σχήμα 4.1 Pomoxis Annularis**

Ο GSO χρησιμοποιεί την όραση του Pomoxis Annularis. Το πεδίο αντίχνησης του ψαριού αυτού (μία σειρά από σφήνες) στοιχειοθετείται από τη μέγιστη γωνία αναζήτησης (maximum pursuit angle), τη μέγιστη απόσταση αναζήτησης (maximum pursuit distance) και το μέγιστο ύψος αναζήτησης (maximum pursuit height). Η κορυφή κάθε σφήνας είναι το σημείο στο οποίο σταματάει και διερευνά για λεία. Στον GSO, το πεδίο της οπτικής αναζήτησης απλοποιείται και γενικεύεται σε έναν χώρο  $n$  διαστάσεων (χαρακτηρίζεται μόνο από τη μέγιστη γωνία αναζήτησης  $\theta_{\max} \in \mathbb{R}^1$  και τη μέγιστη απόσταση αναζήτησης  $l_{\max} \in \mathbb{R}^1$ ). Η κορυφή είναι η θέση του παραγωγού. Στην  $k$  επανάληψη, ο παραγωγός  $\mathbf{X}_P$  συμπεριφέρεται ως εξής: (He et al., 2006)

- 1) Αρχικά, ανιχνεύει με γωνία κεφαλής  $0^\circ$ . Στη συνέχεια, ανιχνεύει πλευρικά κατά τυχαίο τρόπο επιλέγοντας τρία σημεία και συγκεκριμένα:
  - ένα σημείο σε μηδενική γωνία

$$\mathbf{X}_z = \mathbf{X}_P^k + r_1 \cdot l_{\max} \cdot \mathbf{D}_P^k(\varphi^k) \quad (4.2)$$

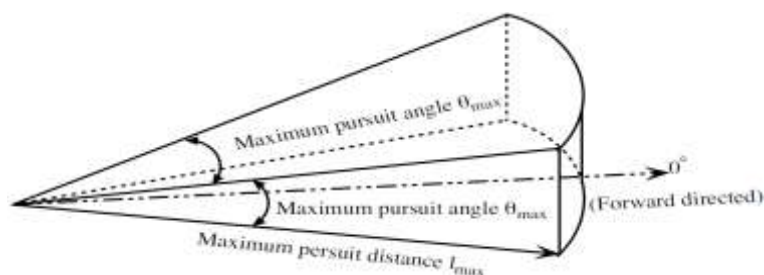
- ένα σημείο στη δεξιά πλευρά της σφήνας

$$\mathbf{X}_r = \mathbf{X}_P^k + r_1 \cdot l_{\max} \cdot \mathbf{D}_P^k\left(\varphi^k + r_2 \cdot \frac{\theta_{\max}}{2}\right) \quad (4.3)$$

- ένα σημείο στην αριστερή πλευρά της σφήνας

$$\mathbf{X}_l = \mathbf{X}_P^k + r_1 \cdot l_{\max} \cdot \mathbf{D}_P^k\left(\varphi^k - r_2 \cdot \frac{\theta_{\max}}{2}\right) \quad (4.4)$$

όπου  $r_1 \in \mathbb{R}^1$  είναι ένας κανονικά διανεμημένος τυχαίος αριθμός με μέσο όρο 0 και τυπική απόκλιση 1 και  $r_2 \in \mathbb{R}^{n-1}$  είναι μία ομοιόμορφα κατανομημένη τυχαία ακολουθία στην περιοχή (0,1).



Σχήμα 4.2 Πεδίο ανίχνευσης σε τρισδιάστατο χώρο (πηγή:He et al., 2006)

- 2) Εντοπίζει την καλύτερη θέση με τον καλύτερο πόρο (βέλτιστη τιμή) και μετακινείται σε αυτήν, αν ο πόρος είναι καλύτερος σε σχέση με τον τρέχοντα. Διαφορετικά, θα παραμείνει στην τρέχουσα θέση και θα στρέψει το κεφάλι του σε μία νέα τυχαία γωνία.

$$\boldsymbol{\varphi}^{k+1} = \boldsymbol{\varphi}^k + \mathbf{r}_2 \cdot \alpha_{\max} \quad (4.5)$$

όπου  $\alpha_{\max} \in \mathbb{R}^1$  είναι η μέγιστη γωνία στροφής (maximum turning angle).

- 3) Αν δεν μπορεί να βρει μία καλύτερη περιοχή μετά από  $\alpha$  επαναλήψεις, θα στρέψει το κεφάλι του πίσω στις  $0^\circ$ . (όπου  $\alpha \in \mathbb{R}^1$  είναι μία σταθερά)

$$\boldsymbol{\varphi}^{k+\alpha} = \boldsymbol{\varphi}^k \quad (4.6)$$

### 4.2.3 Οι τρακαδόροι (scroungers)

Η παρασιτική αναζήτηση είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των περισσότερων κοινωνικοποιημένων ζώων (πουλιά, ψάρια, αράχνες). Τα πετυχημένα μέλη της ομάδας παρέχουν τα εφόδια στα λιγότερο επιτυχημένα. Σε αντίθεση με το μοντέλο IS (Information Sharing), το οποίο θεωρεί ότι τα μέλη αναζητούν τόσο τροφή για τον εαυτό τους όσο και ευκαιρίες να επωφεληθούν από τα εφόδια των άλλων, στο επιλεγθέν μοντέλο PS κάθε μέλος χρησιμοποιεί αποκλειστικά μία στρατηγική. Για τους τρακαδόρους ο GSO προτείνει μία από τις βασικές παρασιτικές στρατηγικές των οικόσιτων σπουργιτιών (Passer Domesticus), οι οποίες είναι οι εξής:

- Αντιγραφή περιοχής (Area Copying): Κινούνται έτσι ώστε να ερευνήσουν την άμεση περιοχή τριγύρω του παραγωγού. (Συνηθέστερη)
- Παρακολούθηση (Following): Ακολουθούν κάποιο άλλο ζώο χωρίς να επιδεικνύουν καμία διάθεση για αναζήτηση.
- Αρπαγή (Snatching): Αρπάζουν το εφόδιο απευθείας από τον παραγωγό.

Στον GSO, υιοθετείται μόνο η Αντιγραφή Περιοχής. Στην επανάληψη  $k$ , η συμπεριφορά αντιγραφής περιοχής του τρακαδόρου  $i$  μπορεί να προσομοιωθεί ως μία τυχαία κίνηση προς τον παραγωγό σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (He et al, 2009):

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + \mathbf{r}_3 \circ (\mathbf{X}_p^k - \mathbf{X}_i^k) \quad (4.7)$$

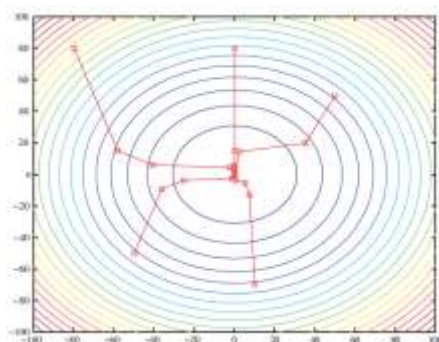
όπου  $\mathbf{r}_3 \in \mathbb{R}^n$  είναι μία ομοιόμορφα κατανομημένη τυχαία ακολουθία στο  $(0,1)$ .





**Σχήμα 4.3 Passer Domesticus**

Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, ένας αριθμός μελών της ομάδας επιλέγονται ως παρασιτικά μέλη. Κατά τη διάρκεια του παρασιτισμού, ο τρακαδόρος  $i$  θα συνεχίσει να αναζητεί ευκαιρίες για να επωφεληθεί από τα εφόδια του παραγωγού. Προσομοιώσαμε τη συμπεριφορά αυτή στρέφοντας το κεφάλι του σε μία νέα τυχαία γωνία χρησιμοποιώντας την σχέση (4.5). Αν σε μία επανάληψη ένας τρακαδόρος (ή ένας ranger) βρίσκει μία καλύτερη θέση σε σχέση με τον τρέχοντα παραγωγό και τους άλλους τρακαδόρους, στην επόμενη επανάληψη θα μετατραπεί σε παραγωγό και όλα τα άλλα μέλη, συμπεριλαμβανομένου και του παραγωγού της προηγούμενης επανάληψης, θα ακολουθήσουν παρασιτικές στρατηγικές. Η μετατροπή αυτή βοηθάει την ομάδα να αποδράσει από τοπικά ελάχιστα στις πρώτες επαναλήψεις (He et al., 2006).



**Σχήμα 4.4 Οι χαρακτηριστικές πορείες 5 τρακαδόρων κινούμενων προς τον παραγωγό (πηγή: He et al., 2006)**

Στο σχήμα 4.4 παρατηρούμε τις πορείες 5 τρακαδόρων. Το καθολικό ελάχιστο βρίσκεται στο κέντρο. Λόγω του ότι τοποθετήσαμε τον παραγωγό στο καθολικό ελάχιστο, όλοι οι τρακαδόροι κινούνται προς τον παραγωγό και τελικά συγκλίνουν (έπειτα από 5 επαναλήψεις) στο καθολικό ελάχιστο.

#### **4.2.4 Τα περιφερόμενα μέλη (rangers)**

Τα υπόλοιπα μέλη θα διασκορπιστούν από τις τρέχουσες θέσεις. Στη φύση, τα μέλη ομάδας συνήθως έχουν διαφορετικές ερευνητικές ικανότητες. Τα λιγότερο αποδοτικά στην αναζήτηση πόρων μέλη (σε σύγκριση με τα κυρίαρχα) θα διασκορπιστούν από



την ομάδα. Τα διασκορπισμένα ζώα υιοθετούν κυμαινόμενη συμπεριφορά προκειμένου να εξερευνήσουν και να αποικίσουν νέα φυσικά περιβάλλοντα. Η περιφορά (ranging) των ζώων είναι η αρχική φάση μίας έρευνας η οποία ξεκινάει χωρίς υποδείξεις προκειμένου να οδηγηθούν σε ένα συγκεκριμένο εφόδιο (He et al, 2006).

Στον GSO, αν το μέλος  $i$  διασκορπίζεται, θα ξεκινήσει να περιφέρεται. Στη φύση, τα περιφερόμενα ζώα χρησιμοποιούν στρατηγικές διερεύνησης, οι οποίες μπορεί να είναι τυχαίοι περίπατοι ή ακόμη και συστηματικές στρατηγικές αναζήτησης προκειμένου να εντοπίσουν εφόδια αποδοτικά. Τα περιφερόμενα μέλη (rangers) χρησιμοποιούν τους τυχαίους περιπάτους (η πιο αποδοτική μέθοδος αναζήτησης τυχαία κατανεμημένων πόρων). Στην επανάληψη  $k$ , το περιφερόμενο μέλος  $i$  θα στρέψει το κεφάλι του σε μία τυχαία γωνία (He et al, 2009):

$$\varphi^{k+1} = \varphi^k + r_2 \cdot \alpha_{\max}$$

θα επιλέξει μία τυχαία απόσταση (He et al, 2009):

$$l_i = \alpha \cdot r_1 \cdot l_{\max}$$

και θα μετακινηθεί στο νέο σημείο σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (He et al, 2009):

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + l_i \cdot \mathbf{D}_i^k(\varphi^{k+1}) \quad (4.8)$$



Σχήμα 4.5 Panthera Leo

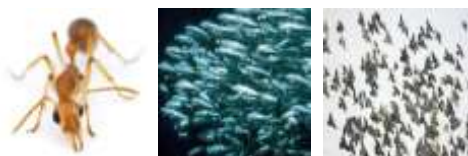
#### 4.2.5 Η ροή του GSO

1. Αρχικοποιώ τα μέλη του πληθυσμού.
2. Επιλέγω ένα μέλος ως producer.
3. Ο producer εκτελεί producing.
4. Επιλέγω scroungers.
5. Οι scroungers εκτελούν scrounging.
6. Διασκορπίζω τα υπόλοιπα μέλη, τα οποία είναι οι rangers.
7. Οι rangers εκτελούν ranging.
8. Αξιολογώ τα μέλη.
9. Ελέγχω αν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης. Αν ικανοποιείται, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται. Διαφορετικά, η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 2.

### 4.3 Σύγκριση GSO με PSO, ACO

Η νοημοσύνη σμήνους αποτελεί ένα νέο είδος υπολογιστικής νοημοσύνης, η οποία έχει εμπνευσθεί από την ομαδική συμπεριφορά των ζώων. Υπάρχουν μόνο λίγοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στη νοημοσύνη σμήνους, οι δημοφιλέστεροι των οποίων είναι:

- Ο αλγόριθμος **ant colony optimizer** (ACO), ο οποίος βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο μία αποικία μυρμηγκιών αναζητά τροφή.
- Ο αλγόριθμος **particle swarm optimizer** (PSO), ο οποίος συνέλεξε ιδέες από τη συμπεριφορά σμήνους πουλιών (ο τρόπος με τον οποίο συγκεντρώνονται ή συρρέουν) και ψαριών (ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρονται ως κοπάδι).



Σχήμα 4.6 Ο αλγόριθμος ACO, PSO

Ο GSO είναι μία νέα καινοτόμος πρόταση νοημοσύνης σμήνους. Σκόπιμο κρίνεται να συγκριθεί με τους ACO και PSO.

Ο ACO είναι ο πλέον φημισμένος. Παρόλο που τόσο αυτός όσο και ο GSO εμπνεύστηκαν από την ομαδική συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων, υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ τους. Η πιο χαρακτηριστική είναι ότι ο ACO έχει εμπνευσθεί ειδικά από τη συμπεριφορά των αποικιών μυρμηγκιών (αφήνοντας ίχνη φερομόνης τα μυρμηγκία διαμορφώνουν συλλογικά και εντοπίζουν το πιο σύντομο μονοπάτι αποικίας - πηγής εφοδίων). Σε αντίθεση, ο GSO έχει εμπνευσθεί από τη γενική συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων.

Ο PSO, όπως και ο GSO, προτάθηκε για προβλήματα βελτιστοποίησης συνεχών συναρτήσεων. Ωστόσο, δεν είναι δύσκολο να διαπιστώθει ότι υπάρχουν μερικές κύριες διαφορές μεταξύ τους. Η πιο ουσιώδης είναι ότι ο PSO αναπτύχθηκε αρχικά από τα μοντέλα της συντονισμένης κίνησης των ζώων (γνωστά ως μοντέλο Reynolds's Boids, μοντέλο Heppner and Grenander's model). Η συμπεριφορά ενός σμήνους ζώων, και κυρίως bird flocking και fish schooling, χρησιμεύει ως αλληγορία για τον σχεδιασμό του PSO. Ο GSO βασίζεται σε ένα γενικό μοντέλο ομαδικής αναζήτησης των ζώων (PS). Δεύτερον, παρά το γεγονός ότι ο producer του GSO είναι αρκετά όμοιος με τον global best particle του PSO, η κύρια διαφορά είναι ότι ο producer εκτελεί producing, η οποία είναι μία στρατηγική αναζήτησης που διαφέρει από τις στρατηγικές που εκτελούν οι scroungers και οι rangers. Αντίθετα στον PSO κάθε μέλος εκτελεί την ίδια στρατηγική αναζήτησης. Τρίτον, στον GSO ο producer θυμάται την γωνία κεφαλής όταν ξεκινά producing, ενώ στον PSO κάθε άτομο διατηρεί μνήμη προκειμένου να θυμάται το βέλτιστο μέρος το οποίο έχει επισκεφτεί. Τέλος, στον PSO δεν υπάρχουν rangers.

