ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ»

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΚΑΤΣΙΓΙΝΗΣ

ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ – ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΟΛΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2005

Στη μνήμη του πατέρα μου
και στη μητέρα μου

Τίτλος: «Προγραμματισμός αναγκών προσωπικού σε παραγωγικές μονάδες»

Σημαντικοί Όροι: Προγραμματισμός, Υπερωρία, Εργατικό Δυναμικό, Παραγωγή, Κόστος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ (Abstract)

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο προγραμματισμός αναγκών προσωπικού σε παραγωγικές μονάδες. Μετά από μια γενική ανασκόπηση των λιγοστών μοντέλων προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, επιλέχθηκε και μελετήθηκε σε βάθος ένα από αυτά και συγκεκριμένα ένα μοντέλο για τον Οικονομικό Προγραμματισμό Βαρδιών (Εργασίας) με Υπερωρίες (Economic Manpower Shift Planning with Overtime ή EMSP-O). Το μοντέλο αυτό επιδιώκει τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού και των υπερωριών σε κάθε διαθέσιμη βάρδια κάθε εργάσιμης ημέρας, με σκοπό την εκπλήρωση των στόχων της παραγωγής στα πλαίσια ενός δεδομένου χρονικού ορίζοντα με ελάχιστο κόστος. Το βασικό συμπέρασμα από τη μελέτη του μοντέλου αυτού είναι ότι η αποτελεσματική χρήση της υπερωρίας οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις του συνολικού κόστους του εργατικού δυναμικού. Με βάση μια σειρά αποδεδειγμένων ιδιοτήτων, προέκυψαν ορισμένες, εντελώς νέες, πρακτικές πολιτικές προγραμματισμού προσωπικού και οι συνθήκες υπό τις οποίες κάθε μία από αυτές είναι βέλτιστη (Conditions for Optimality). Τέλος, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και ορισμένοι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού του συνολικού κόστους, καθιστώντας λιγότερο επιτακτική στο μέλλον τη χρήση προγραμμάτων βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα παρέχονται κατευθύνσεις για την δημιουργία βελτιωμένων αλγορίθμων καθώς και γενικότερες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς κ. Λαγοδήμο Αθανάσιο και εκπονήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Μεταπτυχιακού Προγράμματος στη Διοίκηση Επιχειρήσεων – Διοίκηση Ολικής Ποιότητας του Πανεπιστημίου Πειραιώς κατά την διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2004-2005.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον κύριο Λαγοδήμο Αθανάσιο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για την ανάθεση του ενδιαφέροντος θέματος, την δυναμική καθοδήγηση και την υπερπολύτιμη βοήθειά του, με πλήθος εύστοχων παρατηρήσεων, υποδείξεων και ιδεών, σε κάθε φάση της εκπόνησης της εργασίας.
- Τον κύριο Μιχιώτη Αθανάσιο, Επίκουρο Καθηγητή του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, για τις χρήσιμες συμβουλές του και τη σημαντική βοήθειά του κατά την διάρκεια της συνολικής μελέτης του θέματος, αλλά και σε βιβλιογραφικά θέματα. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την προθυμία του, τη συνεργασία και την άμεση και συνεχή επικοινωνία.
- Τον κύριο Παραβάντη Ιωάννη, Λέκτορα του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για την ευγενή παραχώρηση των απαιτούμενων προγραμμάτων Η/Υ για τη μελέτη του θέματος.
- Τους συμφοιτητές μου από το Πανεπιστήμιο Πειραιώς και ιδιαίτερα τους φίλους και συναδέλφους μου από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, που συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.
- Την οικογένειά μου, για την ηθική τους συμπαράσταση και όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια και μου έδωσαν δύναμη. Χωρίς αυτούς θα ήταν σίγουρα αδύνατη η περάτωση και των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2005

Εμμανουήλ Δ. Κατσιγίνης

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε κατά την διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2004-2005, στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Μεταπτυχιακού Προγράμματος στη Διοίκηση Επιχειρήσεων – Διοίκηση Ολικής Ποιότητας του Τμήματος Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Στόχος της είναι να μελετηθεί και να αναλυθεί σε βάθος ένα πρόβλημα, που αντιμετωπίζουν σχεδόν όλες οι βιομηχανίες, το πρόβλημα του προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού. Αν και στο παρελθόν έχουν γίνει ορισμένες προσπάθειες για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος σε χώρους εκτός της βιομηχανίας, ειδικά για το βιομηχανικό κλάδο ανάλογες μελέτες υπάρχουν λίγες και ακόμα λιγότερα εργαλεία προγραμματισμού. Αυτό το κενό φιλοδοξεί να καλύψει όσο το δυνατόν καλύτερα η παρούσα εργασία.

Η εργασία αυτή προχωρά πέρα από μια απλή βιβλιογραφική ανασκόπηση ορισμένων μοντέλων προγραμματισμού προσωπικού στη βιομηχανία, μια σύντομη παράθεση σύγχρονων και παλαιών προσεγγίσεων, μοντέλων και πρακτικών. Αποτελεί μια δυναμική έρευνα, που εξελίχτηκε ανάλογα με τα ενδιαφέροντα ευρήματά της, και μπορεί να εξελιχτεί περαιτέρω. Συνιστά δε την καλύτερη απόδειξη ότι στην έρευνα δεν απαιτούνται πάντα πολύπλοκες προσεγγίσεις ή προχωρημένα μαθηματικά μοντέλα. Η λογική σκέψη αρκεί και έχει τη δύναμη να αποκαλύψει τη λύση διαφόρων προβλημάτων, όπως αυτό που διαπραγματεύεται αυτή η εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί το κλασικό πρόβλημα του προγραμματισμού του προσωπικού σε βάρδιες, το πλέον δύσκολο και συνηθισμένο πρόβλημα και το οποίο συναντάται σχεδόν σε κάθε βιομηχανία ανεξαρτήτως μεγέθους. Εδώ και πολλά χρόνια, το πρόβλημα αυτό αποτελεί πονοκέφαλο για τους διευθυντές παραγωγής και τους υπευθύνους προγραμματισμού: πόσα άτομα, ποιες ημέρες και σε πόσες βάρδιες πρέπει να εργαστούν, ώστε να επιτευχθούν πλήρως οι στόχοι παραγωγής. Εντούτοις, όπως αναφέρουν πολλοί συγγραφείς που ασχολήθηκαν και ασχολούνται με το συγκεκριμένο ζήτημα, η βιβλιογραφία είναι φτωχή σε πρακτικές εφαρμογές και προσπάθειες επίλυσής του, ειδικά για το βιομηχανικό τομέα. Αντίθετα υπάρχει πληθώρα άρθρων, εργασιών και εκτενών μελετών που καλύπτουν κάποια θέματα προγραμματισμού υπό ένα διαφορετικό πρίσμα ή για τομείς πέραν της βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθεί το πολύπλοκο πρόβλημα του Οικονομικού Προγραμματισμού Βαρδιών (Εργασίας) με Υπερωρίες (Economic Manpower Shift Planning with Overtime ή EMSP-O), ένας όρος που εισήγαγαν πρώτοι οι Lagodimos and Mihiotis το 2004. Το εν λόγω πρόβλημα αποτελεί φυσική και λογική εξέλιξη, αρχικά της εργασίας των ερευνητών Lagodimos and Leopoulos το 2000 και στη συνέχεια των Lagodimos and Paravantis το 2003. Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να μελετήσει περαιτέρω το πρόβλημα EMSP-O, να αναλύσει τη μορφή και τη δομή του, όπως αυτό διατυπώθηκε από τους συγγραφείς Lagodimos and Mihiotis (2004), και να ερευνήσει ιδιαίτερα και πιο ενδελεχώς τη μορφή των λύσεων που προτείνονται και αν αυτές οι λύσεις παρουσιάζουν κάποιες γενικές ιδιότητες.

Θα ερευνηθούν επίσης οι συνθήκες που καθορίζουν πότε οι λύσεις των πολιτικών NOV και FOV, οι οποίες προκύπτουν από έναν ευρετικό αλγόριθμο (heuristic), που ανέπτυξαν οι παραπάνω συγγραφείς Lagodimos and Mihiotis (2004), είναι βέλτιστες σε σχέση με μια γνωστή βέλτιστη λύση (OPTimal), η οποία προκύπτει από την εφαρμογή ενός μοντέλου σε ένα γνωστό πρόγραμμα βελτιστοποίησης.

Τα οφέλη, που προκύπτουν από τον επιτυχή προγραμματισμό και γενικά την επιτυχημένη διοίκηση του εργατικού δυναμικού σε μια βιομηχανία είναι αναμφισβήτητα πολλά. Σύμφωνα με πολλούς συγγραφείς, για παράδειγμα τους Croci et al. (2000), έχει αποδειχτεί πλέον ότι το εργατικό δυναμικό είναι μια σημαντικότατη παράμετρος προγραμματισμού, η οποία πρέπει να βρίσκεται πάντα υπό έλεγχο. Ακόμα και αν πρόκειται για περιβάλλοντα της βιομηχανίας, όπου οι εργάτες απασχολούνται σε δευτερεύουσες ή υποστηρικτικές εργασίες και όχι τις κύριες παραγωγικές. Ο Γενικός Προγραμματισμός (Aggregate Planning), ως όρος εμφανίστηκε αρχικά στην βιβλιογραφία σχεδόν πριν πενήντα χρόνια (Buxey, 1995). Έκτοτε αναπτύχθηκαν πολλά μοντέλα γενικού προγραμματισμού με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής. Εντούτοις, οι άμεσα εμπλεκόμενοι με τη βιομηχανία από ό,τι φαίνεται αγνοούν τις επαναλαμβανόμενες κρούσεις και τα αναμφισβήτητα συμπεράσματα των μελετητών για τη χρησιμότητα πολλών διαθέσιμων αλγορίθμων, που αν εφαρμοστούν μπορούν να οδηγήσουν σε εκπληκτικές μειώσεις του κόστους παραγωγής.

Πέραν των σημαντικών οικονομικών οφελών, ο σωστός προγραμματισμός του εργατικού δυναμικού μπορεί να έχει και άλλου είδους πλεονεκτήματα, όπως την αύξηση της ικανοποίησης των εργαζομένων, τη βελτιωμένη συνεργασία μεταξύ των εργαζομένων, την άνοδο της απόδοσής τους, την κατακόρυφη αύξηση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος, την εξάλειψη λαθών και ελαττωματικών προϊόντων και άλλα πολλά. Τα εν λόγω πλεονεκτήματα οδηγούν με τη σειρά τους, αλυσιδωτά, σε ένα πλήθος άλλων πλεονεκτημάτων, όπως η αύξηση της ικανοποίησης του τελικού πελάτη, η βελτίωση της εικόνας της επιχείρησης, η προσέλκυση νέων πελατών και η διατήρηση των παλαιών, η ανάπτυξη της επιχείρησης, η αύξηση των κερδών, η βελτίωση της ανταγωνιστικότητάς της και πάρα πολλά ακόμη. Υπό αυτό το πρίσμα, θα ήταν μυωπικό να ισχυριστεί κάποιος ότι ο προγραμματισμός του εργατικού δυναμικού είναι ένα θέμα περιορισμένης σημασίας και χρησιμότητας και θα πρέπει να απασχολεί μόνο τους διευθυντές παραγωγής και τους αρμόδιους για τον προγραμματισμό.

Μία από τις τρεις αρχές της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας είναι η διαρκής βελτίωση. Σύμφωνα με τους Dahlgaard, Kristensen and Kanji (1998), τους συγγραφείς του βιβλίου «Fundamentals of Total Quality Management», η διαρκής βελτίωση (continuous improvement) αποτελεί αναπόσπαστο κρίκο μιας αλυσίδας. Σύμφωνα με αυτόν την αλυσίδα, που περιγράφει ουσιαστικά την ουσία της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας, η διαρκής βελτίωση οδηγεί σε εσωτερικές βελτιώσεις, δηλαδή εντός της επιχείρησης, και εξωτερικές βελτιώσεις, δηλαδή εκτός της επιχείρησης. Οι εσωτερικές βελτιώσεις περιλαμβάνουν για παράδειγμα, την καλύτερη χρήση των πόρων και την δημιουργία πιο αποδοτικών διεργασιών. Το άμεσο αποτέλεσμά τους είναι να πραγματοποιούνται λιγότερα λάθη και να μειώνονται οι λανθασμένες ενέργειες, γεγονότα που οδηγούν στη μείωση του κόστους και τελικά, σε βελτιωμένα κέρδη. Οι εξωτερικές βελτιώσεις, όπως η καλύτερη ποιότητα των προϊόντων και η καλύτερη εξυπηρέτηση του πελάτη, οδηγούν σε αύξηση της ικανοποίησης των πελατών, στη συνέχεια σε αύξηση του μεριδίου στην αγορά και τέλος, σε αυξημένη κερδοφορία.

Ο αέναος κύκλος, που οι παραπάνω συγγραφείς (Dahlgaard, Kristensen and Kanji, 1998) ονόμασαν «κύκλο βελτίωσης» (improvement loop) έχει την ίδια λογική. Η βελτιωμένη εσωτερική δομή της επιχείρησης οδηγεί σταδιακά, εκτός των άλλων, στη βελτίωση των οικονομικών αποτελεσμάτων της επιχείρησης. Με βάση τα παραπάνω, είναι εμφανής η σχέση του προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού με τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας και η τεράστια σημασία αυτού του πολύτιμου εργαλείου για το μέλλον μιας βιομηχανικής μονάδας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να αποτελέσει ένα παραπάνω βήμα στην μελέτη του πολύ σημαντικού προβλήματος του προγραμματισμού προσωπικού στη βιομηχανία. Η εργασία των Lagodimos and Mihiotis (2004) αποτελεί μια πολύ καλή αφετηρία. Δεδομένου ότι η επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού εργατικού δυναμικού σε βάρδιες με υπερωρία είναι πολύ χρονοβόρα, στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα των παραπάνω συγγραφέων αποτελούν δεδομένα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, και πιο συγκεκριμένα το συνολικό κόστος και την αναλυτική δομή της λύσης για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού, θα ερευνηθούν οι λογικές σχέσεις που συνδέουν τα διάφορα μεγέθη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1. Το Πρόβλημα του Προγραμματισμού Εργατικού Δυναμικού

Το εργατικό δυναμικό αποτελεί τον πιο κρίσιμο πόρο οποιασδήποτε επιχείρησης, αφού καθορίζει απόλυτα την δυνατότητά της να παραδώσει έγκαιρα τα προϊόντα της στον πελάτη. Ένας από τους λόγους για το παραπάνω γεγονός είναι ότι το εργατικό δυναμικό επηρεάζει άμεσα τη διαθέσιμη παραγωγική ικανότητα. Επομένως, η παραγωγική εκμετάλλευση (utilisation) του εργατικού δυναμικού προϋποθέτει την επίλυση διαφόρων προβλημάτων προγραμματισμού.

Οι Abernathy et al. (1973) και στη συνέχεια οι Siferd and Benton (1992) και οι Campbell and Diaby (2002) πρότειναν ένα χρήσιμο ιεραρχικό πλαίσιο τριών επιπέδων για την κατηγοριοποίηση των προβλημάτων προγραμματισμού προσωπικού: προγραμματισμός (planning) (προσδιορισμός των γενικών αναγκών σε εργατικό δυναμικό), χρονοπρογραμματισμός (scheduling) (κατανομή του διαθέσιμου εργατικού δυναμικού χρονικά) και κατανομή (allocation) (κατανομή εργατών σε συγκεκριμένες δραστηριότητες). Τα προβλήματα κατανομής περιλαμβάνουν την αντιστοίχηση προσωπικών δεξιοτήτων με προδιαγραφές εργασίας (βλέπε Trivedi and Warner, 1976 και Campbell, 1999). Το παραπάνω πλαίσιο θα εξεταστεί σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα, την παροχή υπηρεσιών και την παραγωγή προϊόντων.

Στις υπηρεσίες, η παραγωγή (δηλαδή η παροχή υπηρεσιών) πραγματοποιείται με άμεση επαφή με τον πελάτη. Λαμβάνοντας υπόψη μια επιχείρηση παροχής υπηρεσιών, οι πελάτες καταθέτουν μια απαίτησή τους σε προκαθορισμένα σημεία υπηρεσιών (όπως για παράδειγμα στα γκισέ των τραπεζών ή μέσω τηλεφώνου σε τηλεφωνητές και τηλεφωνήτριες), όπου παρέχεται η υπηρεσία. Αν και τα σημεία παροχής υπηρεσιών έχουν ένα σταθερό αριθμό επάνδρωσης με προσωπικό (manning), ο αριθμός των σημείων παροχής υπηρεσιών, που λειτουργούν ταυτόχρονα οποιαδήποτε στιγμή εξαρτάται από την αναμενόμενη ζήτηση. Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική παραγωγική εκμετάλλευση του εργατικού δυναμικού, οι επιχειρήσεις παροχής υπηρεσιών εντάσσουν και χρησιμοποιούν το προσωπικό τους στις αποκαλούμενες ευέλικτες βάρδιες. Πρόκειται για μορφές χρονικού προγραμματισμού, όπου διανέμονται αποτελεσματικά οι ώρες απασχόλησης κατά την διάρκεια της εργάσιμης ημέρας, διατηρώντας μια δεδομένη διάρκεια για κάθε βάρδια (συνήθως οκτώ ώρες ανά εργάσιμη ημέρα). Ως εκ τούτου, το σημαντικότερο πρόβλημα προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού στα περιβάλλοντα παροχής υπηρεσιών αφορά στον προσδιορισμό του προσωπικού που θα διοριστεί στις διάφορες ευέλικτες βάρδιες, ώστε να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία όλων των σημείων παροχής υπηρεσιών, βελτιστοποιώντας παράλληλα κάποιο μέτρο απόδοσης (συνήθως το κόστος του εργατικού δυναμικού).

Για πάνω από πενήντα χρόνια αυτό το πρόβλημα, γνωστό ως πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού βαρδιών (daily (shift) and weekly (tour) scheduling), αποτελεί στόχο εκτενούς έρευνας, της οποίας τα αποτελέσματα συνοψίζονται συχνά σε αναλυτικές αναθεωρήσεις. Από το 1954 και την πρώτη δημοσιευμένη εργασία από τον Dantzig (1954), υπάρχουν άφθονες έρευνες σχετικές με τα προβλήματα προγραμματισμού προσωπικού. Το παραδοσιακό παράδειγμα ενός τέτοιου προβλήματος έχει σχέση αρχικά με τον προσδιορισμό του εργατικού δυναμικού που πρέπει να κατανεμηθεί ανάλογα με το εκάστοτε χρονοδιάγραμμα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος εργασίας, ενώ παράλληλα να ικανοποιούνται οι δεδομένες απαιτήσεις εργασίας σε κάθε περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού. Στη γενικότερη μορφή του, όπου κανείς εξετάζει ουσιαστικά οποιοδήποτε χρονοδιάγραμμα εργασίας, αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό ως πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού περιόδων εργασίας (tour scheduling problem).

Φυσικά έχουν μελετηθεί και άλλες απλούστερες παραλλαγές του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού περιόδων εργασίας. Οι Jarrah et al. (1994) παρέχουν μια συνοπτική αναθεώρηση αυτών των παραλλαγών, ενώ περιεκτικότερες αναθεωρήσεις, αλλά κάπως ξεπερασμένες, είναι οι εργασίες των Baker (1976), Tien and Kamiyama (1982) και Betchhold et al. (1991). Όλες οι παραλλαγές του χρονοπρογραμματισμού περιόδων εργασίας έχουν διατυπωθεί χωρίς ιδιαίτερες εξαιρέσεις ως προβλήματα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Integer Linear Programming problems). Δεδομένου ότι αυτά τα προβλήματα έχουν αποδειχθεί ότι είναι NP-Complete, δηλαδή προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχουν αλγόριθμοι (επίλυσης) με πολυωνυμικό χρόνο σύγκλισης (Bartholdi,1981), η περισσότερη σχετική έρευνα συγκεντρώθηκε στην ανάπτυξη λύσεων με βάση αποτελεσματικούς ευρετικούς αλγορίθμους. Αν και η αναλυτική περιγραφή όλης της σχετικής βιβλιογραφίας ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτοί οι ευρετικοί αλγόριθμοι έχουν βασιστεί σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών μεθοδολογιών, όπως simulated annealing (Brusco and Jacobs, 1993), προσεγγίσεις βασισμένες στο γραμμικό προγραμματισμό (LP-based) (Krajewski et al. 1980, Morris and Showalter, 1983 και Easton and Rossin, 1991) και προγραμματισμός με στόχο (Loucks and Jacobs, 1991).