## 4.4 Εκτίμηση απόδοσης με Benchmark συναρτήσεις

### 4.4.1: Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (Benchmark functions)

Προκειμένου να αξιολογηθεί έγκυρα την απόδοση του GSO, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο από 23 καθιερωμένες benchmark συναρτήσεις (Πίνακας 4.1 & 4.2, όπου n η διάσταση της συνάρτησης,  $f_{\min}$  η καθολική ελάχιστη τιμή της συνάρτησης και S ο χώρος αναζήτησης). Ειδικά, επιλέχθηκαν (He et al, 2009) οι εξής:

- unimodal ( $f_1$  έως  $f_7$ ) (n=30)
- multimodal με πολλά τοπικά ελάχιστα ( $f_8$  έως  $f_{13}$ ) (n=30)
- multimodal με λίγα τοπικά ελάχιστα ( $f_{14}$  έως  $f_{23}$ ) (n<6)
- multimodal με πολλά τοπικά ελάχιστα ( $f_8$  έως  $f_{13}$ ) (n=300) (Ο αριθμός των τοπικών ελαχίστων αυξάνει εκθετικά με την αύξηση του n). Διερευνάται αν ο GSO μπορεί να κλιμακωθεί προκειμένου να χειριστεί μεγάλης κλίμακας προβλήματα βελτιστοποίησης.

Test function	n	S	$f_{\min}$
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	$[-100, 100]^n$	0
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n  x_i  + \prod_{i=1}^n  x_i $	30	$[-10, 10]^n$	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	30	$[-100, 100]^n$	0
$f_4(x) = \max_i  x_i , 1 \leq i \leq n$	30	$[-100, 100]^n$	0
$f_5(x) = \sum_{i=1}^n (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2)$	30	$[-30, 30]^n$	0
$f_6(x) = \sum_{i=1}^n (i(x_i + 0.5))^2$	30	$[-100, 100]^n$	0
$f_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^2 + \max\{0, 1 - \frac{1}{\sqrt{10}}\}$	30	$[-1.28, 1.28]^n$	0
$f_8(x) = -\sum_{i=1}^n (x_i \sin(\sqrt{ x_i }))$	30	$[-500, 500]^n$	-12569.5
$f_9(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)^2$	30	$[-5.12, 5.12]^n$	0
$f_{10}(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	$[-32, 32]^n$	0
$f_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^{10} (x_i - 100)^2 - \prod_{i=1}^{10} \cos\left(\frac{x_i - 100}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]^n$	0
$f_{12}(x) = \frac{\pi}{5} \left[ 10 \sin^2(\pi x_1) + \sum_{i=1}^{29} (x_i - 1)^2 (1 + 10 \sin^2(\pi x_{i+1})) + (x_n - 1)^2 + \sum_{i=1}^{30} u(x_i, 10, 100, 4) \right]$ $y_i = 1 + \frac{1}{4}(x_i + 1)$ $u(x_i, a, b, m) = \begin{cases} b(x_i - a)^m, & x_i > a \\ 0, & -a \leq x_i \leq a \\ b(-x_i - a)^m, & x_i < -a \end{cases}$	30	$[-50, 50]^n$	0
$f_{13}(x) = 0.1 \left[ \sin^2(\pi x_1) + \sum_{i=1}^{29} (x_i - 1)^2 (1 + \sin^2(\pi x_{i+1})) + (x_n - 1)^2 (1 + \sin^2(2\pi x_n)) \right] + \sum_{i=1}^{30} u(x_i, 5, 100, 4)$	30	$[-50, 50]^n$	0
$f_{14}(x) = \left[ \frac{1}{\pi} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^{25} ( x_i - a_{ij} )^2} \right]^{-1}$	2	$[-65.536, 65.536]^n$	1
$f_{15}(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[ a_i - \frac{x_i (b_i^2 + b_i x_i)}{1 + b_i^2 + x_i^2} \right]^2$	4	$[-5, 5]^n$	0.0003075
$f_{16}(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{5}x_1^6 + x_2x_3 - 4x_2^2 + 4x_3^4$	2	$[-5, 5]^n$	-1.0516285
$f_{17}(x) = (x_2 - \frac{5.1}{4x_1^2}x_1^2 + \frac{5}{3}x_1 - 6)^2 + 10 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{10}}\right) \cos(x_1) + 10$	2	$[-5, 10] \times [0, 15]$	0.398
$f_{18}(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] \times [30 + (2x_1 + 1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	2	$[-2, 2]^n$	3
$f_{19}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp\left[-\sum_{j=1}^4 a_j (x_j - p_j)^2\right]$	3	$[0, 1]^n$	-3.86
$f_{20}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp\left[-\sum_{j=1}^4 a_j (x_j - p_j)^2\right]$	6	$[0, 1]^n$	-3.32
$f_{21}(x) = -\sum_{i=1}^5 ( x - a_i )(x - a_i)^2 + c_i)^{-1}$	4	$[0, 10]^n$	-10
$f_{22}(x) = -\sum_{i=1}^5 ( x - a_i )(x - a_i)^2 + c_i)^{-1}$	4	$[0, 10]^n$	-10
$f_{23}(x) = -\sum_{i=1}^{10} ( x - a_i )(x - a_i)^2 + c_i)^{-1}$	4	$[0, 10]^n$	-10

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (πηγή: He et al., 2009)

Test function	n	S	$f_{\min}$
$f_8(x)^{300}$	300	$[-500, 500]^n$	-125694.7
$f_9(x)^{300}$	300	$[-5.12, 5.12]^n$	0
$f_{10}(x)^{300}$	300	$[-32, 32]^n$	0
$f_{11}(x)^{300}$	300	$[-600, 600]^n$	0
$f_{12}(x)^{300}$	300	$[-50, 50]^n$	0
$f_{13}(x)^{300}$	300	$[-50, 50]^n$	0

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (multimodal, 300 διαστάσεις) (πηγή: He et al., 2009)

#### 4.4.2: Ρύθμιση παραμέτρων αλγορίθμου GSO

- Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται ομοιόμορφα και τυχαία εντός του χώρου αναζήτησης, ενώ το μέγεθός του ορίστηκε ίσο με 48.
- Η αρχική γωνία κεφαλής (head angle)  $\phi$  για κάθε μέλος ορίστηκε ίση με  $(45^\circ, \dots, 45^\circ)$ .
- Η σταθερά  $\alpha$  υπολογίζεται στρογγυλοποιώντας τη ρίζα  $\sqrt{n+1}$ , όπου  $n$  είναι η διάσταση του χώρου αναζήτησης.
- Η μέγιστη γωνία αναζήτησης (pursuit angle), η μέγιστη γωνία στροφής (turning angle) και η μέγιστη απόσταση αναζήτησης (pursuit distance), ισούται αντίστοιχα με:

$$\theta_{\max} = \frac{\pi}{\alpha^2}, \alpha_{\max} = \frac{\theta_{\max}}{2}$$
$$l_{\max} = \|\mathbf{U} - \mathbf{L}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i - L_i)^2}$$

όπου  $L_i, U_i$  είναι αντίστοιχα το κατώτερο, ανώτερο όριο για την  $i$  διάσταση.

- Το ποσοστό των rangers (κρίσιμη παράμετρος ελέγχου) λαμβάνεται ίσο με 20%.

Συγκρίθηκε η απόδοση του GSO με την απόδοση:

- γενετικού αλγορίθμου (genetic algorithm, GA). Μέγεθος πληθυσμού: 50.
- εξελικτικού προγραμματισμού (evolutionary programming, EP). Μέγεθος πληθυσμού: 100.
- στρατηγικών εξέλιξης (Evolutionary Strategies, ES). Μέγεθος πληθυσμού: 30.
- Particle Swarm Optimization (PSO). Μέγεθος πληθυσμού: 50 (He et al., 2009)

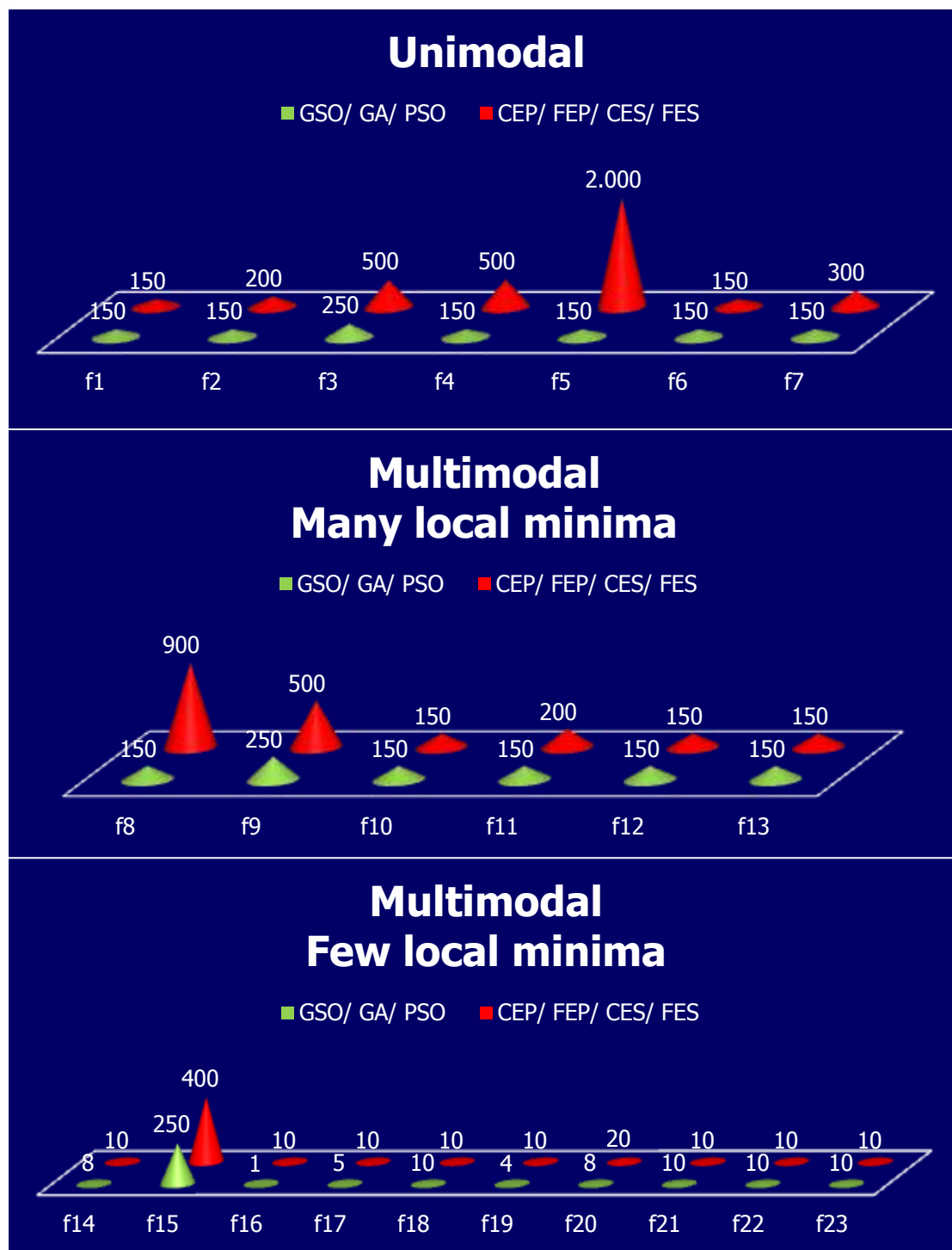
Οι Yao και Liu πρότειναν τις εξελιγμένες εκδοχές (fast) FEP, FES, στις οποίες οι Gaussian μεταλλάξεις των συμβατικών (conventional) EP (CEP), ES (CES) αντικαθίστανται με τις μεταλλάξεις Cauchy.

Στο σχήμα 4.7 απεικονίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων για τις 23 benchmark συναρτήσεις. Παρατηρείται ότι ο GSO (όπως και ο GA και ο PSO) απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις από τους CEP/ FEP, CES/ FES.

Για τις  $f_1$ - $f_{13}$  ( $n=30$ ), οι He, Wu, Saunders πραγματοποίησαν χίλια ανεξάρτητα τρεξίματα των GSO, GA και PSO. Αυτό έγινε καθώς για μερικές από αυτές (για παράδειγμα η  $f_{10}$ ) ένας μικρός αριθμός τρεξιμάτων (όπως 50) δεν είναι αρκετός για να επιτευχθούν συγκλίνουσες τυπικές αποκλίσεις και για να αποφευχθούν λανθασμένα συμπεράσματα σχετικά με την πραγματική απόδοση του GSO σε σχέση με τους GA, PSO.

Για τις  $f_{14}$ - $f_{23}$  ( $n < 6$ ), πραγματοποιήθηκαν 50 τρεξίματα (He et al, 2009).

Για τις  $f_8$ - $f_{13}$  ( $n=300$ ), πραγματοποιήθηκαν πέντε ανεξάρτητα τρεξίματα των τεσσάρων αλγορίθμων προκειμένου να αποκτηθεί ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.7: Αριθμός εκτιμήσεων ανά τρέξιμο (\*1000) για τις benchmark συναρτήσεις  $f_1$ - $f_{23}$

### 4.4.3: Unimodal Συναρτήσεις

Παρά το γεγονός ότι τα unimodal (μίας μεταβλητής) προβλήματα επιλύονται αποδοτικά με ντετερμινιστικούς αλγόριθμους, υιοθετούνται προκειμένου να εκτιμήσουν την απόδοση εξελικτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Οι He, Wu, Saunders χρησιμοποίησαν τον GSO προκειμένου να βρουν το καθολικό ελάχιστο για καθεμία από τις unimodal συναρτήσεις  $f_1$ - $f_7$  και το συνέκριναν με το αντίστοιχο των GA, PSO. Δεδομένου ότι και οι 7 συναρτήσεις έχουν το μηδέν ως καθολικό ελάχιστο, όσο πιο κοντά σε αυτό είναι το αποτέλεσμα τόσο πιο ακριβής είναι η προσέγγιση. Οι αλγόριθμοι εκτελέστηκαν περισσότερες από 1000 φορές προκειμένου να εξαχθεί αξιόπιστο και έγκυρο μέσο αποτέλεσμα.

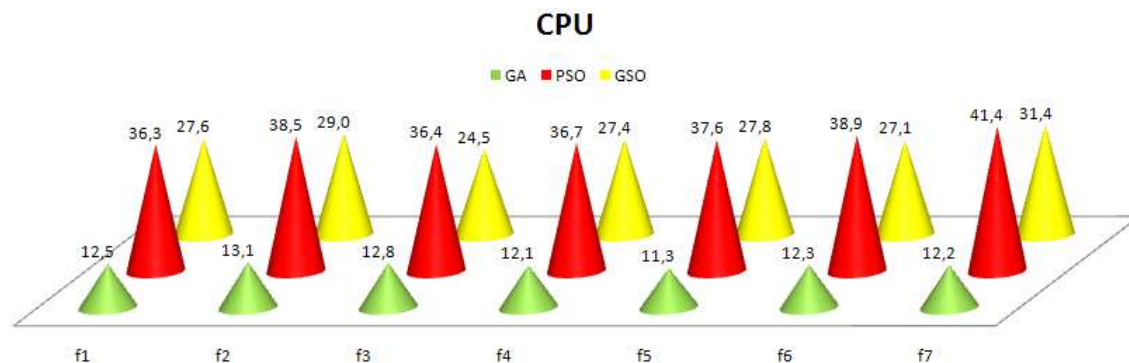
Ο πίνακας 4.3 περιέχει τον μέσο όρο του καθολικού ελαχίστου που έδωσε ο GA, PSO, GSO για τις  $f_1$ - $f_7$ . Παρατηρείται ότι ο GSO παρέχει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον GA για όλες τις συναρτήσεις. Συγκρίνοντας τον GSO με τον PSO, παρατηρείται ότι ο GSO είναι πιο ακριβής για τις  $f_4$  και  $f_6$ , ενώ απέδωσε στατιστικά το χειρότερο αποτέλεσμα για τις υπόλοιπες. Συνοψίζοντας, η κατάταξη ως προς την ακρίβεια των τριών αλγορίθμων είναι η εξής: PSO>GSO>GA.

Function	Algorithms	Mean
$f_1$	GA	3.1711
	PSO	$3.6927 \times 10^{-37}$
	GSO	$1.9481 \times 10^{-8}$
$f_2$	GA	0.5771
	PSO	$2.9168 \times 10^{-24}$
	GSO	$3.7039 \times 10^{-5}$
$f_3$	GA	9749.9145
	PSO	$1.1979 \times 10^{-3}$
	GSO	5.7829
$f_4$	GA	7.9610
	PSO	0.4123
	GSO	<b>0.1078</b>
$f_5$	GA	338.5616
	PSO	<b>37.3582</b>
	GSO	49.8359
$f_6$	GA	3.6970
	PSO	0.1460
	GSO	$1.6000 \times 10^{-2}$
$f_7$	GA	0.1045
	PSO	$9.9024 \times 10^{-3}$
	GSO	$7.3773 \times 10^{-2}$

**Πίνακας 4.3: Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_1$ - $f_7$  (Σύγκριση GSO με GA, PSO)  
 (πηγή: He et al., 2009)**



Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται ο μέσος υπολογιστικός χρόνος CPU (sec) των GA, PSO, GSO για τις  $f_1$ - $f_7$ . Ο χρόνος που απαιτείται για τον GA είναι μικρότερος σε σύγκριση με GSO και PSO. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι ο GSO κατορθώνει να ισορροπήσει την ακρίβεια (υστερεί έναντι του PSO) με την υπολογιστική αποδοτικότητα (υστερεί έναντι του GA).



Σχήμα 4.8 Μέσος υπολογιστικός χρόνος (sec) (Σύγκριση GSO με GA, PSO)

Στον πίνακα 4.4 (σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES), ο GSO κατετάγη τρίτος (υπερικήθηκε από FEP, FES). Ωστόσο, ο GSO απαιτεί πολύ λιγότερες επαναλήψεις.

Function	Mean function value (Rank) (Standard deviation)				
	GSO	FEP	CEP	FES	CES
$f_1$	$1.9481 \times 10^{-8}$ (1) ( $1.1629 \times 10^{-8}$ )	$5.7 \times 10^{-4}$ (5) ( $1.3 \times 10^{-4}$ )	$2.2 \times 10^{-4}$ (3) ( $5.9 \times 10^{-4}$ )	$2.5 \times 10^{-4}$ (4) ( $6.8 \times 10^{-4}$ )	$3.4 \times 10^{-5}$ (2) ( $8.6 \times 10^{-6}$ )
$f_2$	$3.7039 \times 10^{-5}$ (1) ( $8.6185 \times 10^{-5}$ )	$8.1 \times 10^{-3}$ (3) ( $7.7 \times 10^{-4}$ )	$2.6 \times 10^{-3}$ (2) ( $1.7 \times 10^{-4}$ )	$6.0 \times 10^{-2}$ (5) ( $9.6 \times 10^{-3}$ )	$2.1 \times 10^{-2}$ (4) ( $2.2 \times 10^{-3}$ )
$f_3$	5.7829 (5) (3.6813)	$1.6 \times 10^{-2}$ (3) ( $1.4 \times 10^{-2}$ )	$5.0 \times 10^{-2}$ (4) ( $6.6 \times 10^{-2}$ )	$1.4 \times 10^{-3}$ (2) ( $5.3 \times 10^{-4}$ )	$1.3 \times 10^{-4}$ (1) ( $8.5 \times 10^{-5}$ )
$f_4$	0.1078 (2) ( $3.9981 \times 10^{-2}$ )	0.3 (3) (0.5)	2.0 (5) (1.2)	$5.5 \times 10^{-3}$ (1) ( $6.5 \times 10^{-4}$ )	0.35 (4) (0.42)
$f_5$	49.8359 (5) (30.1771)	5.06 (1) (5.87)	6.17 (2) (13.61)	33.28 (4) (43.13)	6.69 (3) (14.45)
$f_6$	$1.6000 \times 10^{-2}$ (3) (0.1333)	0 (1) (0)	577.76 (5) (1125.76)	0 (1) (0)	411.16 (4) (695.35)
$f_7$	$7.3773 \times 10^{-2}$ (5) ( $9.2557 \times 10^{-2}$ )	$7.6 \times 10^{-3}$ (1) ( $2.6 \times 10^{-3}$ )	$1.8 \times 10^{-2}$ (3) ( $6.4 \times 10^{-3}$ )	$1.2 \times 10^{-2}$ (2) ( $5.8 \times 10^{-3}$ )	$3.0 \times 10^{-2}$ (4) ( $1.5 \times 10^{-2}$ )
Average rank	3.14	2.42	3.43	2.71	3.14
Final rank	3	1	5	2	3

Πίνακας 4.4: Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_1$ - $f_7$  (Σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES) (πηγή: He et al., 2009)

#### 4.4.4: Multimodal Συναρτήσεις

##### 4.4.4.1 Multimodal Συναρτήσεις με πολλά τοπικά ελάχιστα

Ο πίνακας 4.5 απεικονίζει το μέσο (1000 τρέξιμα) καθολικό ελάχιστο που έδωσε ο GA, PSO, GSO για τις multimodal  $f_8$ - $f_{13}$ , οι οποίες θεωρούνται ως οι πιο δύσκολες συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση (ο αριθμός των τοπικών ελαχίστων αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της διάστασης της συνάρτησης). Παρατηρούμε ότι ο GSO εμφανίζει αισθητά καλύτερες επιδόσεις. Για παράδειγμα, εντόπισε το καθολικό ελάχιστο της  $f_8$  σχεδόν σε κάθε τρέξιμο, ενώ οι GA, PSO έδωσαν λιγότερο ακριβή αποτελέσματα. Η μοναδική εξαίρεση είναι η  $f_{11}$  (υπερνικήθηκε από GA).

Τα αποτελέσματα του GSO είναι αισθητά καλύτερα σε σχέση με εκείνα του PSO στις περισσότερες συναρτήσεις. Για τις  $f_{12}$ ,  $f_{13}$  τα ο PSO έδωσε εξίσου καλά αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια και την ταχύτητα σύγκλισης, ωστόσο είναι πιο πιθανό να παγιδευτεί σε τοπικά ελάχιστα και συνεπώς οδηγεί σε ασυνεπή απόδοση αναζήτησης.

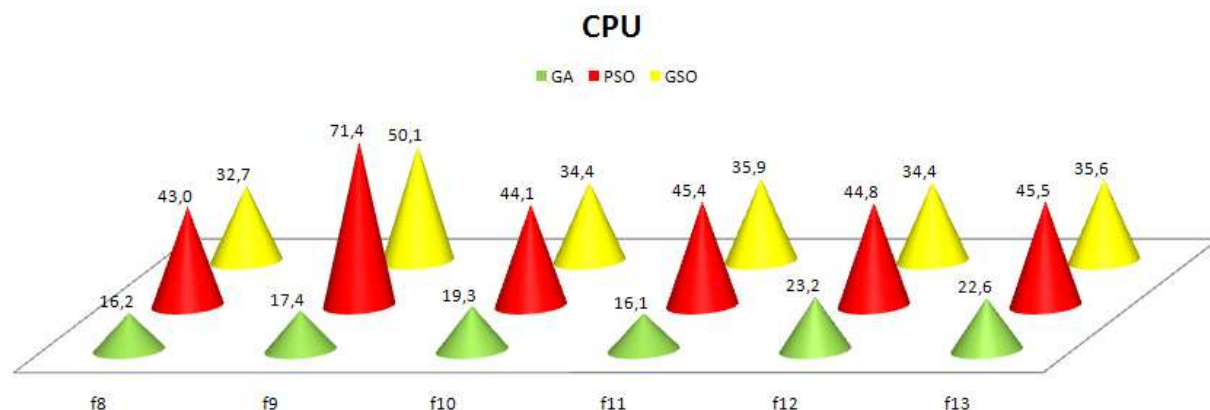
Συνοψίζοντας, η κατάταξη ως προς την απόδοση αναζήτησης είναι: GSO>GA>PSO.

Function	Algorithms	Mean
$f_8$	GA	-12566.0977
	PSO	-9659.6993
	GSO	<b>-12569.4882</b>
$f_9$	GA	<b>0.6509</b>
	PSO	20.7863
	GSO	1.0179
$f_{10}$	GA	0.8678
	PSO	$1.3404 \times 10^{-3}$
	GSO	<b><math>2.6548 \times 10^{-5}</math></b>
$f_{11}$	GA	1.0038
	PSO	0.2323
	GSO	<b><math>3.0792 \times 10^{-2}</math></b>
$f_{12}$	GA	$4.3572 \times 10^{-2}$
	PSO	$3.9503 \times 10^{-2}$
	GSO	<b><math>2.7648 \times 10^{-11}</math></b>
$f_{13}$	GA	0.1681
	PSO	$5.0519 \times 10^{-2}$
	GSO	<b><math>4.6948 \times 10^{-5}</math></b>

**Πίνακας 4.5: Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_8$ - $f_{13}$  (Σύγκριση GSO με GA, PSO)  
(πηγή: He et al., 2009)**

Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται ο μέσος υπολογιστικός χρόνος CPU (sec) των GA, PSO, GSO για τις  $f_8$ - $f_{13}$ . Ο GSO απαιτεί λιγότερο χρόνο σε σχέση με τον PSO και περισσότερο σε σχέση με τον GA.





Σχήμα 4.9 Μέσος υπολογιστικός χρόνος (sec) (Σύγκριση GSO με GA, PSO)

Στον πίνακα 4.6 (σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES), ο GSO κατετάγη πρώτος (καλύτερη απόδοση) στις περισσότερες συναρτήσεις (με εξαίρεση την  $f_9$  στην οποία υπερνικήθηκε από τους FEP, FES και την  $f_{11}$  στην οποία υπερνικήθηκε από τον FEP) και μάλιστα απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις.

Function	Mean function value (Rank) (Standard deviation)				
	GSO	FEP	CEP	FES	CES
$f_8$	-12569.4882 (1) ( $2.2140 \times 10^{-2}$ )	-12554.5 (3) (52.6)	-7917.1 (4) (634.5)	-12556.4 (2) (32.53)	-7549.9 (5) (631.39)
$f_9$	1.0179 (3) (0.9509)	$4.6 \times 10^{-2}$ (1) ( $1.2 \times 10^{-2}$ )	89.0 (5) (23.1)	0.16 (2) (0.33)	70.82 (4) (21.49)
$f_{10}$	$2.6548 \times 10^{-5}$ (1) ( $3.0820 \times 10^{-5}$ )	$1.8 \times 10^{-2}$ (3) ( $2.1 \times 10^{-2}$ )	9.2 (5) (2.8)	$1.2 \times 10^{-2}$ (2) ( $1.8 \times 10^{-3}$ )	9.07 (4) (2.84)
$f_{11}$	$3.1283 \times 10^{-2}$ (2) ( $2.87567 \times 10^{-2}$ )	$1.6 \times 10^{-2}$ (1) ( $2.2 \times 10^{-2}$ )	$8.6 \times 10^{-2}$ (4) (0.12)	$3.7 \times 10^{-2}$ (3) ( $5.0 \times 10^{-2}$ )	0.38 (5) (0.77)
$f_{12}$	$2.7648 \times 10^{-11}$ (1) ( $9.1674 \times 10^{-11}$ )	$9.2 \times 10^{-6}$ (2) ( $6.1395 \times 10^{-5}$ )	1.76 (5) (2.4)	$2.8 \times 10^{-2}$ (3) ( $8.1 \times 10^{-11}$ )	1.18 (4) (1.87)
$f_{13}$	$4.6948 \times 10^{-5}$ (1) ( $7.001 \times 10^{-4}$ )	$1.6 \times 10^{-4}$ (3) ( $7.3 \times 10^{-5}$ )	1.4 (5) (3.7)	$4.7 \times 10^{-5}$ (2) ( $1.5 \times 10^{-5}$ )	1.39 (4) (3.33)
Average rank	1.5	2.17	4.67	2.22	4.33
Final rank	1	2	5	3	4

Πίνακας 4.6: Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_8$ - $f_{13}$   
 (Σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES) (πηγή: He et al., 2009)

#### 4.4.4.2 Multimodal Συναρτήσεις με λίγα τοπικά ελάχιστα

Ο πίνακας 4.7 απεικονίζει το μέσο (50 τρεξίματα) καθολικό ελάχιστο που έδωσε ο GA, PSO, GSO για τις multimodal  $f_{14}$ - $f_{24}$  ( $n=6$ ), οι οποίες έχουν μόνο λίγα τοπικά ελάχιστα και μπορούν να επιλυθούν ακόμη και με ντετερμινιστικούς αλγορίθμους.