Αξίζει επίσης να σημειωθούν κάποιες συγκεκριμένες μελέτες, οι οποίες παρουσιάζουν πιο πολύπλοκα ίσως μοντέλα, στα οποία λαμβάνονται υπόψη και άλλα χαρακτηριστικά. Τα σενάρια των Bard et al. (2003) περιλαμβάνουν απαιτήσεις για δύο συνεχόμενες ημέρες ρεπό, χρόνους έναρξης εργασίας που μεταβάλλονται από ημέρα σε ημέρα, τη χρήση ευέλικτων εργαζομένων μερικής απασχόλησης, και περιορισμούς στην πλήρη και στη μερική απασχόληση. Έτσι, ο χρονοπρογραμματισμός (απασχόλησης) προσωπικού (staff scheduling) σε μια επιχείρηση παροχής υπηρεσιών αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα με πολλές παραλλαγές, που εξαρτώνται από συμβάσεις, πολιτικές της επιχείρησης και κυβερνητικούς κανονισμούς, ενώ ο συνυπολογισμός διαλειμμάτων, αργιών, διακοπών, διαφόρων τύπων απασχόλησης, περιορισμών, και μια σειρά διαφορετικών τύπων βαρδιών, συνθέτει μια πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση. Σχετικά με το κλασικό πρακτικό πρόβλημα του προγραμματισμού βαρδιών νοσηλευτικού προσωπικού (nurse rostering problem), στην εργασία τους οι Bellanti et al. (2004) λαμβάνουν υπόψη και απαιτήσεις και συμβουλές. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται εκτός από τις διάφορες απαιτήσεις των συμβάσεων (για παράδειγμα ο μέγιστος αριθμός ημερών εργασίας και αδειών) και τις απαιτήσεις λειτουργίας (για παράδειγμα ελάχιστος αριθμός νοσηλευτικού προσωπικού ανά βάρδια και ο αριθμός προσωπικού ασφαλείας), και προαιρετικές συμβουλές από τη Διεύθυνση (για παράδειγμα εργασία ή ρεπό σε συνεχόμενες ημέρες), με στόχο την αύξηση ικανοποίησης των εργαζομένων από ένα πιο ρεαλιστικό και προσωποποιημένο πρόγραμμα. Οι λύσεις που υπολογίστηκαν από τις προτεινόμενες διαδικασίες παρουσίασαν καλή απόδοση και ξεπέρασαν σημαντικά τις λύσεις που παράγονταν έως τότε στο νοσοκομείο χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Για μια διεξοδική και παράλληλα εξαντλητική μελέτη των εν λόγω θεμάτων, οι Ernst et al. (2004) δημιούργησαν μια εκπληκτική συλλογή πάρα πολλών άρθρων, μελετών και εργασιών πάνω σε αυτά τα θέματα προγραμματισμού προσωπικού. Πρόκειται για μια περιεκτική συλλογή περίπου 700 βιβλιογραφικών αναφορών σε αυτήν την περιοχή, που εστιάζεται κυρίως σε αλγορίθμους για τη δημιουργία καταλόγων προσωπικού (rosters) και (χρονο)προγραμμάτων απασχόλησης προσωπικού (personnel schedules). Καλύπτει επίσης και άλλες σχετικές περιοχές, όπως τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού (workforce planning) και τον προσδιορισμό αναγκών επάνδρωσης (staffing). Οι αναφορές αυτές ταξινομούνται με τρεις τρόπους, όπως φαίνεται παρακάτω: σύμφωνα με τον τύπο του προβλήματος που εξετάζεται, τους τομείς εφαρμογής που καλύπτονται και τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Επίσης, για κάθε έγγραφο παρέχεται μια σύντομη περίληψη.

Πίνακας 1: *Κατηγοριοποίηση άρθρων κατά τύπο (rostering classification).*

Classification	Papers	Classification	Papers
Crew Scheduling	219	Task Based Demand	47
Tour Scheduling	185	Demand Modelling	40
Flexible Demand	107	Task Assignment	32
Workforce Planning	99	Shift Assignment	24
Crew Rostering	76	Disruption Management	16
Shift Scheduling	64	Other Classifications	12
Cyclic Roster	62	Stint Based Roster	9
Days Off Scheduling	61	Roster Assignment	6
Shift Demand	55		

Πίνακας 2: *Κατηγοριοποίηση άρθρων κατά εφαρμογή (application).*

Application	Papers	Application	Papers
Buses	129	Civic Services and Utilities	22
Nurse Scheduling	103	Venue Management	19
Airlines	99	Protection and Emergency Services	16
Railways	37	Other Applications	14
Call Centres	37	Transportation Systems	12
General	33	Hospitality and Tourism	7
Manufacturing	29	Financial Services	6
Mass Transit	28	Sales	3
Health Care Systems	23		

Πίνακας 3: *Κατηγοριοποίηση άρθρων κατά μέθοδο επίλυσης (solution method).*

Method	**Papers**	**Method**	**Papers**
Branch-and-Bound	14	Lagrangean Relaxation	32
Branch-and-Cut	9	Linear Programming	35
Branch-and-Price	30	Matching	36
Column Generation	48	Mathematical Programming	27
Constraint Logic Programming	46	Network Flow	38
Constructive Heuristic	133	Other Meta-Heuristic	11
Dynamic Programming	17	Other Methods	35
Enumeration	13	Queueing Theory	32
Evolution	4	Set Covering	58
Expert Systems	15	Set Partitioning	72
Genetic Algorithms	28	Simple Local Search	39
Goal Programming	19	Simulated Annealing	20
Integer Programming	139	Simulation	31
Iterated Randomised Construction	5	Tabu Search	16

Σύμφωνα με το πλαίσιο των Abernathy et al. (1973), ο χρονοπρογραμματισμός περιόδων εργασίας καλύπτει σαφώς και τα επίπεδα προγραμματισμού και αυτά του χρονοπρογραμματισμού ταυτόχρονα. Αυτό είναι εφικτό λόγω της απλότητας των άμεσων υπηρεσιών και της σταθερότητας της ζήτησης κατά την διάρκεια σχετικά μεγάλων περιόδων.

Τα περιβάλλοντα παραγωγής διαφέρουν αρκετά από εκείνα των άμεσων υπηρεσιών. Οι βιομηχανίες παραγωγής λειτουργούν συνήθως με τον παραδοσιακό τρόπο, με διαδοχικές βάρδιες σταθερής διάρκειας (δηλαδή πρωινή, απογευματινή και νυχτερινή βάρδια). Εντούτοις, η αναμενόμενη ζήτηση σχετίζεται μόνο έμμεσα με το εργατικό δυναμικό, υπό την έννοια ότι το εργατικό δυναμικό θεωρείται ως ένας από τους πόρους που απαιτούνται για την υλοποίηση των σχεδίων παραγωγής. Ο προγραμματισμός εργατικού δυναμικού μπορεί να αποτελέσει μόνο ένα μέρος, είτε του γενικού προγραμματισμού (aggregate planning), είτε του βασικού χρονοπρογραμματισμού (master scheduling) (της ιεραρχίας του προγραμματισμού παραγωγής), ανάλογα με το επίπεδο όπου καθορίζεται το φορτίο παραγωγής των (τουλάχιστον) κρίσιμων διαδικασιών. Ο χρονοπρογραμματισμός του εργατικού δυναμικού, αφ' ετέρου, μπορεί μόνο να αποτελέσει ένα αναπόσπαστο τμήμα του χρονοπρογραμματισμού των δραστηριοτήτων (operations scheduling), όπου η διαθεσιμότητα του εργατικού δυναμικού (όπως καθορίζεται από τον προγραμματισμό επιβάλλει συγκεκριμένους περιορισμούς στα σχετικά προβλήματα κατά το χρονοπρογραμματισμό των δραστηριοτήτων. Αυτός είναι ίσως και ένας από τους λόγους που μια σχετικά πρόσφατη έρευνα (βλέπε Grabot and Letouzey, 2000) δείχνει καθαρά ότι, οι διευθυντές παραγωγής θεωρούν τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού και όχι τα θέματα χρονοπρογραμματισμού τόσο κρίσιμα για τον έλεγχο της παραγωγής.

Στις βιομηχανίες παραγωγής οι συνολικές απαιτήσεις για εργασία για ένα συγκεκριμένο μήνα καθορίζονται συνήθως από ένα Βασικό Πρόγραμμα Παραγωγής (Master Production Schedule ή MPS), το οποίο παρέχει το φορτίο της συνολικής παραγωγής κάθε γραμμής συσκευασίας για όλα τα προϊόντα που παράγονται. Εντούτοις, η παραγωγική ικανότητα κάθε γραμμής συσκευασίας εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των διαθέσιμων ανειδίκευτων εργατών. Επομένως, ένα κοινό πρόβλημα προγραμματισμού που αντιμετωπίζει η Διοίκηση είναι να αποφασίσει πόσοι ανειδίκευτοι εργάτες πρέπει να απασχοληθούν σε κάθε καθημερινή βάρδια εργασίας κάποιο συγκεκριμένο μήνα του βασικού προγράμματος, ώστε να ολοκληρωθεί το φορτίο παραγωγής κάθε γραμμής συσκευασίας, μεγιστοποιώντας παράλληλα την παραγωγική εκμετάλλευση του εργατικού δυναμικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο στόχος της παραγωγικής εκμετάλλευσης του εργατικού δυναμικού ισοδυναμεί στις περισσότερες περιπτώσεις με την ελαχιστοποίηση του συνολικού εργατικού δυναμικού που απασχολείται.

Αυτό το ιδιαίτερο πρόβλημα προγραμματισμού προσωπικού και παραγωγικής ικανότητας, οι Lagodimos and Leopoulos (2000) ονόμασαν πρόβλημα Προγραμματισμού Εργατικού Δυναμικού σε Βάρδιες (Manpower Shift Planning ή MSP). Σύμφωνα με αυτούς τους συγγραφείς, η διατύπωση και η λύση του

MSP δεν έχει εξεταστεί επίσημα ποτέ στο παρελθόν και για αυτό το λόγο ασχολήθηκαν στην έρευνά τους με αυτό. Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα MSP αποτέλεσε αντικείμενο ενός βιομηχανικού ερευνητικού προγράμματος που εκτελέστηκε για μια ελληνική θυγατρική μιας πολυεθνικής επιχείρησης που αναπτύσσει δραστηριότητες στον τομέα των επεξεργασμένων τροφίμων και ποτών.

Υπάρχουν δύο σημαντικές διαφορές μεταξύ του MSP και του ανωτέρω παραδοσιακού παραδείγματος προγραμματισμού προσωπικού. Πρώτον, η παραδοσιακή έρευνα ενδιαφέρεται για την δημιουργία άμεσα εφαρμόσιμων και λεπτομερών προγραμμάτων εργασίας. Έτσι, τα σχετικά μοντέλα προσπαθούν να συμπεριλάβουν όλες τις πιθανές προδιαγραφές εργασίας και πολύ ακριβείς λεπτομέρειες (όπως τα διαλείμματα για γεύματα, ημέρες απουσίας-ρεπό και ημέρες εργασίας μερικής απασχόλησης), προκειμένου να αντιπροσωπευθούν όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται τα αντίστοιχα περιβάλλοντα εργασίας. Αντίθετα, το MSP αντιμετωπίζει αποτελεσματικά ένα συνολικό πρόβλημα προγραμματισμού της παραγωγικής ικανότητας με βάση τους γενικούς στόχους και τους περιορισμούς παραγωγής. Δεύτερον, η παραδοσιακή έρευνα υποθέτει ότι οι απαιτήσεις σε εργατικό δυναμικό για όλα τα χρονικά διαστήματα του ορίζοντα προγραμματισμού είναι γνωστές εκ των προτέρων. Αντίθετα, ο στόχος του MSP είναι να καθορίσει αυτές τις απαιτήσεις σε εργατικό δυναμικό για κάθε μεμονωμένη περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού, ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι συγκεκριμένοι στόχοι παραγωγής (χρησιμοποιώντας εξοπλισμό με δεδομένες ανάγκες σε εργάτες) ικανοποιούνται πλήρως.

Σύμφωνα με τους Lagodimos and Paravantis (2003), η πρώτη μελέτη ενός προβλήματος προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού στα πλαίσια μιας βιομηχανίας παραγωγής ήταν αυτή των Lagodimos and Leopoulos (2000). Το πρόβλημα, που οι τελευταίοι συγγραφείς ονόμασαν πρόβλημα Προγραμματισμού Εργατικού Δυναμικού σε Βάρδιες, αποτελούσε μέρος της συνολικής δραστηριότητας προγραμματισμού παραγωγής σε μια βιομηχανία παραγωγής τροφίμων και ποτών και αφορούσε την μηνιαία επάνδρωση του τμήματος συσκευασίας, σε βάρδιες σταθερής διάρκειας. Το τμήμα συσκευασίας αποτελούταν από διάφορες γραμμές συσκευασίας, οι οποίες λειτουργούσαν ανεξάρτητα, με εξαίρεση το γεγονός ότι επανδρώνονταν όλες από μια κοινή ομάδα ευέλικτου εργατικού δυναμικού (δηλαδή δεν υπήρχαν διαφοροποιήσεις). Ως ένα πρόβλημα ανάθεσης (assignment problem), το πρόβλημα αυτό διαμορφώθηκε και μελετήθηκε ως ένα πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, το οποίο βρέθηκε ότι είναι NP-hard, δηλαδή ένα πρόβλημα για το οποίο δεν υπάρχει αλγόριθμος (επίλυσης) με πολυωνυμικό χρόνο σύγκλισης.

Οι Lagodimos and Leopoulos (2000) καθόρισαν ένα κάτω φράγμα (lower bound) και πρότειναν δύο greedy («λαίμαργους») ευρετικούς αλγορίθμους για την επίλυση του MSP. Με τον όρο «greedy», οι συγγραφείς τονίζουν ότι η λογική του αλγορίθμου είναι να προγραμματιστούν και να καλυφτούν πλήρως οι ανάγκες επάνδρωσης της μηχανής που απαιτεί για τη λειτουργία της τους περισσότερους ανειδίκευτους εργάτες, προτού προγραμματιστούν οι ανάγκες μιας άλλης. Δηλαδή δίνεται προτεραιότητα στη μηχανή με τις μεγαλύτερες ανάγκες σε εργατικό δυναμικό. Η μελέτη των Lagodimos and Paravantis (2003) είχε ως στόχο την βελτίωση του καλύτερου αρχικού αλγορίθμου, που ονομάστηκε Αλγόριθμος-LL. Πιο συγκεκριμένα, δύο ήταν οι κύριοι στόχοι της εν λόγω μελέτης: η δημιουργία ενός βελτιωμένου κάτω φράγματος (lower bound) της λύσης του MSP και η μελέτη της τροποποίησης του Αλγορίθμου-LL για να βελτιωθεί η αποδοτικότητά του. Σε ότι αφορά το δεύτερο στόχο, καθώς ο Αλγόριθμος-LL λειτουργεί, καθορίζει συγκεκριμένα τη λειτουργία των γραμμών συσκευασίας σε περιόδους στις βάρδιες, δίνοντας τους προτεραιότητα σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο μέτρο, δηλαδή ένα δείκτη προτεραιότητας. Δεδομένου ότι, οι προτεραιότητες των βαρδιών είναι κρίσιμες για τη λειτουργία του αλγορίθμου και μπορούν γενικά να καθοριστούν διάφορες λογικές εναλλακτικές λύσεις, οι Lagodimos and Paravantis (2003) έκριναν ότι είναι απαραίτητη μια λεπτομερής μελέτη των αποτελεσμάτων αυτών των δεικτών στην απόδοση του αλγορίθμου.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθεί μια πιο αναλυτική εξήγηση της επιλογής του τμήματος συσκευασίας σε μια βιομηχανική μονάδα για την μελέτη και ανάπτυξη μοντέλων προγραμματισμού.

Σε πολλές βιομηχανίες παραγωγής, η παραγωγή αποτελείται από δύο ευδιάκριτα στάδια, την επεξεργασία και τη συσκευασία. Η επεξεργασία στοχεύει στην παραγωγή σχετικά λίγων ημι-ετοίμων προϊόντων, που αποθηκεύονται για μελλοντική χρήση. Η συσκευασία στοχεύει στη συσκευασία ημι-ετοίμων προϊόντων σε προκαθορισμένα μεγέθη πακέτων και σε προκαθορισμένες μορφές, παράγοντας έτσι ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ετοίμων προϊόντων προς αποστολή σε συγκεκριμένους πελάτες και τον ανεφοδιασμό των αποθεμάτων. Πολλά προϊόντα παράγονται σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο συμπεριλαμβανομένων των επεξεργασμένων τροφίμων, των ποτών, των φαρμακευτικών ειδών, των καλλυντικών και των προϊόντων καπνού (Buxey, 2003, van Dam et al., 1998 και Lagodimos et al.,1996).

Σε τέτοια περιβάλλοντα παραγωγής, ενώ η επεξεργασία μπορεί να λάβει πολλές μορφές ανάλογα με τα παραχθέντα προϊόντα, η συσκευασία πραγματοποιείται από ένα σύνολο συσκευαστικών γραμμών, που θα αναφερθούν στο σύνολό τους ως τμήμα συσκευασίας. Το τμήμα συσκευασίας αποτελείται από διάφορες παράλληλες γραμμές συσκευασίας, που έχουν στόχο τη συσκευασία συγκεκριμένων οικογενειών προϊόντων (οι οικογένειες προϊόντων ορίζονται είτε από τα χρησιμοποιούμενα ημι-έτοιμα προϊόντα, είτε από τα μεγέθη πακέτων ή από τις μορφές που παράγονται, ή και από τα δύο). Ορισμένες γραμμές, με τα ίδια ή και διαφορετικά χαρακτηριστικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ίδια οικογένεια προϊόντων. Οι γραμμές συσκευασίας είναι συνήθως ημιαυτόματες και λειτουργούν υπό την επίβλεψη ενός ειδικευμένου χειριστή, ο οποίος υποστηρίζεται από ημιειδικευμένους εργάτες. Συνήθως, μια γραμμή απαιτεί καθορισμένο αριθμό ημιειδικευμένων εργατών, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αριθμός εργατών που έχουν προγραμματιστεί να εργαστούν στη γραμμή καθορίζει την απόδοσή της (van Dam et al.,1998).

Οι γραμμές συσκευασίας, όταν λειτουργούν, μοιράζονται δύο τύπους πόρων: εργατικό δυναμικό και βοηθητικό εξοπλισμό (για παράδειγμα εξοπλισμό τροφοδοσίας και περιτύλιξης, εγκιβωτιστές, παλετοποιητές, μηχανές δημιουργίας πακέτων κ.λ.π.). Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα, της κοινής εκμετάλλευσης πόρων, μπορεί να προκαλέσει σύνθετα προβλήματα στα τμήματα συσκευασίας, προγραμματισμού παραγωγής (production planning)

(Artiba, 1994, van Dam et al.,1998) και χρονοπρογραμματισμού (Claassen and van Beek,1993; Lagodimos et al.,1996; van Dam et al.,1999). Προφανώς, ο βαθμός στον οποίο ο βοηθητικός εξοπλισμός περιορίζει τη λειτουργία των τμημάτων αυτών, εξαρτάται από τη διαθέσιμη υποδομή. Οι περιορισμοί στο εργατικό δυναμικό, εντούτοις, είναι πάντα παρόντες και καθορίζουν απόλυτα τη γενική παραγωγική ικανότητα του τμήματος.

Οι κύριες εργασίες των ημιειδικευμένων εργατών σχετίζονται με τη φόρτωση του υλικού συσκευασίας στις γραμμές συσκευασίας και με τις διάφορες μετακινήσεις προϊόντων μεταξύ των διαφορετικών μερών μιας γραμμής, υπό τις οδηγίες του ειδικευμένου χειριστή (βλέπε Croci et al., 2000 για τέτοιου είδους εργασίες στην περίπτωση συναρμολόγησης ηλεκτρονικών). Εφόσον αυτές οι εργασίες είναι όμοιες για τις περισσότερες γραμμές, οι ημιειδικευμένοι εργάτες είναι ευέλικτοι, υπό την έννοια ότι μπορούν να απασχοληθούν στη λειτουργία διαφόρων γραμμών. Επιπλέον, εφόσον αυτές οι εργασίες είναι αρκετά απλές, απαιτείται ελάχιστη εκπαίδευση πριν οι εργάτες καταστούν ικανοί να τις εκτελέσουν. Αυτό είναι σημαντικό, δεδομένου ότι επιτρέπει στις επιχειρήσεις να ποικίλει το εργατικό δυναμικό με ελάχιστες δαπάνες για εκπαίδευση. Προκειμένου να μειωθούν περαιτέρω και οι δαπάνες και οι χρόνοι πρόσληψης, μια συνηθισμένη πρακτική για διάφορες επιχειρήσεις είναι να διατηρούν έναν κατάλογο με πρώην εργάτες τους και άλλους εργάτες που είναι γενικά διαθέσιμοι για εργασία (Buxey, 1995). Όταν απαιτούνται, οι εργάτες από τον κατάλογο προσλαμβάνονται προσωρινά (με συμβάσεις από ένα έως τρεις μήνες) και εισέρχονται εκ νέου στον κατάλογο όταν λήξουν οι συμβάσεις τους (Lagodimos and Leopoulos, 2000). Αυτή η πρακτική δεν ισχύει για τους ειδικευμένους χειριστές, οι οποίοι απασχολούνται με μακροπρόθεσμες συμβάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι, προκειμένου και να μειωθεί ο νεκρός χρόνος των γραμμών συσκευασίας και να εξασφαλιστεί η απασχόληση των ειδικευμένων χειριστών ανάλογα με τη ζήτηση, μια συγκεκριμένη επιχείρηση επεξεργασμένων τροφίμων χρησιμοποιεί αποκλειστικά το προσωπικό συντήρησης για αυτό το σκοπό (Lagodimos et al., 1996).

Οι Kher and Fry (2001) μελέτησαν την επίδραση της ευελιξίας της εργασίας, των πολιτικών ανάθεσης εργασιών και των κανόνων αποστολής παραγγελιών στην απόδοση μιας επιχείρησης. Εξέτασαν δύο κατηγορίες πελατών, ζωτικής σημασίας (με προτεραιότητα) και μη-ζωτικής σημασίας (κανονική). Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τους διάφορους κανόνες ανάθεσης εργασιών και αποστολής μιας παραγγελίας για να δείξουν ότι η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί για τους ζωτικής σημασίας πελάτες, εις βάρος όμως των κανονικών πελατών. Αντίθετα, η αυξανόμενη ευελιξία της εργασίας παρέχει πολλά οφέλη για τους ζωτικής σημασίας πελάτες, χωρίς μείωση της απόδοσης για τους μη-ζωτικής σημασίας πελάτες. Οι συγγραφείς προτείνουν ότι η ευελιξία της εργασίας πρέπει να αντιμετωπίζεται ως σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της έγκαιρης παράδοσης παραγγελιών, σε αντίθεση με την εστίαση μόνο στους κανόνες αποστολής παραγγελιών που κυριαρχεί σήμερα.

Οι Croci et al. (2000) διαπίστωσαν ότι ακόμη και στα πλαίσια παραγωγής ή συναρμολόγησης, όπου οι εργαζόμενοι εκτελούν ελεγκτικές και υποστηρικτικές εργασίες, σε αντιδιαστολή με τις άμεσες εργασίες της παραγωγής, οι πολιτικές για το εργατικό δυναμικό (workforce policies) είναι μια σημαντική παράμετρος χρονοπρογραμματισμού. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι η απόδοση βελτιώνεται, εάν οι πολιτικές για το εργατικό δυναμικό χαρακτηρίζονται από διευρυμένες δια-λειτουργικές εργασίες, παρά από εξειδικευμένες εργασίες. Σε οποιαδήποτε βιομηχανία, όπου οι μηχανές είναι περισσότερες από τους χειριστές, είναι απαραίτητο ο αρμόδιος για τον προγραμματισμό να μελετήσει την κινητικότητα των εργαζομένων μεταξύ των μηχανών. Οι Croci et al. (2000) εφάρμοσαν δύο εναλλακτικούς κανόνες κινητικότητας εργαζομένων: α) μη περιορισμένη κινητικότητα, όπου δεν υπάρχει περιορισμός στην κινητικότητα ενός εργαζομένου μέσα στο εργοστάσιο συναρμολόγησης, άρα ένας εργαζόμενος έχει την άδεια να εκτελέσει την εργασία ή τις εργασίες, αρκεί να είναι ικανός, σε οποιαδήποτε μηχανή στο εργοστάσιο, και β) περιορισμένη κινητικότητα, όπου η κινητικότητα ενός εργαζομένου είναι περιορισμένη σε μια συγκεκριμένη περιοχή μηχανών στο ίδιο στάδιο συναρμολόγησης. Οι συγγραφείς προτείνουν ότι η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται σε ένα μεσαίο επίπεδο ευελιξίας παρά σε ολοκληρωτική ευελιξία (δηλαδή με περιορισμένη ευελιξία), καθώς χάνεται πάρα πολύς χρόνος κατά τη μεταφορά χειριστών από τη μία μηχανή στην άλλη, όταν δεν υπάρχει περιορισμός στην ανάθεση ενός εργαζομένου σε μια δραστηριότητα.

Σε επιχειρήσεις εντάσεως εργασίας, όπως η επιχείρηση συναρμολόγησης υπολογιστών στην εργασία των Bhatnagar et al. (2003), ένας κοινός τρόπος απόκρισης σε σημαντικές αυξήσεις της ζήτησης είναι μέσω της χρήσης της ευέλικτης εργασίας, που είναι πιο οικονομική. Η πρόκληση για τους διευθυντές παραγωγής είναι να βρουν την καλύτερη κατανομή των μόνιμων και των προσωρινών ευέλικτων εργαζομένων, αποτελεσματικά, με βάση τους μεταβλητούς ημερήσιους στόχους παραγωγής. Διάφοροι άλλοι παράγοντες όπως η δυνατότητα υπερωριών, η υπερωριακή αμοιβή, η ευελιξία και άλλοι, περιπλέκουν αυτό το πρόβλημα λήψης αποφάσεων.

Επίσης, στο εν λόγω πρόβλημα λήψης αποφάσεων πρέπει να ενσωματωθούν και διάφορα άλλα περίπλοκα ζητήματα, όπως η επίδραση της εκμάθησης και η ευελιξία των δεξιοτήτων του εργατικού δυναμικού. Μια σημαντική ανάγκη που προκύπτει από την βιβλιογραφία, είναι η ανάγκη της ενσωμάτωσης τριών τύπων αποφάσεων. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Bhatnagar et al. (2003) λαμβάνει υπόψη την παραπάνω παρατήρηση και επιδιώκει να ενσωματώσει αποφάσεις σχετικά με το μόνιμο εργατικό δυναμικό, τις δεξιότητές του, την εισαγωγή προσωρινών εργαζομένων και το ρυθμό εκμάθησης σχετικά με ζητήματα, όπως η παραγωγική ικανότητα των γραμμών και ο ρυθμός παραγωγής. Όσον αφορά στο ρυθμό εκμάθησης, η συναρμολόγηση έχει σχεδιαστεί να είναι αρκετά απλή, γεγονός που επιτρέπει στους εργαζομένους να αποκτήσουν πολύ γρήγορα τις απαραίτητες δεξιότητες (σύμφωνα με την εκάστοτε καμπύλη εκμάθησης). Οι νεοπροσληφθέντες πραγματοποιούν μια σύντομη θεωρητική εκπαίδευση και στη συνέχεια πρακτική εκπαίδευση (on the job training). Οι προσωρινοί εργαζόμενοι είναι οικονομικώς πιο αποδοτικοί, αφού πληρώνονται λιγότερα σε σχέση με τους μόνιμους εργαζομένους. Εντούτοις, έχουν περιορισμένες δεξιότητες και συνεπώς, μπορούν να συμμετέχουν μόνο σε ορισμένες διεργασίες. Στην μελέτη των Bhatnagar et al. (2003), οι προσωρινοί εργαζόμενοι περιορίζονται στην διεργασία της συναρμολόγησης. Επιπλέον, οι προσωρινοί εργαζόμενοι που είναι νέοι στη παραγωγική διεργασία, χρειάζονται ορισμένο χρονικό διάστημα έως ότου επιτύχουν το μέγιστο της παραγωγής τους.

Η προσωρινή εργασία σίγουρα παρέχει μια πιο οικονομική και ευέλικτη ικανότητα σε μια βιομηχανία. Παρόλα αυτά, η χρήση της προσωρινής εργασίας περιορίζεται σε συγκεκριμένες διεργασίες και πρέπει να ενσωματώνει την επίδραση της εκμάθησης. Οι μάνατζερ πρέπει να μελετούν τις διαφορές κόστους (cost tradeoffs) μεταξύ της απασχόλησης ενός μεγαλύτερου αριθμού μόνιμων εργαζομένων και της χρησιμοποίησης προσωρινών εργαζομένων. Αυτή η συμπεριφορά του κόστους και ο αριθμός των προσωρινών εργαζομένων που προσλαμβάνονται, αναλύθηκαν και αποτέλεσαν μέτρο της απόδοσης στην εν λόγω μελέτη.

Τα αποτελέσματά της εργασίας των Bhatnagar et al. (2003) δείχνουν ότι οι περιπτώσεις όπου το κόστος εισαγωγής και το κόστος μη παραγωγικής απασχόλησης (idle time cost) των μόνιμων εργαζομένων είναι ελάχιστα (ή μέγιστα) αντιστοιχούν στον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων για τις οποίες το συνολικό κόστος είναι ελάχιστο (ή μέγιστο). Όσον αφορά στον αριθμό προσωρινών εργαζομένων που εισάγονται (προσλαμβάνονται), ο μέγιστος αριθμός προσωρινών εργαζομένων είναι περίπου 1,66 φορές μεγαλύτερος από τον ελάχιστο αριθμό εργαζομένων που προσλαμβάνονται γενικά. Επίσης, τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι ο αριθμός εργαζομένων που προσλαμβάνονται μειώνεται, όσο αυξάνεται το κόστος πρόσληψης, γεγονός αναμενόμενο, ενώ αντίθετα ο ρυθμός εισαγωγής εργαζομένων μειώνεται κάπως, όσο μειώνεται το κόστος εισαγωγής (πρόσληψης).

Σύμφωνα με τον Buxey (1995), δεν υπάρχει «πρόσληψη και απόλυση» του προσωρινού προσωπικού. Η πιο κοινή περίπτωση είναι να απασχολούνται οι προσωρινοί (ή περιστασιακοί) εργαζόμενοι για αρκετούς μήνες με αμοιβαία συμφωνηθέντες όρους. Οι εργαζόμενοι αυτοί μπορεί να είναι πρώην υπάλληλοι, νοικοκυρές, φοιτητές και άλλοι. Οι βραχυπρόθεσμες συμβάσεις είναι ευρέως διαδεδομένες, και για τους υπαλλήλους πλήρης απασχόλησης και για αυτούς της μερικής απασχόλησης. Μια τυπική εποχιακή σύμβαση διαρκεί τρεις μήνες (βλέπε Buxey, 2003). Πέρα από αυτήν την περίοδο, οι συμφωνίες των διαφόρων συνδικάτων υπαγορεύουν ότι οι περιστασιακοί (προσωρινοί) υπάλληλοι πρέπει να μετατραπούν σε μόνιμους. Η εποχιακή απασχόληση εμφανίζεται ως μια βιώσιμη πρόταση, υπό την προϋπόθεση ότι η επιχείρηση παρέχει εκπαίδευση στους εργαζομένους, με μέγιστο χρόνο τις 3 εβδομάδες. Πολλές επιχειρήσεις διατηρούν έναν κατάλογο, και ζητούν από το πεπειραμένο προσωπικό (νοικοκυρές, συνταξιούχους, φοιτητές και άλλους) να επιστρέψουν την ίδια περίοδο κάθε έτος.

Ειδικά για ευαίσθητα τρόφιμα, των οποίων οι πωλήσεις παρουσιάζουν σημαντικές καθημερινές διακυμάνσεις, τα αντίστοιχα προγράμματα παραγωγής βασίζονται στην παράδοση, κατά παραγγελία των πελατών, ακόμα και την επόμενη μέρα. Για να επιτευχθεί ένας τέτοιος υψηλός βαθμός ευελιξίας, μπορεί να απαιτηθεί και να ειδοποιηθεί μέρος του περιστασιακού εργατικού δυναμικού μέσα σε ένα εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα, για μερικές μόνο ώρες συνεχούς εργασίας. Μια εταιρία (βλέπε Buxey, 2003) παρακάμπτει το εμπόδιο της απαιτούμενης κατάρτισης των εργαζομένων χρησιμοποιώντας μια ειδικευμένη εταιρεία παροχής προσωπικού. Με μικρό κόστος, μπορεί να αποκτήσει άμεσα τον απαραίτητο αριθμό κατάλληλα ειδικευμένων εργαζομένων, αρκεί να ειδοποιήσει την εταιρεία μία ημέρα πριν. Σε μια άλλη περίπτωση δε (βλέπε Buxey, 1995), μια εταιρεία παροχής προσωπικού (employment agency), παρέχει προσωπικό μετά από ειδοποίηση μόλις μιας ώρας για τόσο μικρό χρονικό διάστημα όσο μία ημέρα. Άλλες επιχειρήσεις είναι μεγάλα συγκροτήματα και μπορούν απλά να ανακατανείμουν το πλεόνασμα του προσωπικού σε τμήματα, που έχουν αυξημένες ανάγκες.

Ο Buxey (2003) πιστεύει, τέλος, ότι «η πρόσληψη και η απόλυση» είναι ένα διοικητικό ζήτημα. Η απλή μαθηματική εξισορρόπηση του κόστους δεν επηρεάζει ποτέ τέτοιες κρίσιμες αποφάσεις. Από σχετικές μελέτες προκύπτει ότι, αν και πολλές επιχειρήσεις, για παράδειγμα στην Αυστραλία, ρυθμίζουν το εργατικό δυναμικό τους με βάση τις εποχιακές πωλήσεις, δεν αντιμετωπίζουν αυξημένο κόστος.

Η δομή της απασχόλησης στην ελληνική βιομηχανία χαρακτηρίζεται από την απόλυτη κυριαρχία της πλήρους απασχόλησης, το μεγάλο ποσοστό των ειδικευμένων και την ύπαρξη ενός σχετικώς υψηλού αριθμού εργαζομένων με συμβάσεις ορισμένου χρόνου. Η ελληνική βιομηχανία διαθέτει ήδη, σε ικανοποιητικό βαθμό, την ικανότητα να ανταποκρίνεται έγκαιρα στις μεταβολές της ζήτησης, χρησιμοποιώντας τις υφιστάμενες δυνατότητες ευέλικτης χρησιμοποίησης του εργατικού δυναμικού. Οι παράγοντες που θα βελτιώσουν την κατάσταση στον τομέα αυτό είναι κυρίως η αλλαγή του νομικού πλαισίου για την διευθέτηση του χρόνου εργασίας σε πιο μακρόχρονη βάση και η άρση των εμποδίων στις προσλήψεις προσωρινού προσωπικού. Στην Ελλάδα, δεν υπάρχει νομοθεσία που σχετίζεται με μη-τακτικές ώρες εργασίας, και πιο συγκεκριμένα δεν υπάρχει νομοθεσία για την εργασία με ειδοποίηση (on-call). Η προσωρινή απασχόληση ωστόσο συνδέεται κυρίως με την ανειδίκευτη εργασία, αλλά δυστυχώς η ρύθμιση κανόνων για την προστασία των προσωρινά απασχολούμενων, μιας κατ' εξοχήν ευέλικτης κατηγορίας του εργατικού δυναμικού, είναι ελλιπής και αποσπασματική.

Οι παραγωγικές επιχειρήσεις, ιδιαίτερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση, χρησιμοποιούν τον παραδοσιακό τρόπο εργασίας με διαδοχικές κανονικές βάρδιες. Ανάλογα με το υπολογιζόμενο φορτίο παραγωγής (production workload), μια επιχείρηση μπορεί να αποφασίσει να χρησιμοποιήσει μέχρι και τρεις βάρδιες, δηλαδή πρωινή, απογευματινή και νυχτερινή βάρδια. Η αμοιβή του εργατικού δυναμικού για κανονική εργασία σε κάποια βάρδια εξαρτάται γενικά από τη βάρδια, ανάλογα δηλαδή σε ποιο χρονικό διάστημα της εργάσιμης ημέρας εργάζεται κάποιο άτομο. Αν και οι κανονισμοί ποικίλλουν μεταξύ των διαφορετικών χωρών, τα ποσά της αμοιβής ως ποσοστά είναι συνήθως τα ίδια για την πρωινή και απογευματινή βάρδια, αλλά αυξάνονται για τη νυχτερινή βάρδια. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η υπερωριακή εργασία σε μια συγκεκριμένη βάρδια αποτιμάται προσαυξημένη κατά ένα πρόσθετο σταθερό ποσοστό σε σχέση με την κανονική αμοιβή αυτής της βάρδιας.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο προσδιορισμός του συνολικού εργατικού δυναμικού και η κατανομή του στις διάφορες βάρδιες αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα τακτικού προγραμματισμού στο τμήμα συσκευασίας. Η λύση του, δε, έχει επιπτώσεις και στη γενική παραγωγική ικανότητα και στο κόστος παραγωγής. Εντούτοις, αυτό που κάνει αυτό το πρόβλημα ιδιαίτερα δύσκολο είναι η διαθεσιμότητα της υπερωρίας ως δυνατότητα κατά τον προγραμματισμό. «*Με την υπερωρία, ο αριθμός των βαρδιών ανά εργάσιμη ημέρα, που πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να* *καλυφθεί το υπολογιζόμενο φορτίο εργασίας, δεν χρειάζεται να είναι εξαρχής σταθερός, αλλά εισάγεται (ως μεταβλητή απόφασης) στο πρόβλημα προγραμματισμού»*, σύμφωνα με τους Lagodimos and Mihiotis (2004).

Ως εκ τούτου, όταν το φορτίο εργασίας μερικών γραμμών συσκευασίας υπερβαίνει την διάρκεια ενός σταθερού αριθμού βαρδιών, ο αρμόδιος για το προγραμματισμό του ανθρώπινου δυναμικού βρίσκεται αντιμέτωπος με το εξής δίλημμα: να εισάγει μια πρόσθετη κανονική βάρδια ή να χρησιμοποιήσει υπερωρία για να καλύψει το υπερβάλλον φορτίο παραγωγής (overload) σε σχέση με την παραγωγική δυναμικότητα μιας βάρδιας. Ελλείψει αναλυτικών εργαλείων, η απάντηση σε αυτό το δίλημμα μπορεί να δοθεί μόνο από κανόνες απόφασης (decision rules), εφαρμόζοντας τις αποφάσεις της πολιτικής της Διοίκησης. Ακόμα μια φορά, πρέπει να τονιστεί ότι η σχετική βιβλιογραφία παρέχει κυρίως θεωρητικά μοντέλα, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν μερικώς ή και καθόλου πρακτικά. Από πρακτικής απόψεως, δυστυχώς, η βιβλιογραφία με εφαρμογές της θεωρίας του προγραμματισμού, ειδικά σε γραμμές συσκευασίας σε βιομηχανίες παραγωγής, είναι ανεπαρκής. Επίσης, τα διάφορα πακέτα λογισμικού που διατίθενται στο εμπόριο δεν μπορούν να καλύψουν αποτελεσματικά τις εξεζητημένες ανάγκες (van Dam et al.,1998).