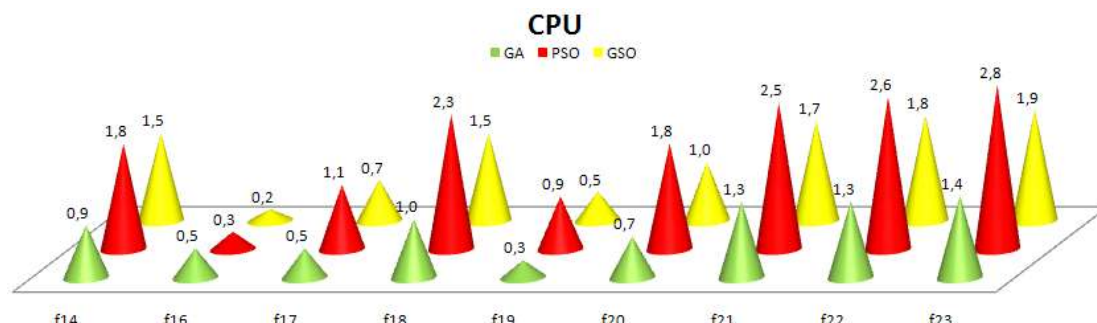
Σε σύγκριση με τον GA, ο GSO πέτυχε στατιστικά καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις συναρτήσεις, με εξαίρεση τις  $f_{14}$ ,  $f_{20}$  για τις οποίες δεν βρέθηκε σημαντική στατιστική διαφορά. Σε σύγκριση με τον PSO, ο GSO έχει καλύτερη απόδοση στις περισσότερες των συναρτήσεων εκτός από τις  $f_{14}$ ,  $f_{15}$  (παρόμοια) και τις  $f_{21}$ - $f_{23}$ . (ελαφρώς χειρότερη).

Συνοψίζοντας, η κατάταξη ως προς την απόδοση αναζήτησης είναι: GSO>PSO>GA.

Function	Algorithms	Mean
$f_{14}$	GA	0.9989
	PSO	1.0239
	GSO	<b>0.9980</b>
$f_{15}$	GA	$7.0878 \times 10^{-3}$
	PSO	$3.8074 \times 10^{-4}$
	GSO	<b><math>3.7713 \times 10^{-4}</math></b>
$f_{16}$	GA	-1.0298
	PSO	-1.0160
	GSO	<b>-1.031628</b>
$f_{17}$	GA	0.4040
	PSO	0.4040
	GSO	<b>0.3979</b>
$f_{18}$	GA	7.5027
	PSO	3.0050
	GSO	<b>3.0</b>
$f_{19}$	GA	-3.8624
	PSO	-3.8582
	GSO	<b>-3.8628</b>
$f_{20}$	GA	-3.2627
	PSO	-3.1846
	GSO	<b>-3.2697</b>
$f_{21}$	GA	-5.1653
	PSO	<b>-7.5439</b>
	GSO	-6.09
$f_{22}$	GA	-5.4432
	PSO	<b>-8.3553</b>
	GSO	-6.5546
$f_{23}$	GA	-4.9108
	PSO	<b>-8.9439</b>
	GSO	-7.4022

**Πίνακας 4.7 Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_{14}$ - $f_{23}$   
 (Σύγκριση GSO με GA, PSO) (πηγή: He et al., 2009)**

Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται ο μέσος υπολογιστικός χρόνος CPU (sec) των GA, PSO, GSO για τις  $f_{14}$ - $f_{23}$ . Ο GSO απαιτεί λιγότερο χρόνο σε σχέση με τον PSO και περισσότερο σε σχέση με τον GA.



**Σχήμα 4.10 Μέσος υπολογιστικός χρόνος (sec)  
 (Σύγκριση GSO με GA, PSO)**

Στον πίνακα 4.8 (σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES), ο GSO κατετάγη πρώτος (καλύτερη απόδοση) στις περισσότερες συναρτήσεις με εξαίρεση τις  $f_{20}$ - $f_{23}$ .

Function	Mean function value (Rank Standard deviation)				
	GSO	FEP	CEP	FES	CES
$f_{14}$	0.9980 (1) (0)	1.22 (3) (0.56)	1.66 (4) (1.19)	1.20 (2) (0.63)	2.16 (5) (1.82)
$f_{15}$	$4.1687 \times 10^{-4}$ (1) ( $3.1238 \times 10^{-4}$ )	$5.0 \times 10^{-4}$ (2) ( $3.2 \times 10^{-4}$ )	$4.7 \times 10^{-4}$ (2) ( $3.0 \times 10^{-4}$ )	$9.7 \times 10^{-4}$ (4) ( $4.2 \times 10^{-4}$ )	$1.2 \times 10^{-3}$ (5) ( $1.6 \times 10^{-5}$ )
$f_{16}$	-1.031628 (1) (0)	-1.03 (2) ( $4.9 \times 10^{-4}$ )	-1.03 (2) ( $4.9 \times 10^{-4}$ )	-1.0316 (4) ( $6.0 \times 10^{-7}$ )	-1.0316 (4) ( $6.0 \times 10^{-7}$ )
$f_{17}$	0.3979 (1) (0)	0.398 (4) ( $1.5 \times 10^{-7}$ )	0.398 (4) ( $1.5 \times 10^{-7}$ )	0.398 (2) ( $6.0 \times 10^{-8}$ )	0.398 (2) ( $6.0 \times 10^{-8}$ )
$f_{18}$	3.0 (1) (0)	3.02 (5) (0.11)	3.0 (1) (0)	3.0 (1) (0)	3.0 (1) (0)
$f_{19}$	-3.8628 (1) ( $3.8430 \times 10^{-6}$ )	-3.86 (2) ( $1.4 \times 10^{-5}$ )	-3.86 (5) ( $1.4 \times 10^{-2}$ )	-3.86 (4) ( $4.0 \times 10^{-3}$ )	-3.86 (3) ( $1.4 \times 10^{-5}$ )
$f_{20}$	-3.2697 (3) ( $5.9647 \times 10^{-2}$ )	-3.27 (2) ( $5.9 \times 10^{-2}$ )	-3.28 (1) ( $5.8 \times 10^{-2}$ )	-3.23 (5) (0.12)	-3.24 (4) ( $5.7 \times 10^{-2}$ )
$f_{21}$	-6.09 (3) (3.4563)	-5.52 (5) (1.59)	-6.86 (2) (2.67)	-5.54 (4) (1.82)	-6.96 (1) (3.10)
$f_{22}$	-6.5546 (4) (3.2443)	-5.52 (5) (2.12)	-8.27 (2) (2.95)	-6.76 (3) (3.01)	-8.31 (1) (3.10)
$f_{23}$	-7.4022 (4) (3.2131)	-6.57 (5) (3.14)	-9.10 (1) (2.92)	-7.63 (3) (3.27)	-8.50 (2) (1.25)
Average rank	2	3.5	2.4	3.2	2.8
Final rank	1	5	2	4	3

**Πίνακας 4.8 Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_{14}$ - $f_{23}$   
 (Σύγκριση GSO με CEP, FEP, CES, FES) (πηγή: He et al., 2009)**

#### 4.4.4.3 Multimodal Συναρτήσεις 300 διαστάσεων

Οι διαστάσεις των 23 προαναφερθέντων συναρτήσεων είναι μικρές (έως 30) σε σύγκριση με τα πραγματικά προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία συνήθως εμπλέκουν εκατοντάδες έως χιλιάδες μεταβλητές. Προκειμένου να ερευνηθεί περαιτέρω αν ο GSO μπορεί να χειριστεί προβλήματα μεγάλης κλίμακας, εφαρμόστηκε στις multimodal συναρτήσεις  $f_8$ - $f_{13}$ , οι οποίες επεκτάθηκαν στις 300 διαστάσεις.

Ο GSO έδωσε τελικά μέσα αποτελέσματα τόσο καλά όσο εκείνα της περίπτωσης των 30 διαστάσεων, ενώ οι υπόλοιποι έδωσαν αποτελέσματα όχι τόσο ακριβή ή δεν μπορούσαν να συγκλίνουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που ο PSO απέδωσε ικανοποιητικά σε multimodal benchmark συναρτήσεις 30 διαστάσεων, δεν κατάφερε να χειριστεί την επέκτασή τους ( $n=300$ ), με εξαίρεση την  $f_{10}(x)^{300}$ .

Function	Mean function value				
	GSO	GA	PSO	EP	ES
$f_8(x)^{300}$	<b>-125351.2</b>	-117275.3	-87449.2	-78311.9	-66531.3
$f_9(x)^{300}$	<b>98.9</b>	121.3	427.1	383.3	583.2
$f_{10}(x)^{300}$	$1.3527 \times 10^{-3}$	6.24	<b><math>3.9540 \times 10^{-6}</math></b>	0.2946	9.6243
$f_{11}(x)^{300}$	<b><math>1.8239 \times 10^{-7}</math></b>	0.37	1.81	$2.8244 \times 10^{-2}$	0.1583
$f_{12}(x)^{300}$	<b><math>8.2582 \times 10^{-8}</math></b>	52.82	14.56	39.3	3093.2
$f_{13}(x)^{300}$	<b><math>2.0175 \times 10^{-7}</math></b>	178.34	549.2	738.2	2123.2

**Πίνακας 4.9 Μέσο καθολικό ελάχιστο των  $f_8$ - $f_{13}$   
 (Σύγκριση GSO με GA, PSO, EP, ES) (πηγή: He et al., 2009)**

## 4.5. Παράμετροι ελέγχου

### 4.5.1: Ο αριθμός των producers

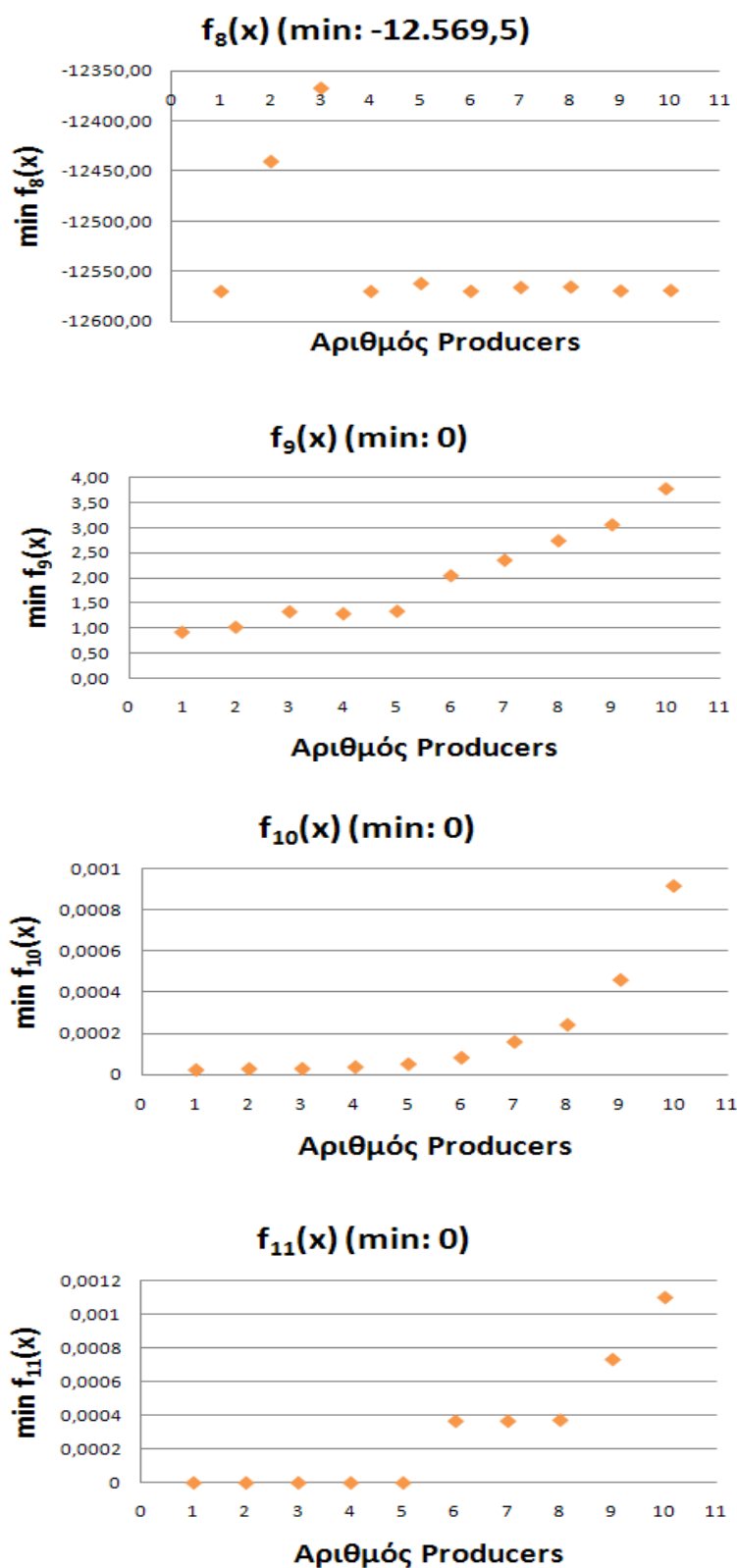
Ο GSO βασίζεται σε απλοποίηση του μοντέλου PS. Συγκεκριμένα, υποθέτει ότι υπάρχει μόνο ένας producer σε όλη την ομάδα. Στην ενότητα αυτή, θα αναζητηθεί ο βέλτιστος αριθμός producers και θα αποδειχθεί ότι αυτός είναι η μονάδα. Για τον σκοπό αυτό, ο GSO έχει εκτελεστεί 50 φορές για καθεμία από τις  $f_8$ - $f_{13}$  και για 0-10 producers (πηγή: He et al., 2009)

Τα μέσα αποτελέσματα (καθολικό ελάχιστο) σε συνάρτηση με τον αριθμό των producers απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα. Παρατηρείται ότι, και για τις 4 συναρτήσεις, η ομάδα χωρίς producer αποδίδει χείριστα. Ειδικότερα, για τις συναρτήσεις  $f_9$ ,  $f_{10}$ ,  $f_{13}$ , αυξανόμενου του αριθμού των producers από 1 έως 10, η απόδοση επιδεινώθηκε. Η παρατήρηση αυτή είναι περισσότερο εμφανής για την  $f_{13}$ , στην οποία το μέσο καθολικό ελάχιστο αυξήθηκε από  $1,29 \cdot 10^{-9}$  σε  $3,66 \cdot 10^{-4}$  με την αύξηση των producers από 5 σε 6.