Οι οικονομικές συνέπειες, δηλαδή το κόστος από τέτοιες διοικητικές πολιτικές και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες μερικές πολιτικές είναι προτιμητέες από άλλες, είναι τα θεμελιώδη ζητήματα που η έρευνα των Lagodimos and Mihiotis (2004) προσπάθησε να αντιμετωπίσει. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας και της προσέγγισης στο σύνολό της, η παρούσα διπλωματική εργασία θα αποτελέσει ένα παραπάνω βήμα στην προσπάθεια επίλυσης αυτών των τόσο ζωτικών προβλημάτων και να βελτιώσει όσο είναι δυνατό ένα πολύ καλό και απλό στη χρήση αναλυτικό εργαλείο.

Γενικότερα, η εν λόγω έρευνα των Lagodimos and Mihiotis (2004) ενδιαφέρεται για την αποτελεσματικότητα των αποφάσεων τακτικού προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού στα τμήματα συσκευασίας. Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε είναι διερευνητική, και βασίστηκε στην ανάλυση της βέλτιστης λύσης ενός συγκεκριμένου μοντέλου για τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού. Η ανάπτυξη του μοντέλου αυτού αποτέλεσε μέρος εκείνης της έρευνας και η περαιτέρω ανάπτυξή του και η βελτίωσή του αποτελεί μέρος της παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με τους συγγραφείς (Lagodimos and Mihiotis, 2004), «*δεν υπάρχει ούτε μία προηγούμενη έρευνα που έχει μελετήσει αυτό το πρόβλημα μέσα είτε σε ένα τμήμα συσκευασίας είτε σε οποιοδήποτε άλλο στάδιο παραγωγής*».

Στην πραγματικότητα, τα υπάρχοντα μοντέλα γενικού προγραμματισμού θεωρούν την παραγωγική ικανότητα ως εξ ολοκλήρου εξαρτώμενη από τις μηχανές (Aghezzaf, 2000) και κατά τη χρησιμοποίηση της υπερωρίας ως επιλογή τακτικού προγραμματισμού, η επιλογή αυτή εξετάζεται μόνο εφόσον έχει εξαντληθεί όλη η διαθέσιμη κανονική παραγωγική ικανότητα. Δηλαδή πρώτα χρησιμοποιούνται πλήρως όλες οι διαθέσιμες κανονικές βάρδιες και μετά υπεισέρχεται υπερωρία. Επιπλέον, ο αριθμός βαρδιών ανά εργάσιμη ημέρα θεωρείται σταθερός και δεν λαμβάνεται υπόψη ως μεταβλητή απόφασης (βλέπε Silver et al., 1998). Εντούτοις, υπάρχουν μερικές σχετικές μελέτες με το θέμα του προγραμματισμού ανθρώπινου δυναμικού σε βάρδιες με χρήση υπερωρίας, οι οποίες όμως αναφέρονται κυρίως σε υπηρεσίες και λίγες που αναφέρονται σε βιομηχανίες.

Οι Brusco and Showalter (1993) ανέπτυξαν και ερεύνησαν ένα μοντέλο προγραμματισμού νοσηλευτικού προσωπικού με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους στελέχωσης με προσωπικό υπό διάφορες συνθήκες. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι και η υπερωρία και η κανονική εργασία μπορούν να συνυπάρξουν στη βέλτιστη λύση. Επιπλέον, ένα σημαντικό ποσοστό υπερωρίας πέρα από την κανονική εργασία, μπορεί να οδηγήσει σε πολιτικές στελέχωσης με μειωμένο συνολικό κόστος. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη ελαστικότητα που προσφέρει η υπερωριακή εργασία, καθώς μειώνει το εργατικό δυναμικό και αυξάνει τη χρησιμοποίησή του στις περιόδους με μικρές ανάγκες για προσωπικό. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Venkataraman and Brusco (1996), οι οποίοι μελέτησαν την ολοκληρωμένη εφαρμογή του προηγούμενου μοντέλου προγραμματισμού σε συνδυασμό με ένα συγκεκριμένο μοντέλο χρονοπρογραμματισμού νοσηλευτικού προσωπικού (nurse scheduling model) που πρότειναν. Τέλος, οι Easton and Rossin (1997) χρησιμοποίησαν μια παραλλαγή του γνωστού μοντέλου χρονο-προγραμματισμού περιόδων εργασίας για να μελετήσουν τα αποτελέσματα της εισαγωγής υπερωρίας αντί των κανονικών βαρδιών και οδηγήθηκαν στα ίδια αποτελέσματα με εκείνα των προαναφερθεισών μελετών.

Ειδικά για τη βιομηχανία, οι πρακτικές μελέτες είναι περιορισμένες. Στην εργασία τους οι Bhatnagar et al. (2003) ασχολήθηκαν με ορισμένα ζητήματα προγραμματισμού εργατικού δυναμικού για έναν κατασκευαστή υπολογιστών κατά την διάρκεια της φάσης εισαγωγής (λανσαρίσματος) προϊόντων, όπου η άμεση αύξηση της παραγωγής για να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση είναι κρίσιμη. Μερικά σημαντικά ζητήματα που αντιμετώπισαν σε αυτήν την έρευνα ήταν, α) πώς να κατανείμουν τους μόνιμους και τους προσωρινούς εργαζομένους με διαφορετικές δεξιότητες για να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή, β) ποιος πρέπει να είναι ο ρυθμός εισαγωγής προσωρινών εργαζομένων για να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση και γ) ποιοι είναι οι βασικοί παράγοντες λήψης αποφάσεων, που επηρεάζουν την απόδοση της παραγωγής. Οι παραπάνω συγγραφείς πρότειναν ένα μοντέλο LP για να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος υπό τις απαιτήσεις ενός σύνθετου χρονοπρογραμματισμού, των δεξιοτήτων, και του ρυθμού εκμάθησης. Η ανάλυσή τους έδειξε ότι το κόστος της εισαγωγής προσωρινών εργαζομένων, το κόστος της υπερωριακής αμοιβής και το ποσό της υπερωρίας ασκούν σημαντική επίδραση στην απόδοση. Το συνολικό κόστος περιλάμβανε το κόστος της κανονικής και της υπερωριακής εργασίας των μόνιμων εργαζομένων, το κόστος της κανονικής και της υπερωριακής εργασίας των προσωρινών εργαζομένων, το κόστος εισαγωγής προσωρινών εργαζομένων και το κόστος μη παραγωγικής απασχόλησης (idle time cost) για τους μόνιμους και τους προσωρινούς εργαζομένους. Το μοντέλο LP λύθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα LINGO 7.0. Τα ανωτέρω συμπεράσματα μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο πλαίσιο για τη λήψη αποφάσεων σε διευθυντικό επίπεδο σε βιομηχανίες που κάνουν συχνή χρήση της προσωρινής απασχόλησης.

Μια άλλη εργασία που ασχολήθηκε με την ελαχιστοποίηση του κόστους που σχετίζεται με την υπερωριακή εργασία ήταν η εργασία των Yang et al. (2004).

Πολλές επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν πρακτικές προκλήσεις χρονο-προγραμματισμού κατά την εξισορρόπηση του κόστους της υπερωρίας έναντι του κόστους καθυστέρησης (tardiness cost), όπου το κόστος καθυστέρησης ποικίλλει ανάλογα με την εργασία ή το πρόγραμμα. Η εργασία των Yang et al. (2004) εξετάζει αυτήν την πρόκληση λαμβάνοντας υπόψη το χρονο-προγραμματισμό εργασιών κατά την διάρκεια ενός πεπερασμένου αριθμού διακριτών περιόδων. Οι διάφορες εργασίες μπορούν να εκτελεστούν είτε κανονικά είτε υπερωριακά, φυσικά με διαφορετικό κόστος ανά ώρα, ενώ οι εργασίες δεν μπορούν να αντικατασταθούν (είναι συγκεκριμένες και μοναδικές). Κάθε εργασία έχει σχετικές ημερομηνίες απελευθέρωσης παραγγελιών και παράδοσης, και οι εργασίες που καθυστερούν δημιουργούν ένα συγκεκριμένο κόστος ανά περίοδο καθυστέρησης. Ο αρμόδιος για τον προγραμματισμό επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει το ποσό του σταθμισμένου κόστους καθυστέρησης και το κόστος υπερωρίας. Οι συγγραφείς παρέχουν έναν αλγόριθμο για τον προσδιορισμό της βέλτιστη χρήσης του κανονικού χρόνου και των υπερωριών για οποιαδήποτε σταθερή ακολουθία εργασιών και χρησιμοποιούν αυτόν τον αλγόριθμο για να βρουν ευρετικές λύσεις για το γενικό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού, χρησιμοποιώντας παράλληλα ένα κανόνα δημιουργίας μιας ακολουθίας των εργασιών βασισμένη σε προτεραιότητες. Έδειξαν ακόμα ότι το πρόβλημα αυτό, που ονόμασαν Min-WTOT (Min-Weighted Tardiness and OverTime), είναι NP-hard. Στη συνέχεια, δημιούργησαν έναν άλλο αλγόριθμο για να βελτιώσουν την αρχική λύση. Επίσης, χρησιμοποίησαν μια δομή γραμμικού προγραμματισμού για να βρουν καλά κάτω φράγματα (lower bounds) για να είναι εφικτή η αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων. Οι υπολογιστικές δοκιμές τους έδειξαν ότι ο αλγόριθμος παρήγαγε λύσεις κοντά στις βέλτιστες για προβλήματα με υψηλό κόστος καθυστέρησης μέσα σε ένα λογικό χρόνο. Τέλος, σύμφωνα με τους συγγραφείς, αν το μοντέλο επεκταθεί κατάλληλα, μπορεί να εφαρμοστεί στη βιομηχανία κατασκευών (construction industry).

Ενώ οι μελέτες των Lagodimos et al. (2000, 2003 και 2004) ασχολούνται άμεσα με τα τμήματα συσκευασίας, οι Chang et al. (1999) εξέτασαν το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του εργατικού δυναμικού, που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένα σύνολο προκαθορισμένων εργασιών συντήρησης, μέσα σε έναν δεδομένο ορίζοντα προγραμματισμού σε βιομηχανίες εντάσεως κεφαλαίου, όπως για παράδειγμα βιομηχανίες παραγωγής χάλυβα, ημιαγωγών ή χημικών. Κάθε εργασία έχει ένα προκαθορισμένο φορτίο εργασίας (που μετριέται σε εργατο-περιόδους) και όταν η εργασία αρχίσει, δεν μπορεί να διακοπεί. Όπως διατυπώνεται, αυτό το πρόβλημα προγραμματισμού (σε ένα εργοστάσιο παραγωγής χάλυβα) παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το πρόβλημα MSP με μία βάρδια. Επιπλέον, η προσέγγιση που χρησιμοποιείται από τους εν λόγω συγγραφείς μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την επέκταση του προβλήματος MSP προκειμένου να καλύψει τις περιπτώσεις, όπου ο ρυθμός παραγωγής των γραμμών συσκευασίας είναι μια λειτουργία που σχετίζεται με την κατανομή του εργατικού δυναμικού. Υπάρχουν όμως και διαφορές από το MSP, όπως η δυσκολία πρόβλεψης του προσωπικού συντήρησης που θα χρειαστεί σε ένα απρόβλεπτο πρόβλημα ή βλάβη και η πιθανή έλλειψη του κατάλληλα ειδικευμένου προσωπικού για τη βλάβη. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο αλγόριθμος των Chang et al. (1999) χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στην πράξη από μια επιχείρηση παραγωγής χάλυβα στην Κορέα.

2.2. Σχετικά Μοντέλα

Στο σημείο αυτό αφού παρουσιάστηκαν διάφορες εργασίας και μελέτες, μέσα στις οποίες προτείνονται διάφορα μοντέλα και αλγόριθμοι για την επίλυση του προβλήματος του οικονομικού προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού, θα αναλυθούν ορισμένες από αυτές σε βάθος. Από τις διάφορες εργασίες θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε τρεις συγκεκριμένες, καθώς η παρούσα εργασία βασίζεται εξ ολοκλήρου πάνω σε αυτές και αποτελεί κατά κάποιον τρόπο τη φυσική τους συνέχεια.

Το μοντέλο MSP και ο Αλγόριθμος-LL

Γενικά

Οι Lagodimos and Leopoulos (2000) μελέτησαν ένα ιδιαίτερο πρόβλημα προγραμματισμού προσωπικού, που αντιμετώπισε μια πραγματική επιχείρηση παραγωγής τροφίμων. Στο πρόβλημα αυτό, που αναφέρεται στην εργασία τους ως πρόβλημα Προγραμματισμού Εργατικού Δυναμικού σε Βάρδιες, επιδιώκεται να βρεθεί το ελάχιστο εργατικό δυναμικό με το οποίο πρέπει να στελεχωθεί κάθε διαθέσιμη βάρδια μιας εργάσιμης ημέρας σε ένα δεδομένο ορίζοντα προγραμματισμού, προκειμένου να ολοκληρωθούν όλοι οι προκαθορισμένοι στόχοι παραγωγής που συνδέονται με τις διάφορες ανεξάρτητες γραμμές παραγωγής. Το MSP διατυπώθηκε ως πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, του οποίου η δομή επιτρέπει την υπόθεση ότι είναι ένα πρόβλημα NP-Complete.

Στη συνέχεια, οι ίδιοι συγγραφείς πρότειναν δύο greedy ευρετικούς αλγορίθμους για την επίλυση του MSP, έναν για μία βάρδια και έναν άλλο για πολλές βάρδιες ανά εργάσιμη ημέρα. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από ένα τυπικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης ILP σε συνδυασμό με ένα κάτω φράγμα (lower bound) που αναπτύχθηκε για την επίλυση του MSP, οι συγγραφείς αυτοί εξέτασαν την απόδοση του ευρετικού αλγορίθμου για πολλές βάρδιες, για διάφορα περιβάλλοντα εργασίας. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πολύ ικανοποιητική απόδοση, τόσο από την άποψη υπολογιστικού χρόνου όσο και της ποιότητας λύσης. Τέλος, οι συγγραφείς παρέχουν πιθανές κατευθύνσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη των αλγορίθμων και προεκτάσεις του προβλήματος MSP.

Η γενική λογική του ευρετικού Αλγορίθμου-LL

Ο Αλγόριθμος-LL, ο οποίος προτάθηκε από τους Lagodimos and Leopoulos (2000), είναι ένας ευρετικός αλγόριθμος και ανήκει στην κατηγορία των greedy αλγορίθμων, που χρησιμοποιείται συχνά για την προσέγγιση των δύσκολων προβλημάτων ανάθεσης (βλέπε Catrysse and van Wassenhove, 1992). Ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για να τρέξει πολύ γρήγορα σε χρόνο $O(NPD\ln(PD))$ και παρείχε άριστα αποτελέσματα για όλα τα προβλήματα στα οποία δοκιμάστηκε. Πρακτικά, για αυτά τα προβλήματα, η αποδοτικότητα επίλυσής του ξεπέρασε καθαρά αυτή του LINGO Optimizer (έκδοση 4.0/1995), παρέχοντας λύσεις σε ένα μικρό κλάσμα χρόνου, δηλαδή πρακτικά πάρα πολύ γρήγορα (βλέπε Lagodimos and Leopoulos, 2000).

Ο στόχος του Αλγορίθμου-LL είναι να καθοριστεί η λειτουργία των γραμμών παραγωγής σε περιόδους, ώστε να επιτευχθεί μια κατανομή εργατικού δυναμικού σε κάθε βάρδια (δηλαδή σε όλες τις μεμονωμένες περιόδους της κάθε βάρδιας) όσο το δυνατόν πιο όμοια και επίπεδη. Για να επιτευχθεί το παραπάνω, οι γραμμές παραγωγής τοποθετούνται αρχικά σε μια λίστα με φθίνουσα σειρά αναγκών επάνδρωσης με εργατικό δυναμικό, για αυτό και ονομάζεται greedy («λαίμαργος») αλγόριθμος, και στη συνέχεια εξετάζεται ο προγραμματισμός της λειτουργίας τους με αυτή τη σειρά. Μια γραμμή εξετάζεται μόνο αφού έχει ήδη προγραμματιστεί να καλυφθεί το φορτίο παραγωγής της αμέσως προηγούμενης γραμμής στην ακολουθία. Κατά συνέπεια, μια τελική λύση του MSP επιτυγχάνεται όταν προγραμματιστεί να καλυφθεί το φορτίο παραγωγής και της τελευταίας γραμμής στην αρχική ακολουθία.

Ο πραγματικός προγραμματισμός (actual assignment) της λειτουργίας μιας γραμμής σε περιόδους, ανάλογα με το φορτίο παραγωγής της, πραγματοποιείται σε δύο στάδια, τον αρχικό προγραμματισμό (initial assignment) και την τοποθέτηση σε βάρδια (shift assignment). Η μόνη διαφορά μεταξύ αυτών των δύο σταδίων αφορά το σύνολο περιόδων, που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιες για τον προγραμματισμό. Πέραν αυτού όμως, και τα δύο στάδια έχουν την ίδια λογική που χρησιμοποιεί τον κανόνα Least Assigned Manpower (ή LAM), (βλέπε Lagodimos and Paravantis, 2003).

Ο αρχικός προγραμματισμός εκτελείται μία φορά για κάθε γραμμή. Σε αυτό το στάδιο, εξετάζονται ως υποψήφιες περίοδοι για προγραμματισμό όλες οι περίοδοι (ανεξάρτητα από τη βάρδια στην οποία ανήκουν) για τις οποίες ο πιθανός προγραμματισμός της γραμμής υπό εξέταση δεν αυξάνει τις γενικές ανάγκες σε εργατικό δυναμικό. Εξετάζονται δηλαδή εκείνες οι περίοδοι που είναι σχετικά λίγο «φορτωμένες» έναντι άλλων περιόδων. Ο αρχικός προγραμματισμός ολοκληρώνεται όταν, είτε προγραμματιστεί (να καλυφθεί) ολόκληρο το φορτίο μιας γραμμής, ή όταν όλες οι αντίστοιχες υποψήφιες περίοδοι καθίστανται μη εφικτές.

Η τοποθέτηση σε βάρδια (βλέπε και Lau, 1996) εκτελείται για κάθε γραμμή τόσες φορές όσες χρειάζεται έως ότου προγραμματιστεί (να καλυφθεί) ολόκληρο το φορτίο παραγωγής της σε περιόδους. Σε αυτό το στάδιο, εξετάζονται ως υποψήφιες περίοδοι για προγραμματισμό όλες οι εφικτές περίοδοι μιας συγκεκριμένης βάρδιας, η οποία επιλέγεται χρησιμοποιώντας μια ειδική διαδικασία επιλογής βάρδιας. Κάθε εφαρμογή του σταδίου αυτού ολοκληρώνεται όταν, είτε προγραμματιστεί (να καλυφθεί) οριστεί ολόκληρο το φορτίο της γραμμής, ή όταν όλες οι αντίστοιχες υποψήφιες περίοδοι έχουν μπλοκαριστεί. Κατά συνέπεια οποιαδήποτε επανάληψη του σταδίου της τοποθέτησης σε βάρδια αγνοεί τις ήδη εξετασμένες βάρδιες, εφόσον όλες οι περίοδοί τους είναι ανέφικτες.

Η διαδικασία επιλογής βάρδιας του Αλγορίθμου-LL στοχεύει στον καθορισμό της συγκεκριμένης βάρδιας που θα χρησιμοποιηθεί για κάθε εφαρμογή της τοποθέτησης σε βάρδια και περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά βήματα: τη δοκιμαστική κατανομή (trial allocation) και τον καθορισμό προτεραιότητας βάρδιας/βαρδιών (shift prioritization).

Η δοκιμαστική κατανομή εφαρμόζει τη λογική προγραμματισμού της τοποθέτησης σε βάρδια, δηλαδή την τοποθέτηση σε εκείνες τις βάρδιες με (μη μηδενικές) εφικτές περιόδους, θεωρώντας ότι οι βάρδιες αυτές επιλέχτηκαν στην πραγματικότητα. Κατά συνέπεια, συγκεντρώνονται όλες οι πληροφορίες σχετικά με τις πραγματικές επιπτώσεις της επιλογής κάθε βάρδιας. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στον καθορισμό προτεραιότητας βάρδιας για την αξιολόγηση του μεγέθους ενός συγκεκριμένου μέτρου, του δείκτη προτεραιότητας, για κάθε βάρδια. Η βάρδια με το μικρότερο δείκτη προτεραιότητας είναι αυτή που επιλέγεται για τον τελικό προγραμματισμό. Σε περίπτωση ισοβαθμιών, προτεραιότητα δίνεται στη βάρδια που προηγείται χρονικά.

Παρατηρήσεις

Ένα βασικό αποτέλεσμα της έρευνας των Lagodimos and Leopoulos (2000) έχει σχέση με την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ποιότητα της λύσης. Η επίδραση αυτή δεν είναι εξ ολοκλήρου ομοιόμορφη για όλες τις περιπτώσεις. Αν και απαιτείται μια πιο λεπτομερής έρευνα για αυτό το ζήτημα, φαίνεται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η κατανομή (προφίλ) επάνδρωσης με εργατικό δυναμικό καθώς και του φορτίου παραγωγής μπορεί να είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της λύσης. Γενικά, η ποιότητα της λύσης βελτιώνεται, όταν τα χρησιμοποιούμενα προφίλ εργατικού δυναμικού επιτρέπουν τη συνδυασμένη λειτουργία των μηχανών στις ορισμένες περιόδους. Εντούτοις, εφόσον δεν είναι γνωστή η πραγματική βέλτιστη λύση για όλα τα προβλήματα, αυτές οι αρχικές παρατηρήσεις χρειάζονται περαιτέρω μελέτη.

Ένα σημαντικό ζήτημα αφορά στο χρόνο εκτέλεσης των υπολογισμών που απαιτείται για να βρεθεί μια ευρετική λύση. Σε όλα τα προβλήματα της μελέτης των Lagodimos and Leopoulos (2000), ο χρόνος λύσης ποίκιλε μεταξύ 12 και 16 δευτερολέπτων υπολογιστικού χρόνου (computer run-time). Ο χρόνος αυτός θεωρείται εξαιρετικός και ιδιαίτερα σε σύγκριση με το χρόνο λύσης που απαιτείται από το LINGO. Στην πράξη, εκτός από λίγες περιπτώσεις όπου το LINGO έφθασε σε μια βέλτιστη λύση μέσα σε 2 λεπτά, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η λύση λήφθηκε αφότου ενεργοποιήθηκε η συνθήκη τερματισμού των υπολογισμών των 65 λεπτών. Αν και είναι πιθανό ότι οι λύσεις του LINGO μπορεί να βελτιωθούν εάν ο επιτρεπόμενος χρόνος υπολογισμών αυξηθεί, ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για το LINGO παραμένει σημαντικά μεγάλος συγκρινόμενος με αυτόν των αλγορίθμων.

Πιο συγκεκριμένα, οι Lagodimos and Leopoulos (2000) καθόρισαν το ρυθμό σύμφωνα με τον οποίο οι προτεινόμενοι ευρετικοί αλγόριθμοι συγκλίνουν σε μια τελική λύση. Αν και η ανάλυση που παρουσίασαν ισχύει αυστηρά για τον αλγόριθμο μιας βάρδιας (single-shift algorithm), ισχύει περίπου και για τον ευρετικό αλγόριθμο πολλών βαρδιών (multi-shift heuristic). Σύμφωνα με τους παραπάνω συγγραφείς, οι δύο αλγόριθμοι αποτελούνται βασικά από μια σειρά διαδικασιών ταξινόμησης (μια λειτουργία ταξινόμησης για κάθε διαθέσιμη μηχανή), και ακολουθούν μερικές διαδοχικές αποφάσεις που λαμβάνονται βάσει των ταξινομημένων δεδομένων. Είναι ευρέως γνωστό ότι η λειτουργία ταξινόμησης k αντικειμένων με βάση ένα δεδομένο κριτήριο μπορεί να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα ρυθμό $k \ln(k)$ (βλέπε για παράδειγμα Anderson, 1995). Εισάγοντας όπου $k=PD$ (για το συνολικό αριθμό των χρονικών διαστημάτων σε όλες τις βάρδιες) και θεωρώντας όλες τις διαθέσιμες μηχανές n, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο ρυθμός σύγκλισης (convergence rate) των ευρετικών αλγορίθμων:

Τάξη σύγκλισης (Order of Convergence) = $O[nPD \ln(PD)]$.

Η λογαριθμική σύγκλιση (logarithmic order of convergence) καταδεικνύει σαφώς ότι οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι μπορούν να φθάσουν σε μια λύση πρακτικά πολύ γρήγορα. Επομένως, αναμένεται ότι μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς για τη λύση μεγάλων προβλημάτων MSP.

Συμπεράσματα

Η εργασία των Lagodimos and Leopoulos (2000) ασχολήθηκε με την διατύπωση και την ευρετική επίλυση ενός προβλήματος προγραμματισμού προσωπικού (MSP), το οποίο δεν είχε μελετηθεί ποτέ στο παρελθόν. Το πρόβλημα προκύπτει φυσικά κατά την διάρκεια των σταδίων του γενικού προγραμματισμού παραγωγής σε ιδιαίτερου τύπου βιομηχανίες, όπου η διαθέσιμη παραγωγική ικανότητα εξαρτάται έντονα από το εργατικό δυναμικό που απασχολείται. Στην πραγματικότητα, ένας από τους ευρετικούς αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν, ενσωματώθηκε ως κανονικό υπολογιστικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στα πλαίσια των διαδικασιών προγραμματισμού μιας βιομηχανίας παραγωγής.

Το πρόβλημα MSP διατυπώθηκε από τους Lagodimos and Leopoulos (2000) ως μοντέλο ILP και παρουσιάστηκε η ισχυρή ομοιότητά του με το γνωστό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παράλληλων ανεξάρτητων μηχανών για την ελαχιστοποίηση του εύρους του χρόνου παραγωγής (makespan). Βάσει της δομικής ομοιότητας μεταξύ των δύο μοντέλων, οι εν λόγω συγγραφείς υπέθεσαν ότι το MSP (ακόμη και στην απλούστερη παραλλαγή του για μία βάρδια) είναι ένα πρόβλημα NP-Complete. Πρότειναν επίσης μια μορφή για τον υπολογισμό του κάτω φράγματος (lower bound) της λύσης του MSP και ανέπτυξαν ευρετικούς αλγορίθμους για την αντιμετώπιση προβλημάτων με μία και περισσότερες βάρδιες. Ο αλγόριθμος για πολλές βάρδιες (multi-shift algorithm) επεκτείνει αποτελεσματικά τον αλγόριθμο μίας βάρδιας (single-shift algorithm) με την ενσωμάτωση στη λογική λειτουργίας του ενός κριτηρίου επιλογής βαρδιών με προτεραιότητες.

Και οι δύο ευρετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν ως greedy αλγόριθμοι, κατασκευάζουν τη λύση βαθμιαία εξετάζοντας μία μηχανή τη φορά σε κάθε επανάληψη. Αυτή η λογική λειτουργίας καθιστά και τους δύο ευρετικούς αλγορίθμους εξαιρετικά γρήγορους (αφού διαθέτουν λογαριθμική σύγκλιση), γεγονός που επιτρέπει την άμεση βιομηχανική εφαρμογή τους, χρησιμοποιώντας τυπικά εμπορικά εργαλεία λογισμικού και κοινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Επιπλέον, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των υπολογισμών για περιβάλλοντα εργασίας με πολλές βάρδιες, η ποιότητα των ευρετικών λύσεων είναι πολύ ικανοποιητική. Οι ευρετικές λύσεις ήταν καλύτερες από εκείνες που ελήφθησαν από το LINGO σε ποσοστό 50% όλων των προβλημάτων και παρέκκλιναν όχι περισσότερο από 3% από το κάτω φράγμα (lower bound) στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Αυτό το γεγονός δεν εκπλήσσει με δεδομένη την καλή απόδοση που αναφέρεται γενικά για τους greedy αλγορίθμους σε σχέση με διάφορα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού μηχανών (machine scheduling problems) (Anderson, 1995 και Lagodimos et al., 1996).

Δεδομένου ότι αυτή η εργασία των Lagodimos and Leopoulos (2000) είναι η πρώτη επίσημη μελέτη του προβλήματος MSP, υπάρχει ακόμα πολύ έδαφος για περαιτέρω έρευνα, και όσον αφορά στη διατύπωση του προβλήματος όσο και στην βελτίωση των ευρετικών αλγορίθμων. Σχετικά με την διατύπωση του MSP, μπορεί να γίνει μια προσπάθεια για τη γενίκευσή του με πιο «χαλαρές» βασικές υποθέσεις. Έτσι, σύμφωνα με τους συγγραφείς, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν και πρόσθετα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η χρήση λιγότερο ευέλικτου εργατικού δυναμικού, όρια στο εργατικό δυναμικό που απασχολείται σε κάθε βάρδια, περιορισμοί που να περιορίζουν συγκεκριμένες μηχανές να λειτουργήσουν ταυτόχρονα ή καθημερινές βάρδιες που να διαφέρουν στην διάρκεια. Επιπλέον, θα μπορούσε να εισαχθεί μια δομή κόστους, η οποία θα επέτρεπε την διαφοροποίηση του κόστους του εργατικού δυναμικού ανά βάρδια.

Επιστρέφοντας στα ερευνητικά ζητήματα σχετικά με τους προτεινόμενους ευρετικούς αλγορίθμους των Lagodimos and Leopoulos (2000), θα ήταν ενδιαφέρον να πειραματιστεί κανείς με διαφορετικά (και ίσως λιγότερο μυωπικά) κριτήρια επιλογής βαρδιών, ώστε να βελτιωθεί πιθανώς η αποδοτικότητα του αλγορίθμου πολλών βαρδιών (multi-shift heuristic). Σημαντικότερο, εντούτοις, είναι να προσαρμοστούν κατάλληλα οι ευρετικοί αλγόριθμοι για να είναι εφικτή η επίλυση των γενικευμένων εκδόσεων του προβλήματος MSP. Λόγω της απλής λογικής λειτουργίας τους, οι ευρετικοί αλγόριθμοι που προτείνονται μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα για να εξεταστούν έτσι οι περισσότερες παραλλαγές του MSP. Παρόλα αυτά, παραμένει να φανεί στην πράξη, εάν -και κατά πόσο- η απόδοσή τους θα παραμείνει εξίσου ικανοποιητική κατά την εξέταση αυτών των πιο σύνθετων προβλημάτων.

Το μοντέλο MSP με δείκτες προτεραιότητας και επιλογής βάρδιας

Γενικά

Η εργασία των Lagodimos and Paravantis (2003) ασχολήθηκε με ένα πρόβλημα προγραμματισμού προσωπικού, που ονομάζεται πρόβλημα Προγραμματισμού Εργατικού Δυναμικού σε Βάρδιες. Στόχος του είναι να βρεθεί το ελάχιστο εργατικό δυναμικό που απαιτείται σε κάθε βάρδια μιας εργάσιμης ημέρας σε μια βιομηχανία παραγωγής, έτσι ώστε οι στόχοι της παραγωγής να εκπληρώνονται μέσα σε έναν δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Πρόκειται δηλαδή για το γνωστό πρόβλημα προγραμματισμού με το οποίο ασχολήθηκαν αρχικά οι Lagodimos and Leopoulos (2000). Οι Lagodimos and Paravantis (2003) ανέπτυξαν και πρότειναν ένα νέο κάτω φράγμα (lower bound) για τη λύση του MSP. Μελέτησαν επίσης την τροποποίηση του αρχικού ευρετικού αλγορίθμου για την επίλυση του MSP προσπαθώντας να βελτιώσουν την απόδοσή του. Όπως προτάθηκε αρχικά ο ευρετικός αλγόριθμος (το 2000), έδινε προτεραιότητα στις βάρδιες σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο δείκτη προτεραιότητας (priority index). Οι Lagodimos and Paravantis (2003) σκέφτηκαν ότι διαφορετικοί δείκτες θα μπορούσαν να βελτιώσουν την απόδοση του αλγορίθμου και έτσι, καθόρισαν έξι εναλλακτικούς δείκτες και απέδειξαν στη συνέχεια ότι τρεις από αυτούς είναι απολύτως ισοδύναμοι. Οι συγγραφείς αυτοί χρησιμοποίησαν μια αριθμητική έρευνα δύο φάσεων για την αξιολόγηση και την κατάταξη των τεσσάρων μη-ισοδύναμων δεικτών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποδοτικότητα του αλγορίθμου εξαρτάται σημαντικά από τις προτεραιότητες των βαρδιών. Επιπλέον, η αποδοτικότητα βελτιώνεται (ακόμα και οριακά) για έναν από τους νέους δείκτες προτεραιότητας. Τέλος, για όλους τους δείκτες που μελετώνται, εκτός από έναν, ο νέος ευρετικός αλγόριθμος είναι σαφέστατα πιο γρήγορος (όσον αφορά στον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμών) από το δημοφιλές εμπορικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης LINGO.

Σύμφωνα με τους Lagodimos and Paravantis (2003), εξετάζοντας τη δομή του MSP, το πρόβλημα μπορεί να ταξινομηθεί ως δισδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης (two-dimensional assignment problem). Φυσικά, μια λύση του MSP αντιστοιχεί στην ανάθεση όλων των γραμμών παραγωγής σε συγκεκριμένες περιόδους. Κάθε γραμμή μπορεί να αντιμετωπισθεί γενικά ως ένα αντικείμενο με δύο διαστάσεις: εργατικό δυναμικό (manning) (a_i) και φορτίο παραγωγής (production load) (w_i). Από αυτή τη σκοπιά, το MSP παρουσιάζει ομοιότητες με το γνωστό δισδιάστατο πρόβλημα συσκευασίας (packing problem) (βλέπε Lodi et al., 2002 για μια λεπτομερή αναθεώρηση προβλημάτων συσκευασίας).

Παρατηρήσεις

Από τα αποτελέσματα της έρευνας των Lagodimos and Paravantis (2003) προκύπτει ότι συγκρίνοντας τον Αλγόριθμο-LL με το LINGO, τα αποτελέσματα είναι σαφώς πιο ευνοϊκά για τον αλγόριθμο. Ο Αλγόριθμος-LL φθάνει σε ένα σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό γνωστών βέλτιστων λύσεων από το LINGO και η αποδοτικότητά του έναντι του LINGO είναι ανώτερη για το όλους τους δείκτες προτεραιότητας, εκτός από έναν. Πρακτικά, η σύγκριση είναι συντριπτική όσον αφορά στον απαιτούμενο χρόνο λύσης. Εκτός από 7 προβλήματα όπου το LINGO βρήκε βέλτιστες λύσεις μέσα σε περίπου 2 λεπτά, οι περισσότερες λύσεις του LINGO ελήφθησαν αφότου ενεργοποιήθηκε η συνθήκη τερματισμού των υπολογισμών των 30 λεπτών. Αντίθετα, ο Αλγόριθμος-LL έφθανε σε μια λύση μέσα σε 0,01 δευτερόλεπτα (!) κατά μέσο όρο.

Ένα άλλο συμπέρασμα της εν λόγω έρευνας (Lagodimos and Paravantis, 2003) ήταν ότι, ο αλγόριθμος εμφανίστηκε ευαίσθητος στην κατανομή του εργατικού δυναμικού που χρησιμοποιήθηκε για την επάνδρωση των γραμμών, και ήταν λιγότερο αποδοτικός όσο αυξανόταν η ανομοιομορφία της κατανομής του εργατικού δυναμικού. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του νέου κάτω φράγματος (lower bound) της λύσης που προτάθηκε, παραμένει να ερευνηθεί εάν αυτό το παραπάνω γεγονός προκαλείται από τον αλγόριθμο αυτό καθ' εαυτό ή από το συγκεκριμένο νέο κάτω φράγμα (lower bound) που χρησιμοποιήθηκε.

Επίσης, εξετάζοντας τα αποτελέσματα των πινάκων 3 και 4 (βλέπε Lagodimos and Paravantis, 2003) σχετικά με την αποδοτικότητα του αλγορίθμου και τους εναλλακτικούς δείκτες, ένας νέος δείκτης (ο MUM) παρουσιάζει την καλύτερη γενική απόδοση για όλες τις περιπτώσεις. Ο δείκτης (UM) που χρησιμοποιήθηκε στην αρχική μορφή του Αλγορίθμου-LL από τους Lagodimos and Leopoulos (2000) παρουσιάζει επίσης μια πολύ ικανοποιητική απόδοση, αλλά η αποδοτικότητά του φαίνεται να μειώνεται για ακανόνιστη κατανομή του εργατικού δυναμικού, έναντι του MUM. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτη είναι και η απόδοση ενός άλλου δείκτη (του MMI). Είναι ενθαρρυντικό το γεγονός ότι η αποδοτικότητά του είναι αρκετά κοντά (αν και κάπως κατώτερη) σε αυτή των προηγούμενων δεικτών, και ενισχύει ιδιαίτερα την προσπάθεια για την προσαρμογή του Αλγορίθμου-LL για προβλήματα MSP, όπου κάθε βάρδια έχει διαφορετικό κόστος εργατικού δυναμικού και όχι το ίδιο.

Συμπεράσματα

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας των Lagodimos and Paravantis (2003) ήταν ότι το νέο κάτω φράγμα (lower bound), το οποίο προτείνεται, βασίζεται σε ένα γενικό αποτέλεσμα της αποσύνθεσης του προβλήματος MSP, το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω βελτιώσεις. Αν και εκκρεμεί μια θεωρητική ανάλυση της απόδοσης του νέου φράγματος, τα αρχικά αποτελέσματα των υπολογισμών καταδεικνύουν ότι η χρήση του οδηγεί σε μια σαφέστατη βελτίωση σε σχέση με τα προηγούμενα φράγματα της λύσης του προβλήματος.

Οι Lagodimos and Paravantis (2003), στοχεύοντας στη βελτίωση του Αλγορίθμου-LL, εστίασαν την προσοχή τους σε ένα συγκεκριμένο μέρος του αλγορίθμου, στη διαδικασία επιλογής βάρδιας, και μελέτησαν τα αποτελέσματα έξι εναλλακτικών δεικτών προτεραιότητας βάρδιας/βαρδιών σε σχέση με την απόδοση του αλγορίθμου. Οι εναλλακτικοί δείκτες αναπτύχθηκαν βάσει της δομής του προβλήματος MSP και των στόχων του Αλγορίθμου-LL. Οι παραπάνω συγγραφείς έδειξαν αναλυτικά ότι τρεις από τους νέους δείκτες (συγκεκριμένα οι UM, MUM και MMI) οδηγούν πάντα στις ίδιες αλγοριθμικές αποφάσεις, και κατά συνέπεια θεωρούνται ως ισοδύναμοι. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών έδειξαν ότι η απόδοση του αλγορίθμου επηρεάζεται σημαντικά από το χρησιμοποιούμενο δείκτη προτεραιότητας. Παρόλα αυτά, είναι πιο σημαντικό το γεγονός ότι ένας από τους νέους δείκτες ξεπέρασε πολλές φορές όλους τους άλλους (συμπεριλαμβανομένου και αυτού που χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην πρώιμη μορφή του αλγορίθμου), γεγονός που δείχνει άμεσα ότι αυτή η τροποποίηση βελτιώνει την απόδοση του Αλγορίθμου-LL.