Συνοψίζοντας:

- όσο λιγότεροι είναι οι producers, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση αναζήτησης.
- τουλάχιστον για τις συναρτήσεις  $f_9$ ,  $f_{10}$ ,  $f_{13}$  η απόδοση του GSO χειροτερεύει με την αύξηση των producers.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι στη φύση πολλά είδη έχουν σχετικά λίγα έμπειρα μέλη τα οποία καθοδηγούν την ομάδα. Αυτό μας παρέχει μία ενστικτώδη εξήγηση στο συμπέρασμα της αριθμητική αυτής διερεύνησης, σύμφωνα με το οποίο μικρότερος αριθμός producers δίδει ακριβέστερα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.11 Μεταβολή του καθολικού ελαχίστου με την αύξηση των producers ( $f_8, f_9, f_{10}, f_{13}$ )

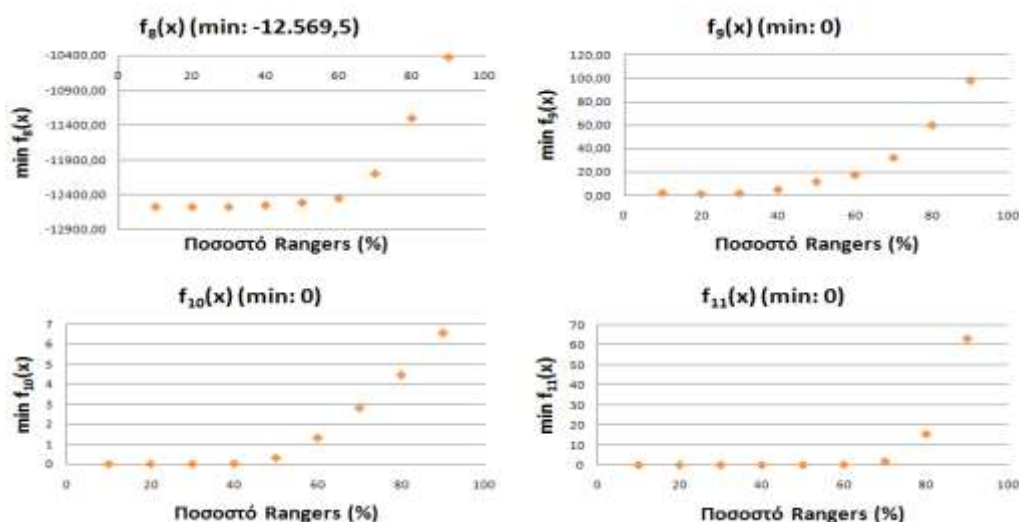


## 4.5.2 Το ποσοστό των rangers

Ο GSO βασίζεται σε τροποποίηση του μοντέλου PS. Συγκεκριμένα, εισάγει τους rangers για την απόδραση από τα τοπικά ελάχιστα. Θα αναζητηθεί το βέλτιστο ποσοστό scroungers και θα αποδειχθεί ότι είναι το 20%. Για τον σκοπό αυτό, ο GSO έχει εκτελεστεί 50 φορές για τις  $f_8$ - $f_{13}$  και για 0% - 100% rangers.

Σύμφωνα με το σχήμα 4.12:

- Ο GSO απέδωσε καλύτερα διασκορπίζοντας το 20% (για τις  $f_8, f_9$ ) και το 10% (για τις  $f_{10}, f_{13}$ ) των μελών της ομάδας. Ορίζοντας το 20% των μελών ως rangers, είναι πιο πιθανό ο GSO να ισορροπήσει ακρίβεια και ταχύτητα σύγκλισης.
- Με την αύξηση του ποσοστού, η απόδοση επιδεινώνεται.
- Ο GSO ο οποίος λειτούργησε χωρίς (0%) ή μόνο με rangers (100%, χωρίς scroungers) απέδωσε το ίδιο χειρίστα, γεγονός το οποίο δείχνει τη συνεισφορά των rangers και των scroungers στη διαδικασία αναζήτησης. Το ποσοστό των rangers είναι πιο καθοριστικό από τον αριθμό των producers.



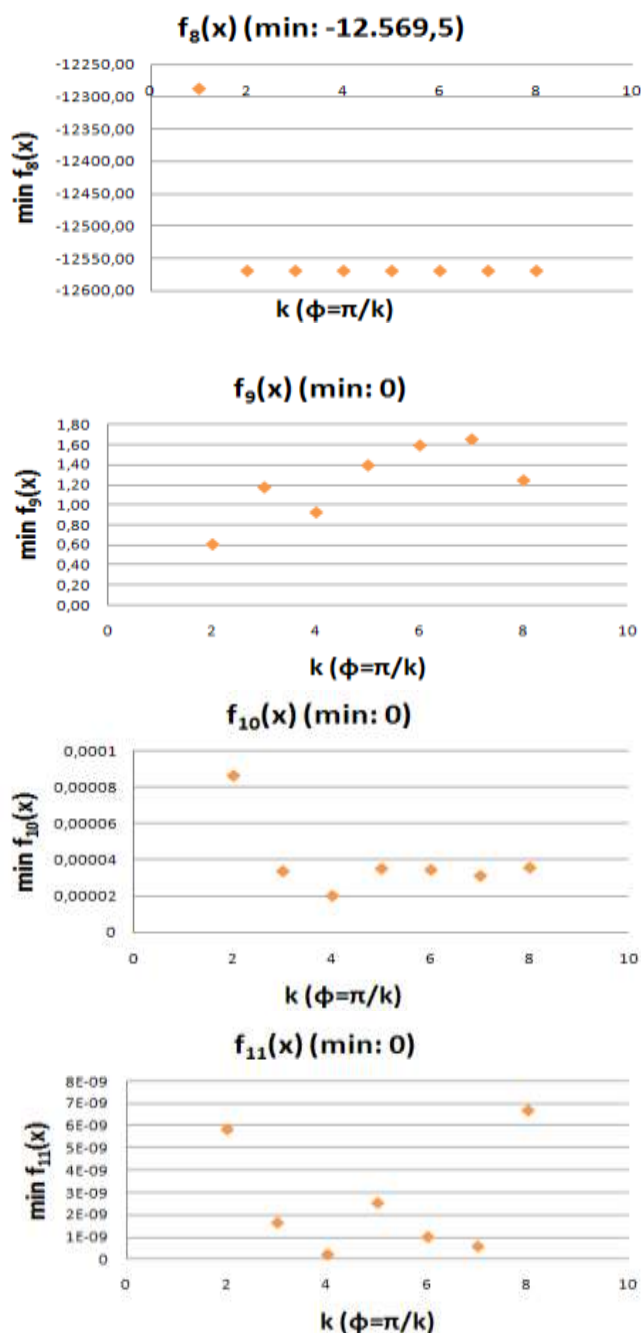
Σχήμα 4.12 Μεταβολή του καθολικού ελαχίστου με την αύξηση των rangers ( $f_8, f_9, f_{10}, f_{13}$ )

## 4.5.3 Άλλοι παράμετροι ελέγχου

Θα αποδειχθεί ότι ο GSO (50 τρεξίματα) δεν είναι ευαίσθητος στις:

### 4.5.3.1 Αρχική γωνία κεφαλής, $\varphi$

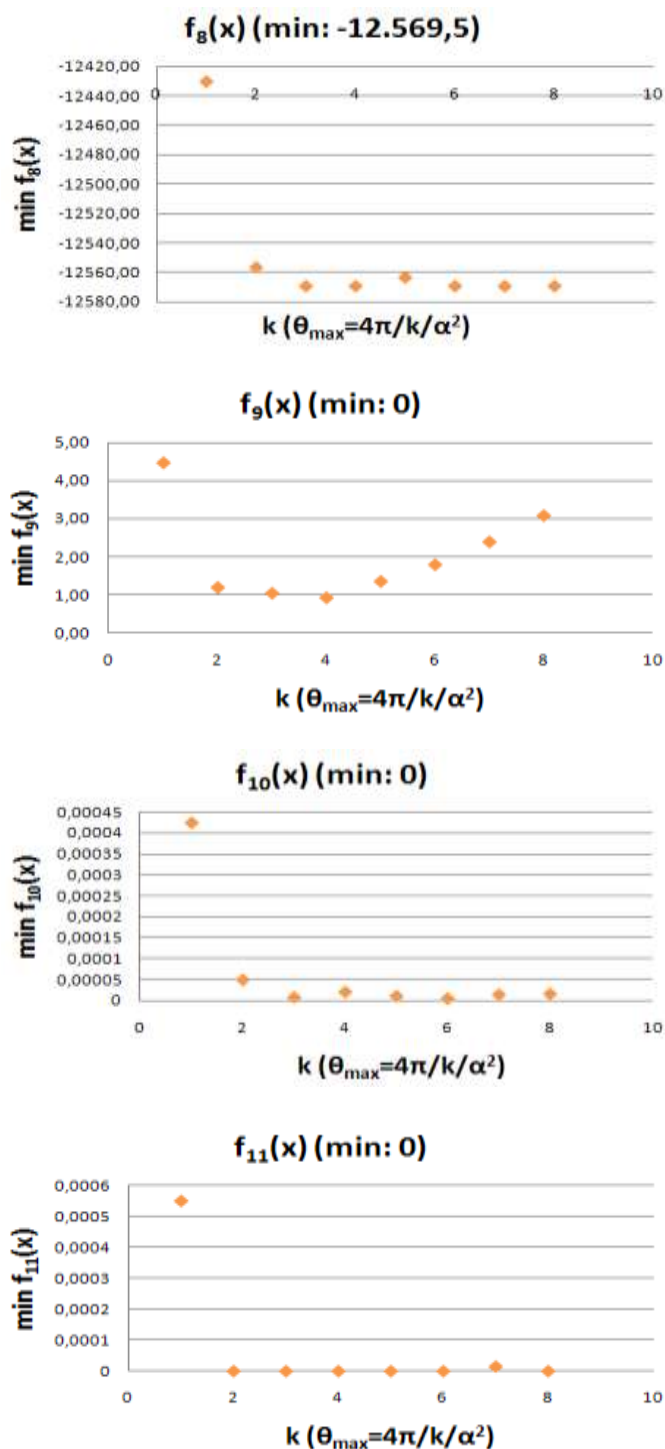
Για τις  $f_{10}$ ,  $f_{13}$  και  $f_8$ ,  $f_9$  το πιο ακριβές μέσο αποτέλεσμα προκύπτει αντίστοιχα για  $k=4$  και  $k=3$ . Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά δεν ήταν σημαντικά καλύτερα σε σχέση με εκείνα για άλλες  $\varphi$ . Η επίδραση, λοιπόν, της μεταβολής της  $\varphi$  στην απόδοση του GSO είναι περιορισμένη, τουλάχιστον για τις 4 υπό εξέταση benchmark συναρτήσεις.



Σχήμα 4.13 Επίδραση της αρχικής γωνίας κεφαλής  $\varphi$

### 4.5.3.2 Η μέγιστη γωνία αναζήτησης, $\theta_{\max}$

Για τις  $f_8$ - $f_9$ ,  $f_{10}$ ,  $f_{13}$  η καλύτερη απόδοση επετεύχθη για  $k=1$ , 6, 3 αντίστοιχα. Σε αντίθεση με το ποσοστό των rangers, η επίδραση της επιλεγείσας τιμής της  $\theta_{\max}$  δεν είναι σημαντική στην απόδοση του GSO.

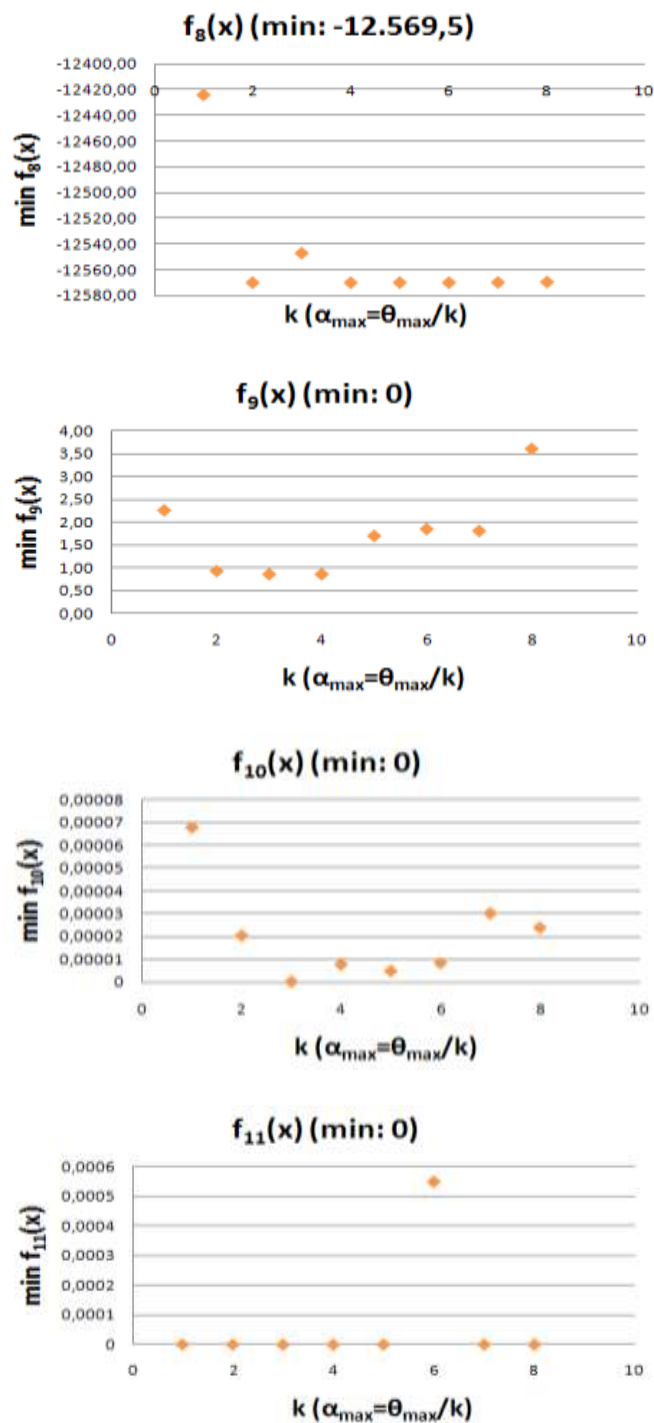


Σχήμα 4.14 Επίδραση της μέγιστης γωνίας αναζήτησης  $\theta_{\max}$ .