Σύμφωνα με τους Lagodimos and Paravantis (2003), η μελέτη του προβλήματος MSP είναι ακόμα σε αρχικά στάδια. Φυσικά, απαιτείται πολλή περαιτέρω έρευνα όσον αφορά στη διατύπωση και στη λύση του προβλήματος. Δεν πρέπει να ξεχνά κανείς βέβαια ότι το MSP, όπως διαμορφώθηκε, ισχύει απλά τμήματα συσκευασίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα τμήματα συσκευασίας μπορούν να αποκτήσουν αρκετά σύνθετες δομές, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να εμπλουτιστεί και να βελτιωθεί το μοντέλο MSP, ώστε να επεκταθεί η δυνατότητα εφαρμογής του. Σε αυτό το πλαίσιο, χρήσιμη θα ήταν η χρήση λιγότερο ευέλικτου εργατικού δυναμικού και η επιβολή περιορισμών στην ταυτόχρονη λειτουργία όλων των γραμμών συσκευασίας. Εξίσου σημαντική και επιτακτική είναι η εισαγωγή μιας δομής κόστους, που θα διαφοροποιεί το κόστος του εργατικού δυναμικού μεταξύ των βαρδιών, κάτι που ισχύει πρακτικά σε όλες τις βιομηχανίες παραγωγής που λειτουργούν με πολλαπλές βάρδιες.

Το μοντέλο EMSP-O

Γενικά

Το πρόβλημα προγραμματισμού, που μελετήθηκε από τους Lagodimos και Mihiotis (2004), προκύπτει στο στάδιο της συσκευασίας κατά την παραγωγή σε διάφορες βιομηχανίες και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα συσκευασίας. Ο Οικονομικός Προγραμματισμός Βαρδιών (Εργασίας) με Υπερωρίες, επιδιώκει τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού και των υπερωριών σε κάθε διαθέσιμη βάρδια κάθε εργάσιμης ημέρας, έτσι ώστε να εκπληρώνονται οι στόχοι της παραγωγής στα πλαίσια ενός δεδομένου χρονικού ορίζοντα με ελάχιστο κόστος. Ξεκινώντας από ένα πρακτικό δίλημμα προγραμματισμού σχετικά με τη χρήση της υπερωρίας, ερευνάται η βέλτιστη πολιτική προγραμματισμού σε συνδυασμό με την απόδοση δύο πρακτικών πολιτικών. Αναπτύσσεται ένα μοντέλο Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βέλτιστης πολιτικής. Δεδομένου ότι το πρόβλημα αποδεικνύεται ότι είναι NP-hard, οι βέλτιστες πολιτικές βρέθηκαν χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης διαθέσιμο στο εμπόριο. Οι βέλτιστες συνθήκες των πρακτικών πολιτικών ελήφθησαν από υπάρχοντες ευρετικούς αλγορίθμους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποτελεσματική χρήση της υπερωρίας οδηγεί σε μειώσεις του εργατικού δυναμικού και στη βελτιωμένη υλοποίησή του. Σε πολλές περιπτώσεις, παρατηρείται μεταξύ υπερωρίας και υλοποίησης εργατικού δυναμικού μια ιδιότητα «όλα ή τίποτα» στη βέλτιστη λύση. Τέλος, αποδεικνύεται ότι, όταν οι πρακτικές πολιτικές προγραμματισμού χρησιμοποιούνται αδιάκριτα μπορούν να έχουν σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις.

Δύο ήταν οι κύριοι στόχοι της αριθμητικής έρευνας που πραγματοποίησαν οι Lagodimos and Mihiotis (2004) σε σχέση με το πρόβλημα προγραμματισμού του τμήματος συσκευασίας: να κατανοηθεί η συμπεριφορά της βέλτιστης πολιτικής και να εξεταστεί η απόδοση των εναλλακτικών πρακτικών πολιτικών προγραμματισμού περιορίζοντας τη χρήση της υπερωρίας.

Όσον αφορά στο μοντέλο EMSP-O, οι Lagodimos and Mihiotis (2004) ασχολήθηκαν αρχικά με τη μορφή και τη δομή της βέλτιστης πολιτικής (OPT). Με δεδομένο κάποιο πρόβλημα, τις συνθήκες του και τους περιορισμούς του, αναζήτησαν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η υπερωρία προτιμάται επί της πρόσθετης κανονικής βάρδιας και τι επηρεάζει αυτήν την απόφαση. Ερευνάται αν ο προγραμματισμός υπερωρίας επί της κανονικής βάρδιας, είναι η δύσκολη διλημματική απόφαση, που αποτελεί και το δίλημμα του αρμόδιου για τον προγραμματισμό (δηλαδή να χρησιμοποιηθεί μία περίπτωση από τις δύο) ή αν είναι δυνατό να συνυπάρχουν ταυτόχρονα και οι δύο περιπτώσεις στη βέλτιστη λύση (δηλαδή στο OPT). Στην τελευταία περίπτωση, είναι πολύ σημαντικό να καθοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο της απαιτούμενης υπερωρίας, ιδιαίτερα σε σχέση με το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (unutilised workforce) στη βέλτιστη λύση. Κατά συνέπεια, πρέπει να ερευνηθεί κατά πόσο μπορεί να συνυπάρξει υπερωριακή εργασία και μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό. Η διερεύνηση της άποψης αυτής μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη πρακτικών κανόνων προγραμματισμού, ιδιαίτερα χρήσιμους σε μικρού (ή ακόμα και μεσαίου) μεγέθους επιχειρήσεις, που χρησιμοποιούν ελάχιστα έως καθόλου τέτοιου είδους αναλυτικά εργαλεία προγραμματισμού, ακόμα και αν αυτά είναι διαθέσιμα.

Ο δεύτερος στόχος της έρευνας των Lagodimos and Mihiotis (2004) είναι να εξεταστούν, μεταξύ όλων των πιθανών πρακτικών πολιτικών προγραμματισμού που μπορούν να υπάρξουν, δύο ακραίες πολιτικές: καθόλου υπερωρία (No OVertime ή NOV) και πλήρης υπερωρία (Full OVertime ή FOV). Η έννοια αυτών των πολιτικών είναι σαφώς ορισμένη. Η NOV απαγορεύει εξ ολοκλήρου οποιαδήποτε χρήση υπερωρίας, στηριζόμενη στο γεγονός ότι η υπερωρία είναι μια ακριβή επιλογή που πρέπει να αποφεύγεται. Αντίθετα, η FOV υπαγορεύει ότι στα πλαίσια του διλήμματος του αρμόδιου για τον προγραμματισμό, η υπερωρία πρέπει να προτιμάται πάντα επί του προγραμματισμού μιας πρόσθετης βάρδιας. Διαφορετικά δεν επιτρέπεται άλλη χρήση της υπερωρίας με βάση τη FOV. Φυσικά, για να μπορεί να εφαρμοστεί η FOV, είναι απαραίτητο για μια επιχείρηση να λειτουργεί με σταθερό αριθμό βαρδιών ανά εργάσιμη ημέρα. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι μια πολιτική αρκετά παρόμοια με τη FOV χρησιμοποιήθηκε στην πραγματικότητα από μια επιχείρηση επεξεργασμένων τροφίμων, στην οποία απασχολήθηκε στο παρελθόν ο πρώτος συγγραφέας της εν λόγω μελέτης (Lagodimos and Mihiotis, 2004). Το σχετικό κόστος και η απόδοση αυτών των πολιτικών υπό τις βέλτιστες συνθήκες τους, τόσο μεταξύ τους, όσο και έναντι της βέλτιστης λύσης (OPT), περιλαμβάνεται και περιγράφεται επίσης στην έρευνά τους.

Παρατηρήσεις

Οι πολιτικές αυτές λειτουργούν υπό διαφορετικές βέλτιστες συνθήκες. Στο πλαίσιο πάντα του EMSP-O, η πολιτική NOV είναι μια ειδική περίπτωση αυτού του μοντέλου με πολύ μεγάλη υπερωριακή αμοιβή. Υπό αυτές τις συνθήκες, δεν μπορεί να υπεισέλθει υπερωρία στη βέλτιστη λύση OPT. Εντούτοις, η FOV δεν μπορεί να θεωρηθεί άμεσα ως ειδική περίπτωση του μοντέλου EMSP-O. Προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες της FOV, το αρχικό πρόβλημα πρέπει να αποσυντεθεί σε δύο ξεχωριστά υποπροβλήματα: ένα στο οποίο επιδιώκεται η εύρεση της βέλτιστης πολιτικής NOV για το τμήμα του φορτίου εργασίας που δεν υπερβαίνει το σταθερό αριθμό βαρδιών και ένα άλλο στο οποίο όλο το υπερβάλλον φορτίο παραγωγής (overload) όλων των γραμμών καλύπτεται με υπερωρία. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στις βέλτιστες συνθήκες για τις δύο πολιτικές NOV και FOV, δεν χρησιμοποιούνται πάντα όλες οι παράμετροι του μοντέλου EMSP-O (αφού για παράδειγμα στην πολιτική FOV δεν υπάρχει καν δεύτερη βάρδια).

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η FOV θα είναι μια βιώσιμη (δηλαδή εφικτή) πολιτική για όλα τα προβλήματα των δοκιμών, απαιτείται τουλάχιστον μια γραμμή συσκευασίας με φορτίο παραγωγής που υπερβαίνει την παραγωγική δυναμικότητα μιας βάρδιας (δηλαδή να προκύπτει υπερβάλλον φορτίο παραγωγής. Για αυτό το λόγο, κατά την επιλογή της κατανομής του φορτίου παραγωγής, ορισμένες γραμμές παρουσιάζουν υπερβάλλον φορτίο παραγωγής, δηλαδή υπερφόρτωση, και στο χαμηλό (L) και στο υψηλό (H) επίπεδο φορτίου παραγωγής. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, για την περίπτωση ίδιου (κανονικού) μισθού (identical regular remuneration rate) (επίπεδο I) αντιστοιχεί σε μια επιχείρηση που λειτουργεί κανονικά κατά την διάρκεια της πρωινής βάρδιας και αντιμετωπίζει το δίλημμα της εισαγωγής μιας απογευματινής βάρδιας. Η εναλλακτική περίπτωση (επίπεδο U) αντιπροσωπεύει το ίδιο δίλημμα, αλλά για την εισαγωγή νυχτερινής βάρδιας (που είναι φυσικά πιο ακριβή).

Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Lagodimos and Mihiotis (2004) μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη προσεγγιστικών ευρετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος EMSP-O. Είναι σαφές πια ότι η γνώση ή η δυνατότητα να καθοριστεί εκ των προτέρων η μορφή της βέλτιστης πολιτικής για οποιεσδήποτε συνθήκες του προβλήματος είναι σημαντική προϋπόθεση. Αν και απαιτείται περαιτέρω θεωρητική εργασία για αυτό το ζήτημα, η σχετική απόδοση των πολιτικών NOV και FOV σε σχέση με τη μορφή της βέλτιστης πολιτικής (OPT) αποτελεί μια καλή αφετηρία. Έτσι, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένας ευρετικός αλγόριθμος, ο οποίος να μπορεί αρχικά να καθορίσει τις λύσεις για τη NOV και τη FOV και στη συνέχεια να αποφασίσει τη μορφή OPT με βάση τη σχέση κόστους μεταξύ αυτών των πολιτικών (δηλαδή να επιλέξει την πολιτική που αντιστοιχεί στο ελάχιστο κόστος).

Με βάση την παραπάνω λογική, εάν διαπιστωνόταν ότι μια πολιτική 1S (μία βάρδια) ήταν καλύτερη, ο εν λόγω ευρετικός αλγόριθμος θα μπορούσε να ξεκινήσει με την πολιτική FOV και στη συνέχεια να εισάγει βαθμιαία υπερωρία (για να καλύψει το υπερβάλλον φορτίο παραγωγής) στην πρώτη βάρδια, έως ότου να μην είναι περαιτέρω εφικτή η μείωση του συνολικού κόστους. Αντίθετα, η πολιτική NOV συνιστά ένα πολύ καλό πρώτο βήμα, τουλάχιστον για τα προβλήματα με ίδιο (κανονικό) μισθό του εργατικού δυναμικού σε όλες τις βάρδιες. Συνεπώς, αρχίζοντας από τη NOV, ο ευρετικός αλγόριθμος θα μπορούσε να προσπαθήσει να βελτιώσει αυτήν την αρχική λύση με εισαγωγή υπερωρίας, χρησιμοποιώντας την ιδιότητα «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing), που φαίνεται να συνδέει την υπερωρία και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό στη βέλτιστη λύση. Έτσι, ο αλγόριθμος αυτός θα μπορούσε να δώσει γενικά αποδεκτές προσεγγίσεις για όλες τις περιπτώσεις.

Με τον όρο «all-or-nothing» οι εν λόγω συγγραφείς περιγράφουν την πλήρη υποκατάσταση που μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταξύ των δύο μεγεθών, δηλαδή του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού και της υπερωριακής εργασίας. Η υποκατάσταση αυτή φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους εργασίας και στην πιο παραγωγική χρήση των διαθέσιμων πόρων (εργάτες). Πιο συγκεκριμένα, μπορεί ένα μέρος του εργατικού δυναμικού, ενώ έχει προγραμματιστεί να εργαστεί κανονικά σε κάποια βάρδια για ένα ορισμένο χρονικό ορίζοντα, να μην απασχολείται παραγωγικά (δηλαδή να εκτελεί κάποια εργασία) σε όλο το χρονικό ορίζοντα. Το γεγονός αυτό ισοδυναμεί με μειωμένη εκμετάλλευση της παραγωγικής ικανότητας, που οδηγεί σε αύξηση του κόστους της κανονικής εργασίας και τελικά σε αύξηση του συνολικού κόστους. Συνεπώς, είναι προτιμότερο αντί να υπάρχει ένας σταθερός αριθμός κανονικών εργατών ανά βάρδια, που μπορεί να μείνει ανεκμετάλλευτος και αυξάνει το κόστος, να προγραμματιστεί να εργαστούν υπερωριακά τόσοι εργάτες όσοι ακριβώς απαιτούνται.

Για να γίνει αντιληπτό το παραπάνω θα αναφερθεί ένα απλό και σύντομο αριθμητικό παράδειγμα. Έστω ότι μια παραγωγική μονάδα προγραμματίζεται να δουλέψει 10 συνεχόμενες ημέρες, με 2 οκτάωρες βάρδιες ανά ημέρα, ενώ στην βάρδια θα εργαστούν κανονικά τουλάχιστον 5 εργάτες (αμοιβή κανονικής εργασίας 1 χρηματική μονάδα ανά ώρα και αμοιβή υπερωρίας 1,5 χ.μ.α.ώ.). Αν οι ανάγκες της μονάδας είναι λιγότερες από $10 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5 = 800$ εργατοώρες, για παράδειγμα 480 εργατοώρες, συμφέρει από οικονομικής απόψεως, αντί να εργαστούν κανονικά και τις 10 ημέρες και στις 2 βάρδιες 5 εργάτες (κόστος $800 \cdot 1 = 800$ χρηματικές μονάδες), να εργαστούν κανονικά 5 εργάτες στην πρώτη βάρδια ($10 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 5 = 400$ εργατοώρες με κόστος $400 \cdot 1 = 400$ χ.μ.) και από αυτούς ένας να εργαστεί μετά το πέρας της πρώτης βάρδιας και υπερωριακά, εφόσον αυτό είναι εφικτό, για να καλύψει τις ανάγκες (10·1·8·1=80 εργατοώρες με κόστος 80·1,5=120 χ.μ., άρα συνολικό κόστος 400+120=520<800 χ.μ.). Αν εργαστούν κανονικά και οι 5 εργάτες στη δεύτερη βάρδια, δημιουργείται πλεόνασμα εργατικού δυναμικού (800-480=320 εργατοώρες, δηλαδή παρατηρείται μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (οι 320 εργατοώρες αντιστοιχούν σε 4 εργάτες). Σύμφωνα με την ιδιότητα «all-or-nothing» φαίνεται να συμφέρει σε ορισμένες περιπτώσεις η πλήρης υποκατάσταση όλων των κανονικών εργατών που δεν χρησιμοποιούνται παραγωγικά (δηλαδή των τεσσάρων) από έναν απαιτούμενο αριθμό εργατών που θα εργαστούν υπερωριακά (δηλαδή του ενός). Η ιδιότητα αυτή θα διερευνηθεί εκτενώς στην παρούσα εργασία.

Οι Lagodimos και Mihiotis (2004) ακολούθησαν μια διερευνητική προσέγγιση, η οποία βασίστηκε στην ανάλυση ενός συγκεκριμένου μοντέλου ILP, το οποίο που αναπτύχθηκε για αυτόν το λόγο. Το εν λόγω μοντέλο αποτελεί μια επέκταση ενός αρχικού μοντέλου, το οποίο δεν επέτρεπε τη χρήση υπερωρίας. Στη μορφή που πρότειναν οι παραπάνω συγγραφείς, το μοντέλο EMSP-O ισχύει αυστηρά για τα απλά τμήματα συσκευασίας, όπου το εργατικό δυναμικό είναι ο μόνος κοινός πόρος στις γραμμές συσκευασίας κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Ενώ η συνθήκη αυτή ανταποκρίνεται αρκετά στην πραγματικότητα, απαιτούνται πρόσθετοι περιορισμοί για την προσαρμογή του μοντέλου σε πιο σύνθετα τμήματα συσκευασίας. Εντούτοις, ακόμη και με αυτήν τη μορφή, οι συγκεκριμένοι συγγραφείς απέδειξαν ότι το EMSP-O είναι NP-hard, και κατά συνέπεια πρέπει αναπόφευκτα να στηριχθεί σε προσεγγιστικές λύσεις.

Επίσης, εκτελέστηκε μια έρευνα προκειμένου να ερευνηθεί η συμπεριφορά της βέλτιστης πολιτικής προγραμματισμού. Ένα από τα κυριότερα ευρήματα της έρευνας αφορά στη μορφή της βέλτιστης πολιτικής σε σχέση με τον προγραμματισμένο αριθμό κανονικών βαρδιών ανά εργάσιμη ημέρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν καθαρά ότι αυτός ο αριθμός δεν μπορεί να καθοριστεί εξωγενώς (δηλαδή να αποτελέσει δεδομένο του προβλήματος), αλλά εξαρτάται αυστηρά από τις συνθήκες λειτουργίας του τμήματος συσκευασίας. Επίσης, παρόλα αυτά, η χρησιμοποίηση όλων των διαθέσιμων βαρδιών σε μια εργάσιμη ημέρα παρέχει πρόσθετη ευελιξία στον προγραμματισμό, και κατά συνέπεια η ευελιξία αυτή μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του (κανονικού) εργατικού δυναμικού και στη βελτίωση της παραγωγικής εκμετάλλευσής του ακόμη και χωρίς την χρήση υπερωρίας.

Όσον αφορά στη χρήση υπερωρίας, τα αποτελέσματά των Lagodimos and Mihiotis (2004) έδειξαν ότι η σημαντικότερη επίδραση του προγραμματισμού υπερωρίας είναι η άμεση μείωση του (κανονικού) εργατικού δυναμικού που απαιτείται υπό κανονικές συνθήκες. Παράλληλα, παρατηρείται η βελτιωμένη παραγωγική εκμετάλλευση του εργατικού δυναμικού και το μειωμένο συνολικό κόστος εργασίας. Εντούτοις, σημαντικότερη είναι η σχέση «όλα ή τίποτα», που παρατηρείται και συνδέει την υπερωρία και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό στη βέλτιστη λύση. Αν και η γενική ιδιότητα αυτή εμφανίστηκε να ισχύει μόνο για ίδια ποσά αμοιβής του εργατικού δυναμικού μεταξύ των βαρδιών, φαίνεται να ισχύει περίπου και στις περισσότερες περιπτώσεις. Ακόμα, ερευνήθηκε η απόδοση σε οικονομικούς όρους δύο πρακτικών πολιτικών προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοσή τους είναι ο αριθμός βαρδιών ανά εργάσιμη ημέρα, ο οποίος χρησιμοποιείται στη βέλτιστη λύση και, ανάλογα με αυτόν τον παράγοντα, η εσφαλμένη εφαρμογή των πολιτικών μπορεί να έχει σοβαρές οικονομικές συνέπειες.