### 4.5.3.3 Η μέγιστη γωνία στροφής, $\alpha_{\max}$

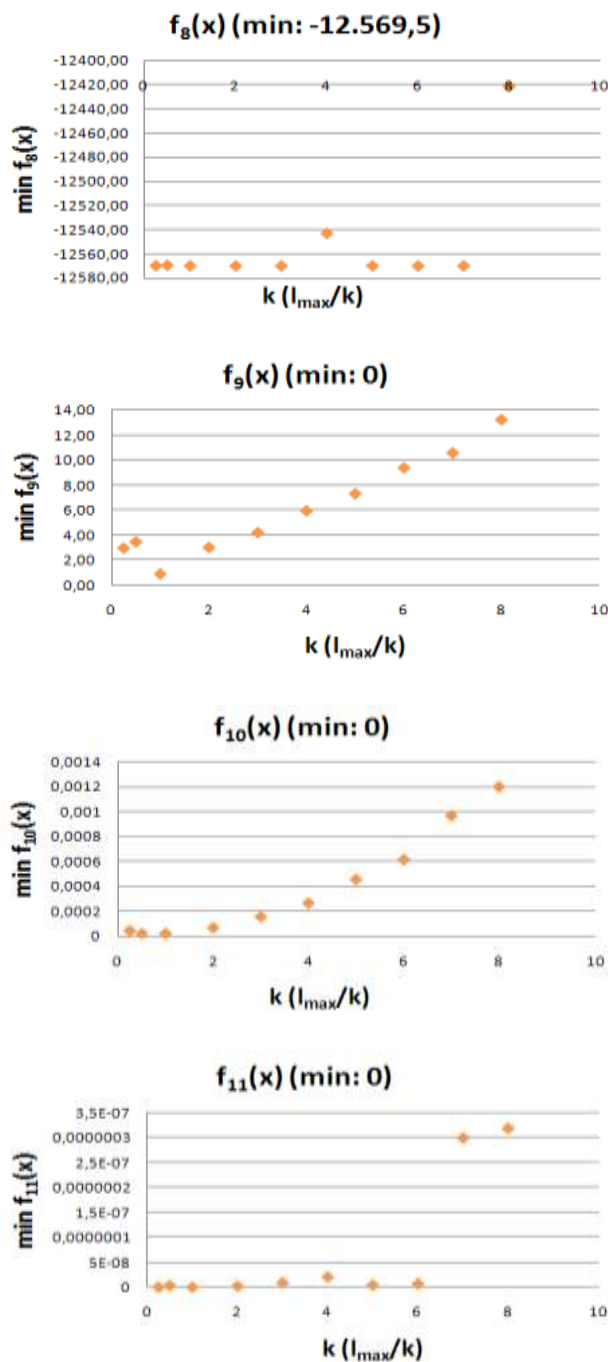
Τίθεται  $\theta_{\max} = \frac{\pi}{\alpha^2}$ . Στον πίνακα 4.15 παρατηρείται ότι για τις συναρτήσεις  $f_8/ f_{13}, f_9, f_{10}$ , το πιο ακριβές αποτέλεσμα προκύπτει αντίστοιχα για  $k=2, 4, 3$ . Η επίδραση της μεταβολής της  $\alpha_{\max}$  στην απόδοση του GSO είναι περιορισμένη.



Σχήμα 4.15 Επίδραση της μέγιστης γωνίας στροφής  $\alpha_{\max}$

#### 4.5.3.4 Η μέγιστη απόσταση αναζήτησης, $l_{\max}$

Τίθεται  $\theta_{\max} = \frac{\pi}{\alpha^2}$ ,  $\alpha_{\max} = \frac{\theta_{\max}}{2}$ . Τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές.



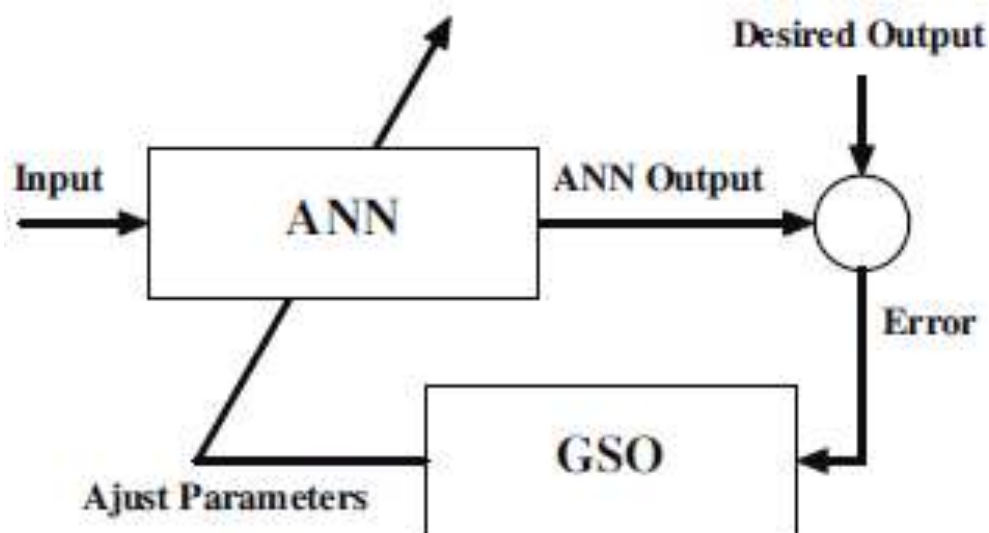
Σχήμα 4.16 Επίδραση της μέγιστης απόστασης αναζήτησης  $l_{\max}$

Συνήθως, οι τέσσερις αυτές παράμετροι ελέγχου δεν είναι ανάγκη να τελειοποιηθούν προκειμένου να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### 4.6. Εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (GSOANN)

Όταν εξετάζονται benchmark συναρτήσεις, ο GSO υπερτερεί τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και ως προς την ταχύτητα σύγκλισης, ειδικά για πολυδιάστατες multimodal συναρτήσεις. Δεδομένου ότι για έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης η καλή απόδοση σε benchmark συναρτήσεις δεν εγγυάται απαραίτητα καλή απόδοση σε πραγματικά προβλήματα, εκπαιδεύτηκαν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με τον GSO προκειμένου να εφαρμοστεί σε τρία πραγματικά προβλήματα ταξινόμησης και να ελεγχθεί η απόδοσή του. Τα (πολλά υποσχόμενα) αποτελέσματα τα οποία παράγονται από το GSOANN είναι καλύτερα σε σχέση με άλλα εξελικτικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Η διαδικασία εκπαίδευσης είναι ένα δύσκολο συνεχές πρόβλημα βελτιστοποίησης, επειδή ο χώρος αναζήτησης είναι πολυδιάστατος και συνήθως επιβαρύνεται με θορύβους και ελλείψεις δεδομένων. Το ANN το οποίο έχει εκπαιδευτεί (He et al, 2009) με βάση τον GSO είναι ένα three-layer feed-forward ANN.



Σχήμα 4.17 Σχηματικό διάγραμμα του GSOANN (He et al., 2009)

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του GSOANN, χρησιμοποιήθηκαν τρία δημοφιλή προβλήματα ταξινόμησης. Εκτελέστηκαν τα πειράματα 50 φορές προκειμένου να εξαχθεί ένα μέσο αποτέλεσμα για κάθε πρόβλημα. Αυτά είναι τα εξής:

- Fisher Iris dataset
- Wisconsin breast classification dataset
- Pima Indian diabetes dataset

Και τα τρία είναι πραγματικά προβλήματα, τα οποία έχουν μελετηθεί διεξοδικά από ειδικούς και είναι από τα πιο προκλητικά προβλήματα μηχανικής μάθησης. Το Fisher Iris dataset είναι ένα πρότυπο πρόβλημα ταξινόμησης και έχει δοκιμαστεί από πολλούς αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Τα τελευταία δύο μολύνονται συνήθως με θορύβους και αποτελούν μεγαλύτερη πρόκληση. Για λόγους σύγκρισης, παρατίθενται τα αποτελέσματα από άλλους αλγορίθμους και συγκεκριμένα από τους:

- SCG (Scaled Conjugate Gradient backpropagation)
- SGA (Simple Genetic Algorithm)
- EP (Evolutionary Programming)
- ES (Evolution Strategies)
- PSO (Particle Swarm Optimizer).

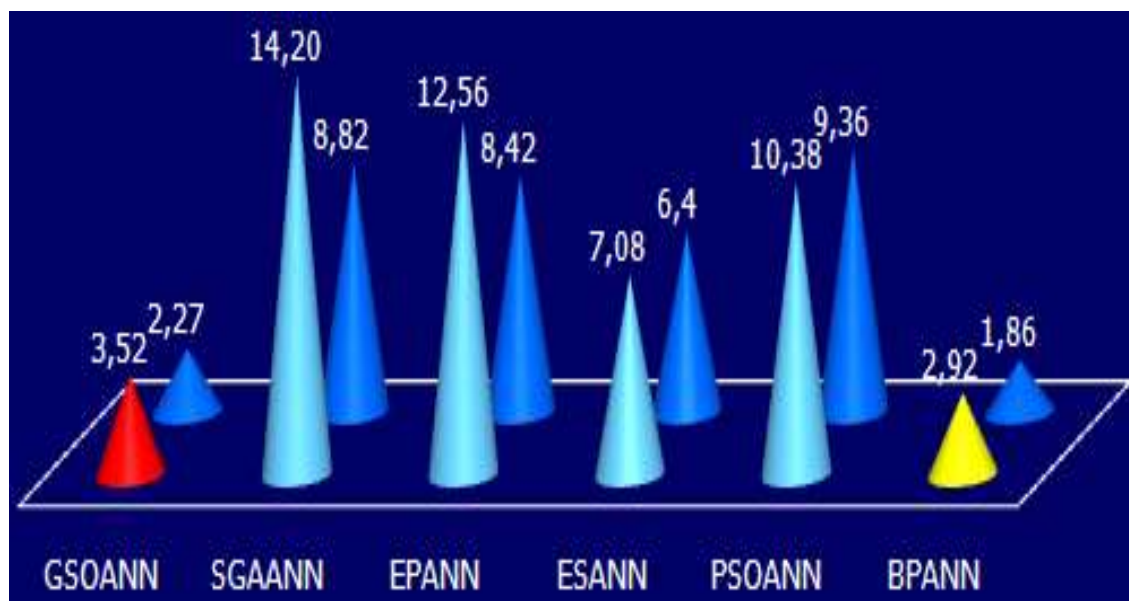
#### 4.6.1: Fisher Iris Dataset

Η σειρά δεδομένων για το κρίνο Fisher Iris είναι το πιο γνωστό πρόβλημα ταξινόμησης. Υπάρχουν τρία είδη: Setosa, Versicolour και Virginica. Η σειρά περιέχει μετρήσεις τεσσάρων χαρακτηριστικών 150 κρίνων, τα οποία είναι το μήκος και το πλάτος τόσο του φύλλου κάλυκα όσο και το πλάτος πετάλου άνθους. Από τα 150 πειράματα, τα 100 ορίστηκαν ως training set και τα υπόλοιπα 50 ως test set.



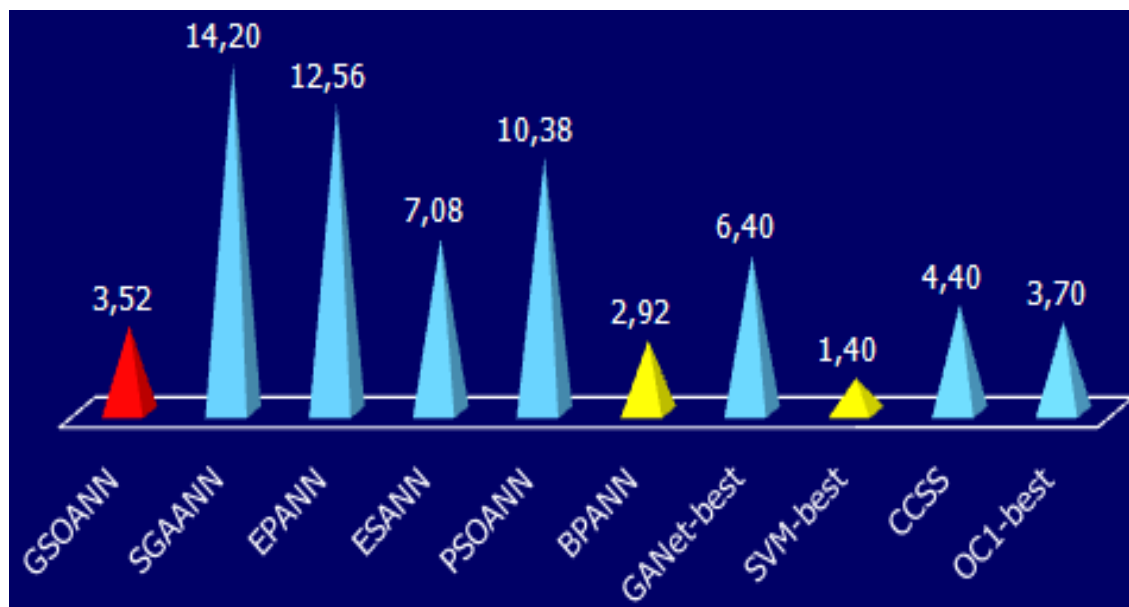
Σχήμα 4.18 Τρία είδη αγριόκρινου: Setosa, Versicolour, Virginica

Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του ρυθμού σφάλματος του GSOANN και συγκρίνεται με τα αντίστοιχα μεγέθη άλλων 5 εξελικτικών νευρωνικών δικτύων. Παρατηρείται ότι το GSOANN πέτυχε τον μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος και συνεπώς το καλύτερο μέσο αποτέλεσμα και υπερνικήθηκε ελαφρώς μόνο από το BPANN (SCG backpropagation trained ANN).



Σχήμα 4.19 Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ρυθμού σφάλματος.

Συγκρινόμενο (Γράφημα 4.20) με άλλα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα από τη διεθνή βιβλιογραφία, το GSOANN κατετάγη τρίτο.



Σχήμα 4.20 Μέσος ρυθμός σφάλματος.

#### 4.6.2: Wisconsin Breast Cancer Dataset



Η σειρά αυτή δεδομένων περιέχει εννέα χαρακτηριστικά (ακέραιοι δείκτες) για 699 περιστατικά (458 καλοήθη, 241 κακοήθη). Προκειμένου να εκπαιδευτεί ένα ANN να ταξινομεί έναν όγκο ως καλοήθη ή κακοήθη, το σύνολο αυτό των δεδομένων έχει διαχωριστεί σε τρία υποσύνολα:

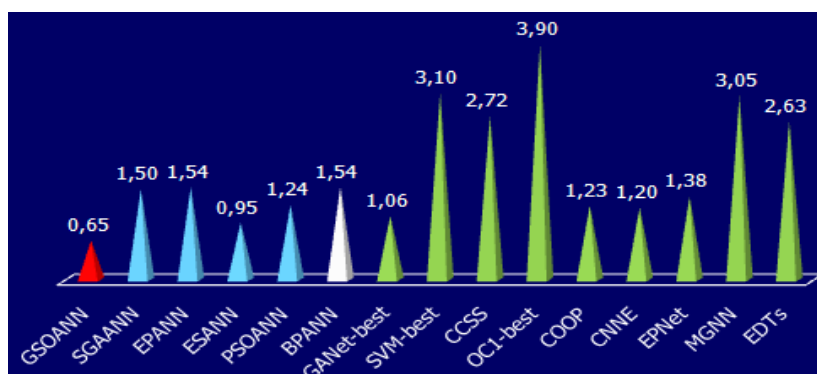
- ένα training set (349 περιστατικά)
- ένα validating set (175 περιστατικά)
- ένα test set (175 περιστατικά).

Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του ρυθμού σφάλματος του GSOANN και συγκρίνεται με τα αντίστοιχα μεγέθη άλλων 5 εξελικτικών νευρωνικών δικτύων. Παρατηρείται ότι το GSOANN πέτυχε τον μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος και συνεπώς το καλύτερο μέσο αποτέλεσμα. Αξίζει να τονιστεί ότι παρόλο που τα άλλα δίκτυα έδωσαν λογικά καλύτερα αποτελέσματα (για παράδειγμα testing error rate 0%), τα χειρότερα τους αποτελέσματα επιδείνωσαν σημαντικά τη συνολική τους απόδοση (για παράδειγμα τα χειρότερα αποτελέσματα που έδωσε το PSOANN ήταν 11,43%).



Σχήμα 4.21 Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ρυθμού σφάλματος.

Συγκρινόμενο (Γράφημα 31) με άλλα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα από τη διεθνή βιβλιογραφία, το GSOANN κατετάγη πρώτο.



Σχήμα 4.22 Μέσος ρυθμός σφάλματος.



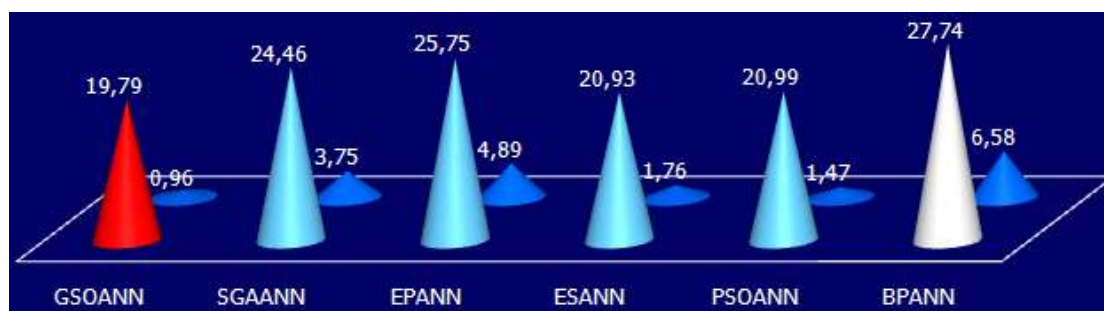
### 4.6.3: Pima Indian Diabetes Dataset



Το σύνολο αυτό δεδομένων περιέχει οκτώ χαρακτηριστικά (αριθμητικοί δείκτες) για 768 περιστατικά (500 με σημάδια διαβήτη, 241 χωρίς διαβήτη). Προκειμένου να εκπαιδευτεί ένα ANN να ταξινομεί έναν Ινδιάνο της φυλής Pima ως διαβητικό ή υγιή, το σύνολο αυτό των δεδομένων έχει διαχωριστεί σε τρία υποσύνολα:

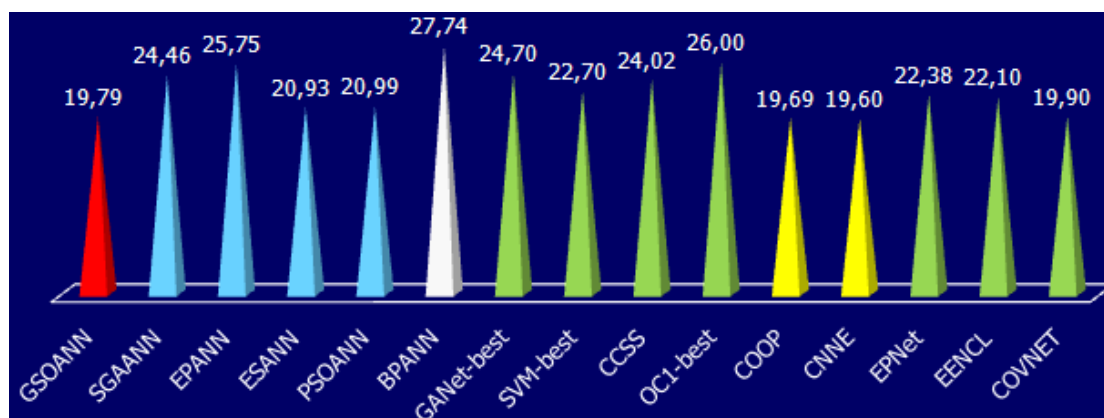
- ένα training set (384 περιστατικά)
- ένα validating set (192 περιστατικά)
- ένα test set (192 περιστατικά).

Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του ρυθμού σφάλματος του GSOANN και συγκρίνεται με τα αντίστοιχα μεγέθη άλλων 5 εξελικτικών νευρωνικών δικτύων. Παρατηρείται ότι το GSOANN πέτυχε τον μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος και συνεπώς το καλύτερο μέσο αποτέλεσμα. Αξίζει να τονιστεί ότι το πρόβλημα αυτό ταξινόμησης είναι από τα πλέον δύσκολα, καθώς είναι σχετικά μικρό και μολύνεται έντονα από θορύβους.



Σχήμα 4.23 Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ρυθμού σφάλματος.

Συγκρινόμενο (Γράφημα 33) με άλλα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα από τη διεθνή βιβλιογραφία, το GSOANN κατετάγη τρίτο.



Σχήμα 4.24 Μέσος ρυθμός σφάλματος.

## 4.8. Εφαρμογή στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο GSOANN (Group Search Optimizer Artificial Neural Network), το οποίο έχει εκπαιδευτεί με τον εξελικτικό και εμπνευσμένο από την φύση αλγόριθμο βελτιστοποίησης GSO (Group Search Optimizer), μπορεί να εφαρμοστεί προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα βελτιστοποίησης τεχνικών έργων. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα, σε αντίθεση με τις έως τώρα χρησιμοποιούμενες μεθόδους, είναι ότι το GSOANN μπορεί να επιλύσει πρόβλημα βελτιστοποίησης με περισσότερες της μία μεταβλητές παρουσιάζοντας τόσο αριθμητική ακρίβεια όσο και υπολογιστική αποδοτικότητα. Όπως έχει αποδειχθεί προηγουμένως, η απόδοση του GSOANN είναι το ίδιο υψηλή σε προβλήματα βελτιστοποίησης τόσο μίας όσο και 300 παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό, το συγκεκριμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να βελτιστοποιήσει μία σχέση που να συνδέει τόσο το συνολικό κόστος και τη συνολική διάρκεια του τεχνικού έργου όσο και παραμέτρους ποιότητας ή ακόμη και παραμέτρους οι οποίες συνδέονται με πόρους, χωρίς να μειωθεί η αριθμητική του ευρωστία και υπολογιστική αποδοτικότητα.

Σκοπός αυτού του νέου μοντέλου βελτιστοποίησης είναι να κάνει εφικτή την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση από την άποψη τριών σημαντικών κριτηρίων προγραμματισμού, που δεν έχει επιτευχθεί από παρόμοιες μεθόδους. Οι στόχοι του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση της διάρκειας του έργου, του κόστους και της μεταβολής της χρήσης των πόρων. Με σκοπό την ποσοτική επεξεργασία, διατυπώθηκαν ως αντικειμενικές συναρτήσεις οι ακόλουθες εξισώσεις.

$$\text{Total\_duration} = \sum_{i=1}^N D_i$$

$$\text{Additional\_Cost} = (d_1 \ d_2 \ d_3 \ \dots \ d_n) \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

$$\text{RLI} = \sum_{k=1}^m (w_k \cdot l_k)$$

$$l_k = \sum_{q=1}^T \left( \sum_{\text{all } i} |r_{ik} - \bar{r}_k| \right)$$

$$\bar{r}_k = \sum_{\text{all } i} (r_{ik} \cdot (d_{io} - d_i)) / T$$

Όπου,

- Total\_Duration είναι η μία αντικειμενική συνάρτηση που ισούται με το άθροισμα των διαρκειών που βρίσκονται στην κρίσιμη διαδρομή.



- $Additional\_Cost$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση που υπολογίζει το πρόσθετο κόστος έργου που προκαλείται από την εντατικοποίηση.
- $RLI$  είναι αντικειμενική συνάρτηση που δείχνει πώς η διάθεση των πόρων ενός έργου παρεκκλίνει από τον μέσο όρο χρήσης πόρων κατά τη διάρκεια του έργου.
- $d_{oi}$  είναι η αρχική διάρκεια της δραστηριότητας  $i$
- $d_i$  είναι οι μειωμένες διάρκειες από τις αρχικές διάρκειες δραστηριοτήτων έργου
- $d_{io}$  η αρχική διάρκεια της δραστηριότητας  $i$
- $c_i$  είναι το πρόσθετο κόστος ανά ημέρα εντατικοποίησης της δραστηριότητας  $i$
- $r_{ik}$  είναι η ημερήσια ανάγκη πόρων  $k$  για την δραστηριότητα  $i$
- $n$  είναι ο συνολικός αριθμός δραστηριοτήτων του έργου
- $m$  είναι ο αριθμός των πόρων
- $D_i$  είναι οι διάρκειες των κρίσιμων δραστηριοτήτων
- $N$  είναι ο αριθμός δραστηριοτήτων στην κρίσιμη διαδρομή
- $RLI$  είναι ο δείκτης εξισορρόπησης πόρων για εξισορρόπηση πολλαπλών πόρων

Οι τρεις αυτές αντικειμενικές συναρτήσεις ενσωματώνονται σε μία μοναδική φάση βελτιστοποίησης. Η επίλυση με GSOANN ακολουθεί τα ακόλουθα στάδια:

1. Δημιουργείται τυχαίος αρχικός πληθυσμός.
2. Στην πρώτη επανάληψη, ορίζεται τυχαία ένα μέλος ως παραγωγός (producer), το 20% των μελών ως περιφερόμενα (rangers) και το υπόλοιπο 80% ως παρασιτιστές (scroungers). Τα ποσοστά έχουν τεκμηριωθεί σε προηγούμενη ενότητα της παρουσίασης αυτής.
3. Κατά τη διάρκεια της επανάληψης αυτής, ο producer εκτελεί producing, οι scroungers εκτελούν scrounging και οι rangers εκτελούν ranging. Υπενθυμίζεται ότι η ύπαρξη των scroungers συνδράμει στην απόδραση από τον εγκλωβισμό του αλγορίθμου σε τοπικά ελάχιστα στις πρώτες επαναλήψεις, ενώ η ύπαρξη των πρωτοποριακών rangers (οι οποίοι αποτελούν καινοτομία του συγκεκριμένου αλγορίθμου GSO) συμβάλλουν στην απόδραση από τοπικά ελάχιστα καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης.

4. Στο τέλος της επανάληψης, πραγματοποιείται αξιολόγηση των μελών και του ζεύγους του κάθε μέλους. Στην περίπτωση που κάποιος scrounger ή ranger βρίσκεται σε θέση με καλύτερο ζεύγος των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων από την αντίστοιχη θέση στην οποία βρίσκεται ο producer, τότε μεταπίπτει σε producer στην επόμενη επανάληψη. Αυτό είναι δυνατόν διότι ο αλγόριθμος GSO (νέα πρόταση νοημοσύνης σμήνους) θεωρεί ότι όλα τα μέλη έχουν τα ίδια φαινομενικά χαρακτηριστικά.
5. Η βέλτιστη λύση της επανάληψης  $k$ , η οποία αποτελεί ζεύγος παραμέτρων (ίσων με τις διαστάσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης) συγκρίνεται με τη βέλτιστη λύση της αμέσως προηγούμενης επανάληψης  $k-1$ . Σε περίπτωση που ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης, ο αλγόριθμος τερματίζεται και αυτή είναι η βέλτιστη λύση και συγκεκριμένα ο βέλτιστος συνδυασμός κόστους, χρονικής διάρκειας, παραμέτρων ποιότητας και πόρων.
6. Σε περίπτωση που δεν συγκλίνει ο αλγόριθμος, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτή της διπλωματικής εργασίας μελετηθήκαν οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την επίτευξη μειωμένης διάρκειας κατασκευής του έργου σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση τη αύξησης του κέρδους, την τήρηση του καλύτερου δυνατού επιπέδου ποιότητας και την ομαλότερη δυνατή χρήση των πόρων.

Από αυτές μέθοδοι όπως ο συνεταιρισμός, η μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας και η μέθοδος Fast-track χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση του αρχικού προγραμματισμού του έργου. Αντίθετα η εντατικοποίηση των εργασιών με προσθήκη πόρων ή με αύξηση του βαθμού χρήσης των πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί και κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Η μέθοδος του συνεταιρισμού είναι μία τεχνική η οποία αφορά τις σχέσεις μεταξύ των συμβαλλομένων μερών και μέσω της επίτευξης ενός κλίματος εμπιστοσύνης και εξουδετέρωσης των αντιδικιών να αποφευχθούν οι τυχόν σχετικές καθυστερήσεις και τα αντίστοιχα επιπλέον έξοδα. Συνεπώς, η τεχνική αυτή συστήνεται σε κάθε έργο και να συνδυαστεί με όλες τις υπόλοιπες τεχνικές και μοντέλα βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος της Κρίσιμης Αλυσίδας είναι η μόνη που εξετάζει την διαθεσιμότητα των πόρων και παρέχει τον πιο εποπτικό τρόπο παρακολούθησης των εργασιών. Η μέθοδος fast-track ωστόσο, με την διαίρεση των καθηκόντων σε πακέτα εργασίας, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ξεχωριστών συμβάσεων ανά πακέτα εργασίας, ικανοποιώντας έτσι ενδιάμεσες προθεσμίες πριν την τελική παράδοση του έργου.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους κίνδυνους που ελλοχεύουν στην εφαρμογή κάποιων μεθόδων. Η μέθοδος Crashing απαιτεί πρόσθετο κόστος επιτάχυνσης, πράγμα που δεν συμβαίνει με τη μέθοδο του Συνεταιρισμού και της Κρίσιμης Αλυσίδας. Επίσης, κίνδυνος αναπάντεχων κοστών υπάρχει στη μέθοδο Fast-Track. Απαιτείται ενδελεχής και προσεκτικός σχεδιασμός προκειμένου να διασφαλιστεί η αποφυγή λαθών και αλλαγών καθώς και άμεση αντιμετώπιση αυτών εάν τελικά αυτές εμφανιστούν.

Τέλος, και στις δύο αυτές μεθόδους υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης αναπάντεχων καθυστερήσεων. Στη μέθοδο Fast-track, αυτές οφείλονται σε πιθανές αλλαγές που μπορεί να εμφανιστούν και είναι δύσκολο να αντιμετωπισθούν άμεσα λόγω της παράλληλης διεξαγωγής εργασιών. Στη μέθοδο Crashing, οι καθυστερήσεις προέρχονται λόγω απειρίας των νέων πόρων, αλλά και λόγω πιθανή εξάντλησης του προσωπικού στην περίπτωση εφαρμογής υπερωριακής εργασίας. Ιδιαίτερη προσοχή επομένως χρειάζεται στην εφαρμογή και αυτής της μεθόδου.

Πέρα από τις παραπάνω τεχνικές, για τον ακριβή προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού χρόνου και κόστους αναπτύχθηκαν μοντέλα Γραμμικού Προγραμματισμού τα οποία μπορούν αν περιγράψουν με ακρίβεια τις σχέσεις απαιτούν εκτενή διατύπωση και αυξημένο υπολογιστικό φόρτο.

Τέλος, αξιολογείται η μέθοδος βελτιστοποίησης με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Η μέθοδος αυτή συγκεντρώνει το μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται για τελευταίας τεχνολογίας μαθηματικά εργαλεία τα οποία προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και δυνατότητα προσομοίωσης πολλών παραγόντων που επηρεάζουν την κατασκευή. Οι συνηθέστεροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές Διαχείρισης Τεχνικών Έργων είναι η βελτιστοποίηση με Αποκίες Μυρμηγκιών και βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων οι οποίες δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε επίλυση προβλημάτων εύρεσης βέλτιστη διάρκειας και κόστους κατασκευής συνδυάζοντας μάλιστα παράγοντες όπως η χρήση των πόρων και η ποιότητα. Ωστόσο ένας νέος αλγόριθμος βελτιστοποίησης εμφανίστηκε τα τελευταία χρόνια.

Ο GSO αποτελεί έναν καινοτόμο αλγόριθμο βελτιστοποίησης (μία νέα πρόταση νοημοσύνης σμήνους), ο οποίος βασίστηκε στη συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων και στη θεωρία του ομαδικού βίου. Είναι εννοιολογικά απλός και εύκολος στην εφαρμογή. Παρέχει ένα ανοικτό πλαίσιο για την αξιοποίηση της έρευνας της συμπεριφοράς των ζώων προκειμένου να αντιμετωπιστούν δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης. Έπειτα από δισεκατομμύρια χρόνια φυσικής εξέλιξης, η συμπεριφορά αναζήτησης των ζώων έχει βελτιστοποιηθεί και παρέχει πολλές στρατηγικές αναζήτησης, οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν στον GSO. Θα μπορούσε, επίσης, να συνεισφέρει αντίστροφα στην έρευνα της συμπεριφοράς των ζώων παρέχοντας νέες ιδέες στα μοντέλα ομαδικής αναζήτησης. Για παράδειγμα, η εισαγωγή των rangers στο μοντέλο PS ίσως θέσει πολλά ενδιαφέροντα ερωτήματα παρακινώντας τους βιολόγους να τα διερευνήσουν.

Έπειτα από επεξεργασία των δημοσιευθέντων σε διάφορα papers αποτελεσμάτων (He et al), η συγκεκριμένη εργασία έχει παρουσιάζει και εξηγήσει μέσα από μία πλειάδα σχημάτων και γραφημάτων ότι συγκρινόμενος με άλλους εξελικτικούς αλγόριθμους, ο GSO έχει καλύτερη απόδοση αναζήτησης για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών (multimodal) και παρόμοια για συναρτήσεις μίας μεταβλητής (unimodal). Ειδικότερα, ένα σύνολο 23 συναρτήσεων χρησιμοποιήθηκε (He et al) προκειμένου να ελεγχθεί ο GSO σε σχέση με τους GA, PSO, CEP, FEP, CES, FES. Για τις unimodal, ο GSO δεν έχει προφανές πλεονέκτημα έναντι του PSO, εμφανίζει μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα σύγκλισης σε σχέση με τον GA, ενώ υπερνικήθηκε μόνο από τους FEP, FES. Για τις περισσότερες από τις multimodal συναρτήσεις τόσο με λίγα όσο και με πολλά τοπικά ελάχιστα, είναι ικανός στο να παράγει στατιστικά καλύτερα μέσα αποτελέσματα σε σύγκριση με τους άλλους 6 αλγόριθμους. Επίσης, ο GSO αποδίδει καλύτερα σε ένα σύνολο multimodal συναρτήσεων 300 διαστάσεων. Τέλος, διαπιστώθηκε (γραφήματα Excel Βάσει των δημοσιευθέντων αποτελεσμάτων) ότι δεν είναι ευαίσθητος στις παραμέτρους ελέγχου εκτός από το ποσοστό των rangers, γεγονός το οποίο δείχνει την ευρωστία του.

Ανάλογα διαγράμματα Excel πραγματοποιήθηκαν και με βάση τα δημοσιευθέντα αποτελέσματα από δύο papers των He et al. Οι δημοσιεύσεις αυτές αναφέρονται στην εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων τόσο με τον GSO όσο και με τους υπόλοιπους αλγόριθμους και την εφαρμογή τους σε τρία πραγματικά προβλήματα βελτιστοποίησης, το ένα από τον χώρο της γεωπονίας και τα άλλα δύο από τον χώρο

της ιατρικής. Από τα γραφήματα αυτά είναι εμφανής η υπεροχή εκείνου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου το οποίο έχει εκπαιδευτεί με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Η καλή απόδοση του GSO τόσο σε benchmark functions όσο και σε πραγματικά προβλήματα με οδήγησε στο να προτείνω την εφαρμογή του σε προβλήματα βελτιστοποίησης τεχνικών έργων. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους, ο GSO, καθώς χρησιμοποιεί τελευταίας τεχνολογίας μαθηματικά εργαλεία, είναι εξαιρετικά πιο αποδοτικός. Αυτό σημαίνει ότι βρίσκει με μεγάλη ακρίβεια και μεγάλη ταχύτητα τον βέλτιστο συνδυασμό των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων (κόστος, χρόνος, ποιότητα, πόροι).

## Βιβλιογραφία

1. Abdallah H., Emara H. M., Dorrah H. T., Bahgat A. [2009] Using Ant Colony Optimization algorithm for solving project management problems // Expert Systems with Applications. -. - Τόμ. 36.
2. Babu A. J. G. και Suresh N. [1996] Project management with time, cost, and quality considerations // Journal of Operation Research. -. - 2 : Τόμ. 88.
3. Chan A. P. C., Chan D.W.M., Chiang Y.H., Tang B.S., Chan Edwin H.W. [2004] Exploring Critical Success Factors for partnering on Construction Projects // Journal of construction engineering and management. -. - 2 : Τόμ. 130.
4. Chen T. T. [2010]. Partnerships among different participants in construction industry of Taiwan: Critical success and Failure factors - [s.l.] : Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2010 IEEE 17Th International Conference on,.
5. Cheng E. W. L. και Li H. [2002] Construction Partnering Process and Associated Critical Success Factors: Quantitative Investigation // Journal of management in engineering. -. - 4 : Τόμ. 18.
6. Cheng E. W. L., Heng L. και Love P.E.D. [2000] Establishment of Critical Success Factors for Construction Partnering// Journal of management in engineering. -. - 2 : Τόμ. 16.
7. Cho K., Hyun C., Koo K., Hong T. [2010] Partnering process model for public-sector Fast-Track Design-Build projects in Korea // Journal of management in engineering. -. - 1 : Τόμ. 26.
8. Fazio P., Moselhi O., Theberge P., Revay S. [1988] Design impact of construction fast - track // Construction Management and Economics. -. - 3 : Τόμ. 6.
9. Gray C. F. και Larson E. W. [2008] Reducing project duration - <http://higher.mcgraw-hill.com>.
10. Harris R. και Ioannou P. [1998]. Repetitive scheduling method - [s.l.] : University of Michigan, UMCEE report,.
11. Hassanein A. και Moselhi O. [2005] Accelerating linear projects // Construction Management and Economics. -. - 4 : Τόμ. 23.
12. Hastak M., Gokhale S., Goyani K., Safi B., Hong T. [2008] Analysis of Techniques Leading to Radical Reduction in Project Cycle Time // Journal of construction engineering and management. -. - 12 : Τόμ. 134.

13. He S., Wu Q. και Saunders J. R. [2006] A Novel Group Search Optimizer Inspired by Animal Behavioural // IEEE Congress on Evolutionary Computation. - Vancouver : [s.n.],.
14. He S., Wu Q. και Saunders J. R. [2009] Group Search Optimizer: An Optimization Algorithm by Animal Searching Behavior // Transactions on Evolutionary Computation. - - 5 : Τόμ. 13.
15. Huang J. W., Zhou Y. H. και Wang X. X. [2010,A], An application of Time-Cost Trade-off for Construction Projects. - [s.l.] : Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Advanced Management Science,.
16. Huang J. W., Zhou Y. H. και Wang X. X. [2010,B], Research on Duration-Cost-Quality Model under Uncertainty in Construction Project Management. - [s.l.] : Management and Service Science (MASS), 2010 International Conference on,.
17. Huang J. W., Zhou Y. H. και Wang X. X. [2008,Γ], Research on Time-Cost Optimization Model of Construction Projects. - [s.l.] : 2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008,.
18. Jarboui B., Damak N., Siarry P., Rebai A. [2008] A combinatorial particle swarm optimization for solving // Applied Mathematics and Computation. - - Τόμ. 195.
19. Kerzner H. [2003] Project Management-A systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling - John Wiley and Sons, Inc.
20. Khalaf W. S., Leon W.J., Mohd R., Lee S. [2010] A Linear Programming Approach to maximize savings by stretching Noncritical activities // Australian Journal of Basic and Applied sciences. - - 11 : Τόμ. 4.
21. Lee E.B., Harvey J. T. και Thomas D. [2005] Integrated Design/Construction/Operations Analysis for Fast-Track Urban Freeway Reconstruction // Journal of construction engineering and management. - - 12 : Τόμ. 131.
22. Lee E.B., Hojung L. και Ibbs C. W. [2007] Productivity Aspects of Urban Freeway Rehabilitation with Accelerated Construction // Journal of construction engineering and management. - 10 : Τόμ. 133.
23. Lee S., Park M. και Pena-Mora F. [2006] Reliability and stability Buffering Approach:Focusing on the Issues of Errors and Changes in Concurrent Design and Construction Projects // Journal of construction engineering and management. - - 5 : Τόμ. 132.
24. Li H. και Wang Z. [2009] Applying Self-adaptive Ant Colony Optimization // 2009 International Conference on Management Science & Engineering (16th). - Μόσχα : [s.n.],.

25. Li H., Love P.E.D. και Drew D. S. [2000] Effects of overtime work and additional resources on project cost and quality // Engineering, Construction and Architectural Management. - 3 : Τόμ. 7.
26. Liu S. και Shih K. [2009] A framework of critical resource chain for project schedule analysis // Construction Management and Economics. -. - 9 : Τόμ. 27.
27. Merkle D., Middendorf M. και Shmeck H. [2002] Ant Colony Optimization for Resource-Constrained // Transactions on Evolutionary Computation.. - 4 : Τόμ. 6.
28. Mokhtari H., Kazemzadeh R. B. και Salmasnia A. [2011] Time-Cost Tradeoff Analysis in Project Management: // Transaction in Engineering Methods. -. - 1 : Τόμ. 58.
29. Myint Y. M. και Khang D. B. [1999] Time, cost and quality trade-off in project management: a case study // International Journal of Project Management. -. - 4 : Τόμ. 17.
30. Raz T., Barnes R. και Dov D. [2003] A critical look at Critical Chain Project Management // Project Management Journal. -. - 4 : Τόμ. 34.
31. Sakellaropoulos S. και Chassiakos A. P. [2004] Project time–cost analysis under generalised precedence relations// Advances in Engineering Software. -. - 35.
32. Shou Y. και Yeo K. T. [2000]. Estimation of project buffers in critical chain project management- [s.l.]: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology - ICMIT 2000,.
33. Singh A. [2003] Accelerated work-schedule design considering efficiency losses for overtime and overmanning // Engineering, Construction and Architectural Management. -. - 5 : Τόμ. 10.
34. Wuliang P. και Chengen W. [2009] A multi-mode resource-constrained discrete time–cost tradeoff problem and its genetic algorithm based solution // International Journal of Project Management. -. - Τόμ. 27.
35. Xing N. και Wang L. [2009] Construction Quality-Cost Trade-off using the Pareto-based Ant Colony Optimization Algorithm// International Conference on Management and Service Science, 2009.pp 1-4
36. Zhang H. και Heng L. [2010] Multi-objective particle swarm optimization for construction time-cost tradeoff problems // Construction Management and Economics. - 1 : Τόμ. 28.
37. Zhang H., Li H. και Tam C. [2006] Particle swarm optimization for resource-constrained // International Journal of Project Management. -. - Τόμ. 24.



38. Zhao Z. Y., Lv Q. L. και You W. Y. [2007] System dynamic model applying on analysis of impact of schedule pressure on project. - [s.l.] : Proceedings - Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2007,.
39. Δαγαράκης Ε. [2010] Ανάλυση κυριότερων αιτιών χρονικών καθυστερήσεων στα Ελληνικά τεχνικά έργα και προτάσεις για την αντιμετώπιση τους. - [s.l.] : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
40. Εφραιμίδης Χ.Ι. [2001] Διαχείριση Κατασκευών. - [s.l.] : Τυπογραφείο Συμμετρία,.
41. Καλλαντζής Α. και Λαμπρόπουλος Σ. [2005] Επιτάχυνση Γραμμικών Έργων χωρίς Αύξηση του Βαθμού Χρήσης των Μέσων Παραγωγής // Τεχνικά Χρονικά. -. - 1.
42. Κολέτσος Ι. [2006,A], Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα - Ακέραιος Προγραμματισμός. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,.
43. Κολέτσος Ι. [2006,B] Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα - Γραμμικός Προγραμματισμός. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,.
44. Μπότσαρης Χ. Ε., Τσαντάς Ν. και Γεωργίου Α. Κ. [2004] Σημειώσεις Γραμμικού Προγραμματισμού. - [s.l.] : Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,.
45. Παντουβάκης Π.Μ [2003] Σημειώσεις Διαχείρισης Τεχνικών Έργων-τεύχος Α'. - [s.l.] : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,.