Γενικά, η έρευνα των Lagodimos and Mihiotis (2004) παρέχει διορατικότητα στη λύση του EMSP-O. Όμως υπάρχει έδαφος για πολλή περαιτέρω έρευνα. Στο πλαίσιο αυτό, μια νέα έρευνα θα μπορούσε να προσπαθήσει να υποστηρίξει και θεωρητικά μερικά από τα αποτελέσματα της έρευνάς τους. Η γενικότητα της ιδιότητας «όλα ή τίποτα» εμφανίζεται ως ισχυρό υποψήφιο θέμα για μια τέτοια έρευνα. Επίσης, σημαντική είναι η ανάπτυξη αποτελεσματικών κάτω φραγμάτων και ευρετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος. Ενώ, στην εν λόγω έρευνα παρουσιάστηκαν γενικές ιδέες για έναν πιθανό ευρετικό αλγόριθμο, απαιτείται περαιτέρω εργασία στην πραγματικότητα για την εφαρμογή του. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που απαιτείται από εμπορικά προγράμματα βελτιστοποίησης (όπως το LINGO) για να φθάσουν σε μια αποδεκτή λύση, ακόμα και για σχετικά απλά προβλήματα, μόνο εάν δημιουργηθούν αποτελεσματικοί ευρετικοί αλγόριθμοι, προσιτοί στις επιχειρήσεις, μπορεί κανείς να εξετάσει την εφαρμογή αυτών των εργαλείων προγραμματισμού στη βιομηχανία (ιδιαίτερα στις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1. Αντικειμενικοί Στόχοι Έρευνας

Ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας είναι η αναλυτική μελέτη του πολύπλοκου προβλήματος του Οικονομικού Προγραμματισμού Βαρδιών (Εργασίας) με Υπερωρίες, ένα πρόβλημα με το οποίο ασχολήθηκαν αρχικά οι Lagodimos and Mihiotis (2004). Οι εν λόγω ερευνητές στην εργασία τους κατέληξαν σε ομολογουμένως πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα παρουσίασαν τη μορφή και τη δομή μιας βέλτιστη λύσης, η οποία προέκυψε από την επίλυση ενός μοντέλου ILP με τη βοήθεια ενός γνωστού προγράμματος βελτιστοποίησης και σύγκριναν αυτή τη λύση με τις λύσεις που προκύπτουν ταχύτατα από κάποιους ευρετικούς αλγορίθμους που δημιούργησαν. Στην παρούσα εργασία θα ερευνηθεί η μορφή και η δομή των λύσεων που προτάθηκαν, καθώς και αν αυτές οι λύσεις παρουσιάζουν κάποιες γενικές ιδιότητες και λογικές συσχετίσεις. Αναζητά, συνεπώς, αυτή η εργασία να δώσει μια λογική εξήγηση της δομής των λύσεων και να βρεθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δομή αυτή. Μια συγκεκριμένη γενική ιδιότητα που αποτελεί βασικό στόχο έρευνας είναι η ιδιότητα «όλα ή τίποτα», που φαίνεται να συνδέει την υπερωρία και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό στη βέλτιστη λύση. Οι Lagodimos and Mihiotis (2004) τείνουν προς το συμπέρασμα ότι η χρήση υπερωρίας έχει ως αποκλειστικό στόχο την πλήρη παραγωγική εκμετάλλευση του εργατικού δυναμικού, αλλιώς η χρήση της δεν συμφέρει από οικονομικής άποψης. Η ορθότητα αυτού του συμπεράσματος θα τεκμηριωθεί θεωρητικά σε αυτή την εργασία.

Οι Lagodimos and Mihiotis (2004), πραγματοποίησαν κάποιες παρατηρήσεις και κατέληξαν σε ορισμένα συμπεράσματα για την απόδοση των ακραίων πολιτικών NOV (No OVertime) και FOV (Full OVertime), που οι ίδιοι εισήγαγαν. Σε αυτή την διπλωματική εργασία, θα ερευνηθούν εκτενώς οι παράγοντες που καθορίζουν πότε οι λύσεις των πολιτικών αυτών είναι βέλτιστες σε σχέση με μια γνωστή βέλτιστη λύση (OPTimal), υπό συνθήκες ίδιου και διαφορετικού κόστους μεταξύ δύο βαρδιών. Στόχος είναι η βελτίωση του ευρετικού αλγορίθμου που ανέπτυξαν οι παραπάνω συγγραφείς, ο οποίος παρέχει τις λύσεις σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν λεπτομερείς προτάσεις προς αυτή την κατεύθυνση.

Τέλος, θα τονιστεί η ανάγκη της επέκτασης και της γενίκευσης του ευρετικού αλγορίθμου. Με αυτό τον τρόπο, η εφαρμογή και η χρήση του σε πρακτικά προβλήματα σε πραγματικές συνθήκες στη βιομηχανία θα είναι πιο άμεση.

3.2. Το Μοντέλο

3.2.1. Δομή Μοντέλου

Αρχικά, θα παρουσιαστεί η μορφή του προβλήματος που μελετάται, δηλαδή το πρόβλημα του Οικονομικού Προγραμματισμού Βαρδιών (Εργασίας) με Υπερωρίες, όπως ονομάστηκε. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω συμβολισμός:

D αριθμός ημερών στο χρονικό ορίζοντα

N αριθμός γραμμών στο τμήμα συσκευασίας

P αριθμός διαθέσιμων βαρδιών σε μια εργάσιμη μέρα

a_i επάνδρωση με εργατικό δυναμικό (manning) (δηλαδή οι ημι-ειδικευμένοι εργάτες που απαιτούνται για τη λειτουργία της γραμμής i)

w_i φορτίο παραγωγής (production load) της γραμμής i (σε περιόδους)

c_k (κανονικός) μισθός (regular remuneration rate) για εργασία στη βάρδια k για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα

r υπερωριακή αμοιβή (overtime premium) (η επί τις % αύξηση του (κανονικού) μισθού)

ρ μέγιστη επιτρεπτή υπερωριακή εργασία (το ποσοστό επί τις % της προγραμματισμένης κανονικής εργασίας)

X_k εργατικό δυναμικό προγραμματισμένο για κανονική εργασία στη βάρδια k

Y_k υπερωριακή εργασία προγραμματισμένη στη βάρδια k (σε εργατο-περιόδους)

Ένα τμήμα συσκευασίας λειτουργεί μέχρι και P διαδοχικές βάρδιες ανά εργάσιμη ημέρα και έχει προγραμματιστεί να λειτουργήσει για ένα χρονικό ορίζοντα D ημερών. Το τμήμα αποτελείται από N ανεξάρτητες γραμμές συσκευασίας. Κάθε γραμμή i χρειάζεται σταθερό εργατικό δυναμικό a_i για τη λειτουργία της και πρέπει να ολοκληρώσει ένα συγκεκριμένο φορτίο παραγωγής w_i. Το καθημερινό ποσοστό αμοιβής για τη βάρδια k είναι c_k/D για την κανονική εργασία και $c_k(1+r)/D$ για υπερωριακή εργασία αντίστοιχα. Ο στόχος είναι να βρεθεί το πρόγραμμα, που εξασφαλίζει ότι όλες οι γραμμές θα ολοκληρώσουν το φορτίο παραγωγής τους μέσα στο δεδομένο χρονικό ορίζοντα και που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του εργατικού δυναμικού.

Σύμφωνα με την περιγραφή του EMSP-O, κάθε γραμμή συσκευασίας i έχει ένα ξεχωριστό φορτίο παραγωγής w_i, που δίνεται σε περιόδους (δηλαδή συνδυασμοί βάρδιας και ημέρας, που όλοι αντιστοιχούν σε οκτάωρα) και μπορεί να λειτουργήσει έως PD περιόδους. Επομένως, πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι $w_i \le PD$ για κάθε i, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι προγραμματισμός θα είναι εφικτός. Επίσης, γίνονται οι εξής υποθέσεις:

1. Το εργατικό δυναμικό είναι ευέλικτο και μπορεί να εργαστεί σε οποιαδήποτε γραμμή.
2. Το εργατικό δυναμικό απασχολείται για την κανονική εργασία σε μία και την αυτή βάρδια κάθε ημέρα σε ολόκληρο τον ορίζοντα προγραμματισμού.
3. Το εργατικό δυναμικό που δεν απασχολείται για κανονική εργασία σε κάποια συγκεκριμένη βάρδια θεωρείται διαθέσιμο για υπερωριακή εργασία σε αυτήν την βάρδια.
4. Οι γραμμές, σε οποιαδήποτε περίοδο, μπορούν να λειτουργήσουν είτε κανονικά είτε υπερωριακά (όχι και τα δύο).

Οι μεταβλητές απόφασης παρουσιάζονται παρακάτω:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{αν η γραμμή } i \text{ χρησιμοποιηθεί κανονικά στη βάρδια } k \text{ της ημέρας } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{αν η γραμμή } i \text{ χρησιμοποιηθεί κανονικά στη βάρδια } k \text{ της ημέρας } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Το πρόβλημα EMSP-O παρουσιάζεται από το εξής μοντέλο ILP:

ελαχιστοποίηση της συνάρτησης: $C = \sum_{k=1}^{P} c_k \left(X_k + \frac{1+r}{D} Y_k \right)$

υπό τους παρακάτω περιορισμούς:

$$Y_k - \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{D} a_i y_{ijk} = 0 \qquad (k = 1,...,P) \tag{1}$$

$$X_k - \sum_{i=1}^{N} a_i x_{ijk} \geq 0 \qquad (k = 1,...,P \ \textit{και} \ j = 1,...,D) \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{s=1 \\ s \neq k}}^{P} X_s - \sum_{i=1}^{N} a_i y_{ijk} \geq 0 \qquad (k = 1,...,P \ \textit{και} \ j = 1,...,D) \tag{3}$$

$$rD\sum_{k=1}^{P} X_k - \sum_{k=1}^{P} Y_k \geq 0 \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{D}\sum_{k=1}^{P} \left(x_{ijk} + y_{ijk}\right) = w_i \qquad (i = 1,...,N) \tag{5}$$

$$x_{ijk} + y_{ijk} \leq 1 \qquad (i = 1,...,N \ \textit{και} \ j = 1,...,D \ \textit{και} \ k = 1,...,P) \tag{6}$$

$$x_{ijk}, y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k \qquad (i = 1,...,N \ \textit{και} \ j = 1,...,D \ \textit{και} \ k = 1,...,P) \tag{7}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση αντιπροσωπεύει σαφώς το συνολικό άμεσο κόστος του εργατικού δυναμικού σε όλες τις βάρδιες μιας εργάσιμης ημέρας. Σε κάθε βάρδια, το κόστος αυτό αποτελείται από δύο μέρη: το κόστος κανονικής εργασίας, που συνδέεται με το συνολικό εργατικό δυναμικό που προγραμματίστηκε και το κόστος υπερωριακής εργασίας, που σχετίζεται με τις ακριβείς εργατο-περιόδους υπερωρίας που προγραμματίστηκαν.

Το σύνολο περιορισμών (1) καθορίζει απλά τη συνολική υπερωριακή εργασία σε κάθε βάρδια, ενώ το σύνολο περιορισμών (2) εξασφαλίζει ότι το εργατικό δυναμικό, που προγραμματίζεται σε κάθε βάρδια, αντιστοιχεί στο μέγιστο εργατικό δυναμικό που χρησιμοποιείται σε αυτήν τη βάρδια σε οποιαδήποτε ημέρα του ορίζοντα προγραμματισμού. Το σύνολο περιορισμών (3) περιορίζει το διαθέσιμο εργατικό δυναμικό για υπερωριακή εργασία σε οποιαδήποτε βάρδια στο συνολικό εργατικό δυναμικό που προγραμματίζεται σε όλες τις άλλες βάρδιες (κάποιος εργάτης δεν μπορεί να εργαστεί υπερωριακά στη βάρδια που απασχολείται κανονικά). Το σύνολο περιορισμών (4) καθορίζει ένα όριο στο ποσοστό της υπερωριακής εργασίας επί της κανονικής εργασίας για τον ολόκληρο τον ορίζοντα προγραμματισμού. Το σύνολο περιορισμών (5) εξασφαλίζει ότι ο αριθμός περιόδων για τις οποίες κάθε γραμμή προγραμματίζεται να λειτουργήσει είναι ίσος με το προκαθορισμένο φορτίο παραγωγής της, ενώ το σύνολο περιορισμών (6) εξασφαλίζει ότι καμία γραμμή δεν μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα και κανονικά και υπερωριακά. Τέλος, το σύνολο περιορισμών (7) εξασφαλίζει ότι όλες οι μεταβλητές απόφασης είναι δυαδικές 0 – 1.

Ένα αξιοσημείωτο στοιχείο, είναι η χρήση μόνο του άμεσου κόστους του εργατικού δυναμικού στην αντικειμενική συνάρτηση του EMSP-O. Σε αντίθεση με τα μοντέλα γενικού προγραμματισμού, όπου ο στόχος είναι ο προσδιορισμός των στόχων παραγωγής, το EMSP-O έχει δεδομένους στόχους παραγωγής και στοχεύει στον καθορισμό του εργατικού δυναμικού, που απαιτείται σε κάθε βάρδια μιας εργάσιμης ημέρας για να τους ικανοποιήσει με ελάχιστο κόστος. Επομένως, οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε αυτό το επίπεδο, δεν μπορούν να επηρεάσουν τα αποθέματα (αφού αυτά καθορίζονται αποτελεσματικά μέσω των στόχων παραγωγής, που τίθενται σε υψηλότερα επίπεδα προγραμματισμού). Συνεπώς, το αντίστοιχο κόστος τους δεν χρειάζεται να υπεισέλθει στην αντικειμενική συνάρτηση. Επίσης, έχει υποστηριχτεί ότι, λόγω της φύσης πολλών προϊόντων των τμημάτων συσκευασίας (π.χ. προϊόντα με σχετικά σύντομη ζωή στο ράφι, ογκώδη ή εποχιακά προϊόντα), τα αποθέματα είναι περιορισμένης χρήσης για την εξομάλυνση της παραγωγής. Άρα, και πάλι, δεν χρειάζεται να υπεισέλθει αυτό το κόστος στην αντικειμενική συνάρτηση, ούτε καν στο επίπεδο γενικού προγραμματισμού (βλέπε επίσης van Dam et al.,1998 και Buxey, 2003 για μια γενικότερη συζήτηση).

Αναφορικά με τη δομή του μοντέλου που εισάγεται στο LINGO, είναι αξιοσημείωτο ότι το μοντέλο ILP αποτελείται από 404 μεταβλητές, εκ των οποίων οι 400 είναι ακέραιες, και 254 περιορισμούς. Στο σύνολό του το μοντέλο διαθέτει 254 γραμμές κώδικα.

Σε αυτό το σημείο, θα παρουσιαστεί η φυσική σημασία και η ερμηνεία των μεταβλητών του προβλήματος, με μια ιδιότητα. Για μια οποιαδήποτε εφικτή λύση του EMSP-O, ισχύει ότι:

$$L = R + O - U \qquad (8)$$

όπου:

$$L = \frac{1}{D}\sum_{k=1}^{P}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{D} a_i \left(x_{ijk} + y_{ijk} \right) ,$$

$$R = \sum_{k=1}^{P} X_k ,$$

$$O = \frac{1}{D}\sum_{k=1}^{P} Y_k ,$$

$$U = \sum_{k=1}^{P} X_k - \frac{1}{D}\sum_{k=1}^{P}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{D} a_i x_{ijk}$$

Ο όρος R αντιπροσωπεύει το συνολικό προγραμματισμένο (κανονικό) εργατικό δυναμικό, ενώ οι υπόλοιποι όροι αντιπροσωπεύουν το αντίστοιχο συνολικό φορτίο εργασίας (L), τη συνολική υπερωριακή εργασία (O) και το συνολικό μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U). Όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε ισοδύναμες μονάδες πλήρους απασχόλησης (regular manpower equivalent units) (δηλαδή πολλαπλάσια του *D*, τα οποία αντιστοιχούν στην κανονική εργασία ενός ατόμου κατά την διάρκεια ολόκληρου του ορίζοντα προγραμματισμού). Η σχέση (8) επιτρέπει την ερμηνεία του EMSP-O με φυσικούς όρους και αποδεικνύεται ως εξής: Λαμβάνοντας υπόψη οποιοδήποτε φορτίο εργασίας του τμήματος, οποιαδήποτε εφικτή λύση, αποτελείται από κανονική εργασία και υπερωριακή εργασία. Αυτό δημιουργεί επίσης ένα βαθμό μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (δηλαδή υπάρχουν εργάτες που πληρώνονται, αλλά δεν χρησιμοποιούνται παραγωγικά στην πραγματικότητα). Ό,τι χειρότερο δηλαδή μπορεί να παρατηρηθεί με λανθασμένο προγραμματισμό. Η βέλτιστη λύση του EMSP-O επιτυγχάνει πρακτικά την εναλλαγή του κόστους μεταξύ αυτών των φυσικών οντοτήτων.

Ένα άλλο ζήτημα αφορά στις υποθέσεις του μοντέλου. Όπως διατυπώνεται το EMSP-O, ισχύει για τον προγραμματισμό των απλών τμημάτων συσκευασίας, υπό την έννοια ότι όλες οι γραμμές έχουν ξεχωριστά φορτία παραγωγής και δεν υπάρχει άλλος περιορισμός στους πόρους. Αυτές οι υποθέσεις θα πρέπει να γίνουν πιο «χαλαρές», ώστε το μοντέλο να ισχύσει για γενικότερα τμήματα. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι χρησιμοποιούμενες υποθέσεις περί υπερωρίας αντιστοιχούν επίσης σε ένα γενικό επίπεδο προγραμματισμού. Απαιτούνται πρόσθετοι περιορισμοί για την αντιμετώπιση είτε των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού, είτε κατανομής (βλέπε Abernathy et al.,1973 για μια χαρακτηριστική ιεραρχία προγραμματισμού εργατικού δυναμικού).

3.2.2. Γενικές παρατηρήσεις

Όσον αφορά στη δομή του μοντέλου, το EMSP-O είναι ένα πρόβλημα ανάθεσης, όπου κάθε λύση καθορίζει αποτελεσματικά τη λειτουργία όλων των γραμμών συσκευασίας σε περιόδους. Κάθε ανάθεση χαρακτηρίζεται από μια απόφαση σχετικά με τον τρόπο που επιλέγεται να λειτουργήσει η αντίστοιχη γραμμή (δηλαδή με κανονική ή υπερωριακή εργασία). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, ο αριθμός βαρδιών μιας εργάσιμης ημέρας δεν υπεισέρχεται στο μοντέλο άμεσα ως μεταβλητή απόφασης. Εντούτοις, εφόσον οποιαδήποτε λύση χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο αριθμό βαρδιών (δηλαδή εκείνες τις βάρδιες με τουλάχιστον μια προγραμματισμένη περίοδο κανονικής εργασίας), ο αριθμός βαρδιών αποτελεί μέρος της λύσης. Κατά συνέπεια η βέλτιστη λύση δίνει επίσης το βέλτιστο αριθμό βαρδιών σε μια εργάσιμη ημέρα. Επίσης, δεδομένου ότι τα στοιχεία κόστους υπεισέρχονται μόνο στην αντικειμενική συνάρτηση, οι συντελεστές που εκφράζουν το απόλυτο κόστος εργασίας (absolute shift remuneration rate coefficients) c_k μπορούν να αντικατασταθούν από τους σχετικούς λόγους c_k / c_1 χωρίς να επηρεαστεί η δομή της βέλτιστης λύσης του EMSP-O. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική έρευνα που έγινε, θέτοντας συμβατικά c_1=1 για τον (κανονικό) μισθό της πρώτης βάρδιας σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Υπό το πρίσμα της πολυπλοκότητας των υπολογισμών, όντας ένα πρόβλημα ανάθεσης, το EMSP-O μπορεί να θεωρηθεί NP-hard (Garey και Johnson, 1979). Αυτό μπορεί να αποδειχτεί άμεσα παρατηρώντας απλά ότι, για την ειδική περίπτωση όπου P=1, r=0 και w_i=1, c_i=1 για κάθε i, το EMSP-O εμπίπτει στο MSP. Εφόσον, λοιπόν, το τελευταίο έχει αποδειχτεί από τους Lagodimos and Leopoulos (2000) ότι είναι NP-hard, το ίδιο ισχύει για το EMSP-O. Ως εκ τούτου, κανένας αλγόριθμος πολυωνυμικού χρόνου δεν μπορεί να εγγυηθεί τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση του EMSP-O, έτσι απαιτούνται προσεγγίσεις και υποθέσεις.

Ένα άλλο ζήτημα αφορά στη μορφή μιας βέλτιστης λύσης. Από το μοντέλο MSP των Lagodimos and Paravantis (2003), παρατηρεί κανείς ότι η διαφορά σε κάθε περιορισμό του συνόλου (1) στην εργασία τους, αντιπροσωπεύει το συνολικό μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (σε εργατο-περιόδους) για την αντίστοιχη βάρδια. Επομένως, μια λύση του MSP που εξασφαλίζει ίδιες ανάγκες σε εργατικό δυναμικό για όλες τις ημέρες σε κάθε βάρδια, οδηγεί θεωρητικά σε μια ιδανική κατάσταση με μηδενικό μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό και η λύση αυτή είναι προφανώς βέλτιστη. Εντούτοις, ακριβώς λόγω της ύπαρξης των συνόλων των περιορισμών (2) και (3), η βέλτιστη λύση αναμένεται να διαφέρει γενικά από αυτήν την ιδανική κατάσταση. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως, μια βέλτιστη λύση θα πρέπει να μεγιστοποιεί την παραγωγική εκμετάλλευση του εργατικού δυναμικού. Η παρατήρηση αυτή είναι γενική και όπως είναι προφανές ισχύει απόλυτα και για το μοντέλο EMSP-O των Lagodimos and Mihiotis (2004) που παρουσιάστηκε καθώς και για το μοντέλο που προτείνεται στην παρούσα εργασία.

3.3. Παράμετροι - Παραμετροποίηση

Για να εξερευνηθούν τα προαναφερθέντα ερευνητικά ζητήματα χρησιμοποιήθηκε ένα συγκεκριμένο πείραμα. Σχετικά με το μοντέλο EMSP-O, θεωρήθηκε ότι υπάρχουν δέκα γραμμές στο τμήμα συσκευασίας, οι οποίες λειτουργούν μέχρι και δύο βάρδιες ανά εργάσιμη ημέρα για έναν ορίζοντα προγραμματισμού δέκα ημερών (δηλαδή N=10, P=2 και D=10). Προκειμένου να μπορούν να μελετηθούν πλήρως τα αποτελέσματα που έχει η χρήση υπερωρίας, δεν επιβλήθηκαν όρια στο μέγιστο ποσοστό υπερωρίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (δηλαδή r=1). Επίσης, έγινε η υπόθεση ότι το κατάστημα λειτουργεί κανονικά για μία βάρδια και κατά συνέπεια οποιοδήποτε φορτίο εργασίας κάποιας γραμμής που υπερβαίνει αυτήν την διάρκεια θεωρείται ως υπερβάλλον φορτίο παραγωγής (overload).

Με δεδομένες τις παραπάνω υποθέσεις, τέσσερις άλλες παράμετροι μεταβάλλονται όπως φαίνεται στον Πίνακα Ι των Lagodimos and Mihiotis (2004), που παρατίθεται στο Παράρτημα. Περιληπτικά, τα προφίλ (κατανομές) επάνδρωσης με εργατικό δυναμικό των γραμμών και το φορτίο παραγωγής μεταβάλλονται σε δύο επίπεδα το κάθε ένα για να διαμορφωθεί έτσι ένα σύνολο τεσσάρων διακριτών περιβαλλόντων λειτουργίας. Κάθε περιβάλλον λειτουργίας αποτελείται από δέκα προβλήματα, όπου κάθε ένα αντιστοιχεί σε ένα προφίλ (κατανομή) φορτίου παραγωγής, το οποίο επιλέγεται από την αντίστοιχη κατανομή του Πίνακα Ι. Σε αυτά τα περιβάλλοντα λειτουργίας εφαρμόζονται τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί (κανονικού) μισθού (regular remuneration rate) και υπερωριακής αμοιβής (overtime premium), που παρουσιάζονται στον Πίνακα Ι (χρησιμοποιώντας τη θεώρηση c_1=1 που συζητήθηκε προηγουμένως). Έτσι, διαμορφώνονται συνολικά 160 διαφορετικά προβλήματα για δοκιμή. Για όλα τα προβλήματα καθορίζονται οι λύσεις και για τις τρεις πολιτικές OPT, FOV και NOV.

Η επιλογή των συγκεκριμένων ποσών υπερωριακής αμοιβής είναι απόλυτα δικαιολογημένη. Σύμφωνα με την έρευνα των Hart et al. (1996) για την υπερωριακή αμοιβή σε διάφορες χώρες, στο Ηνωμένο Βασίλειο δεν υπάρχει νομοθεσία σχετικά με την ελάχιστη υπερωριακή αμοιβή, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχει τεθεί μια υψηλή ελάχιστη υπερωριακή αμοιβή ίση με 1,5 φορές επί της ωριαίας αμοιβής για κανονική εργασία. Μεταξύ αυτών των άκρων, στην Ιαπωνία έχει τεθεί μια ελάχιστη υπερωριακή αμοιβή ίση με 1,25 επί της κανονικής αμοιβής. Στην Ελλάδα, το ανώτατο όριο των ωρών εργασίας καθορίζεται με ένα κατακερματισμένο και μάλλον περίπλοκο σύστημα νομικών διατάξεων. Το ανώτατο όριο των ωρών εργασίας καθορίστηκε με νόμο το 1932 για τους εργάτες στη βιομηχανία (Διάταγμα 27.6/4.7.1932) σε 8 ώρες την ημέρα και 48 ώρες την εβδομάδα. Αυτή η ρύθμιση επεκτάθηκε αργότερα με διάφορα διατάγματα σε ολόκληρη τη βιομηχανία και τη βιοτεχνία. Έτσι, η εργασία έπειτα από την 8η ώρα κάθε ημέρα θεωρείται ως νόμιμη υπερωρία και αποζημιώνεται με ένα πρόσθετο 25% του ωριαίου μισθού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την διερεύνηση του προβλήματος και θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα αποτελέσματα της εργασίας. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιαστεί ο τρόπος, για παράδειγμα μαθηματικές και λογικές αποδείξεις, με τον οποίο υποστηρίζονται οι κύριες υποθέσεις της έρευνας. Επίσης, σκοπός είναι να τεκμηριωθούν ορισμένες βασικές σχέσεις που προέκυψαν από την έρευνα, όπως για παράδειγμα ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού του συνολικού κόστους. Βέβαια παραλείπονται σκόπιμα κάποιες απλές μαθηματικές σκέψεις, όπως η διαδικασία προσδιορισμού των συνθηκών (Conditions for Optimality). Η τεκμηρίωση (επαλήθευση) όπου κρίνεται σκόπιμο θα παρουσιαστεί με αναλυτικούς πίνακες.

4.1. Υπολογισμοί και Προσέγγιση

Σύμφωνα με τους Lagodimos and Mihiotis (2004), προκειμένου να ληφθούν η βέλτιστη λύση του EMSP-O (OPT) και οι λύσεις που αντιστοιχούν στις βέλτιστες συνθήκες των πολιτικών NOV και FOV χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές διαδικασίες. Πιο συγκεκριμένα, η λύση OPT καθορίστηκε χρησιμοποιώντας το δημοφιλές πρόγραμμα βελτιστοποίησης LINGO Optimiser (έκδοσης 8.0/2002). Οι λύσεις NOV και FOV ελήφθησαν χρησιμοποιώντας έναν υπάρχοντα ευρετικό αλγόριθμο για τη λύση του προβλήματος EMSP. Η αναγκαιότητα της χρήσης διαφορετικών διαδικασιών οφείλεται αποκλειστικά στον υπερβολικό χρόνο, που απαιτεί το LINGO για να φθάσει σε μια λογική και εφικτή λύση. Ο ευρετικός αλγόριθμος, σε κώδικα Pascal, φθάνει σε μια λύση σε κλάσματα ενός δευτερολέπτου. Για όλους τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής Pentium 3 στα 1000 MHz.

Για την επίλυση του EMSP-O, το LINGO χρησιμοποιήθηκε από τους Lagodimos and Mihiotis (2004) στην τυπική ρύθμισή του (Anonymous, 2002), χωρίς αλλαγή του αλγορίθμου «κλάδων και ορίων» (branch and bound algorithm). Η συνθήκη τερματισμού ορίστηκε στις τέσσερις ώρες εκτέλεσης, σε περίπτωση που δεν βρεθεί έως τότε βέλτιστη λύση. Εκτός από ελάχιστα προβλήματα, όπου βρέθηκε άμεσα η βέλτιστη λύση, η περαιτέρω εκτέλεση του αλγορίθμου διακόπηκε από την ενεργοποίηση της συνθήκης τερματισμού. Πρακτικά, απαιτήθηκαν περισσότερες από 450 ώρες υπολογισμών (run time), προκειμένου να επιτευχθούν αποτελέσματα για την λύση OPT. Εντούτοις, τα αποτελέσματα αυτά είναι (μάλλον καλές) προσεγγίσεις της βέλτιστης λύσης του EMSP-O. Φυσικά, όλα τα αποτελέσματα εξετάστηκαν για τη συνέπεια πριν χρησιμοποιηθούν (π.χ. μια λύση OPT δεν μπορεί να είναι ποτέ χειρότερη από μια λύση NOV ή FOV).

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι παραπάνω συγγραφείς έχουν ήδη αναφερθεί λεπτομερώς. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή την εργασία φαίνονται στους πίνακες του Παραρτήματος. Ο Πίνακας ΙΙ των Lagodimos and Mihiotis (2004) (βλέπε Παράρτημα) παρουσιάζει το συνολικό κόστος, που προκύπτει από την αντικειμενική συνάρτηση, για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού (OPT, NOV και FOV). Ο Πίνακας ΙΙΙ των Lagodimos and Mihiotis (2004) (βλέπε Παράρτημα) παρουσιάζει την αναλυτική δομή της λύσης σύμφωνα με τη σχέση (8), δηλαδή το συνολικό προγραμματισμένο (κανονικό) εργατικό δυναμικό (R), τη συνολική υπερωριακή εργασία (O) και το συνολικό μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U), για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού. Επίσης, στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται η μεταβλητή (S), που δείχνει τον αριθμό βαρδιών που χρησιμοποιούνται στο OPT και η μεταβλητή (OVL), που δείχνει το αντίστοιχο σταθμισμένο υπερβάλλον φορτίο παραγωγής για κάθε πρόβλημα και όπως θα αποδειχτεί αργότερα είναι το κλειδί για την λογική εξήγηση του προβλήματος. Το συνολικό υπερβάλλον φορτίο παραγωγής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sum OVL = \sum_{i=1}^{N} (w_i - D) \qquad (9)$$

ενώ το σταθμισμένο υπερβάλλον φορτίο παραγωγής (που χρησιμοποιήθηκε στον Πίνακα ΙΙΙ) από τον τύπο:

$$OVL = \frac{\sum_{i=1}^{N} a_i (w_i - D)}{D} \,. \qquad (10)$$

Οι παραπάνω τύποι ισχύουν μόνο όταν το φορτίο παραγωγής κάποιας γραμμής *i* είναι μεγαλύτερο από το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού, δηλαδή όταν ισχύει $w_i > D$ (διαφορετικά δεν υπάρχει overload).

Με δεδομένα αυτά τα συμπεράσματα και τα αναλυτικά αποτελέσματά τους, θα περιγραφεί σε αυτό το σημείο η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.

Το πρώτο βήμα μετά τη μελέτη των εν λόγω συμπερασμάτων ήταν να ερευνηθεί η αναλυτική μορφή μιας βέλτιστης λύσης. Έχοντας υπόψη τη λογική του αλγορίθμου και την τελική δομή της λύσης OPT (βλέπε Πίνακα ΙΙΙ), αρχικά κατασκευάστηκε μια γραφική απεικόνιση της κατανομής, ελπίζοντας να είναι πιο εύκολο να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα. Η δυσκολία του εγχειρήματος έγκειται στο ότι, ενώ είναι γνωστή η τελική δομή της λύσης, (L, R, O, U, S, OVL) δεν είναι γνωστές οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των μεταβλητών που οδηγούν στο τελικό αποτέλεσμα, ούτε καν αν υπάρχουν. Για να κατασκευαστούν οι γραφικές απεικονίσεις απαιτήθηκαν πρόσθετα δεδομένα, και πιο συγκεκριμένα οι κατανομές (προφίλ) όλων των φορτίων παραγωγής που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία των Lagodimos and Mihiotis (2004). Οι κατανομές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα IV των Lagodimos and Mihiotis (2004)στο Παράρτημα.

Με γνωστές τις κατανομές των φορτίων παραγωγής και την τελική δομή της βέλτιστης λύσης ήταν σχετικά απλό να κατασκευαστούν οι ζητούμενες απεικονίσεις, μόνο όμως για τις περιπτώσεις όπου η NOV ή η FOV ήταν βέλτιστες, με βάση τους κανόνες με τους οποίους ο αλγόριθμος κατανέμει το εργατικό δυναμικό σε βάρδιες. Αρκεί να θυμηθεί κανείς τους κανόνες λειτουργίας τους, όπου η NOV απαγορεύει τη χρήση υπερωρίας (άρα μορφή 2S και O=0), ενώ η FOV καλύπτει το overload αποκλειστικά με υπερωρία (άρα μορφή 1S και O=OVL). Παραδείγματα μιας τέτοιας απεικόνισης θα παρουσιαστούν παρακάτω. Από τις απεικονίσεις αυτές δεν προέκυψε κάποιο συμπέρασμα.

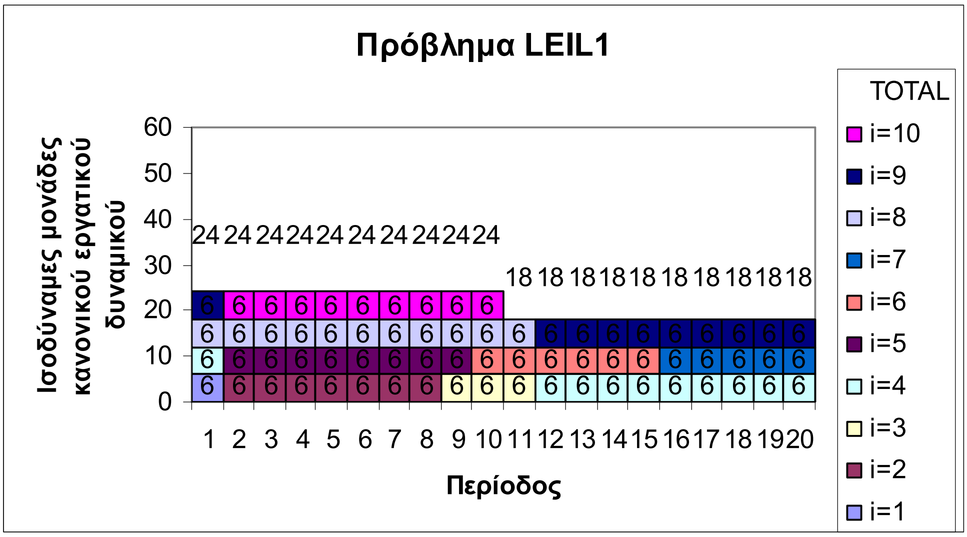
Έτσι, η μελέτη στράφηκε στη γραφική απεικόνιση αυτών των ίδιων βέλτιστων λύσεων, όπως αυτές προκύπτουν από το LINGO. Επιλέγοντας τυχαία κάποια παραδείγματα, για τα οποία όμως το LINGO βρήκε αμέσως (σε λίγα δευτερόλεπτα) βέλτιστη λύση (με δοκιμές χρησιμοποιώντας εκ νέου το μοντέλο EMSP-O και τις παραμέτρους του, το LINGO 8.0 και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium 4 στα 2667 MHz), κατασκευάστηκαν οι απεικονίσεις που φαίνονται παρακάτω. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται το πρόβλημα με κωδικό LEIL1, με κωδικοποίηση «Production load - Manning - Regular remuneration rate - Overtime rate - Replication number» (βλέπε Πίνακα I για τις παραμέτρους και Πίνακα IV για αριθμό επανάληψης), που έχει αναλυτική δομή: R=42, O=0, U=0, S=2 και OVL=0,6. Πρόκειται για ένα πρόβλημα με χαμηλό φορτίο παραγωγής (Low production load), ίση κατανομή εργατικού δυναμικού (Even manning), για αυτό και τα ίδια κουτάκια, ίδιο (κανονικό) μισθό (Identical regular remuneration rate) και χαμηλής υπερωριακής αμοιβής (Low overtime rate). Επειδή, το πρόβλημα EMSP-O είναι NP-hard, δεν υπάρχει μοναδική βέλτιστη λύση από άποψη κατανομής (η ίδια δομή R=42, O=0, U=0, S=2 και OVL=0,6 μπορεί να αντιστοιχεί σε παραπάνω από μία μορφές της εσωτερικής κατανομής). Παρακάτω δίνονται και οι δύο μορφές για να είναι εύκολη η σύγκρισή τους.

Πίνακας 4: *Αναλυτική μορφή παραδείγματος LEIL1, όπως προκύπτει από τη λογική του αλγορίθμου.*

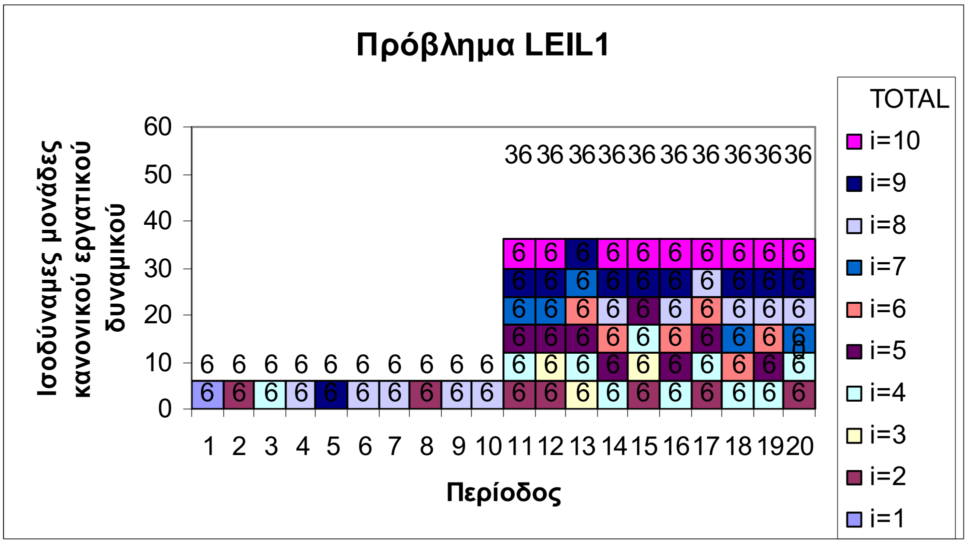
Machine	Shift1										Shift2									
1	6																			
2		6	6	6	6	6	6	6												
3									6	6										
4											6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	6	6	6	6	6	6	6	6	6											
6										6										
7											6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6										
9											6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6										
Total	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Solution	24										18									

Πίνακας 5: *Αναλυτική μορφή παραδείγματος LEIL1, όπως προκύπτει από το LINGO.*

Machine	Shift1										Shift2									
1	6																			
2		6						6			6	6			6		6			6
3												6	6		6					
4			6								6		6	6	6	6	6	6	6	6
5											6	6	6	6	6	6	6		6	
6													6	6		6	6	6	6	
7											6	6	6					6		6
8				6		6	6		6	6				6		6	6	6	6	6
9					6						6	6	6	6	6	6		6	6	6
10											6	6		6	6	6	6	6	6	6
Total	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Solution	6										36									



Διάγραμμα 1: *Γραφική απεικόνιση αναλυτικής μορφής παραδείγματος LEIL1, όπως προκύπτει από τη λογική του αλγορίθμου.*



Διάγραμμα 2: *Γραφική απεικόνιση αναλυτικής μορφής παραδείγματος LEIL1, όπως προκύπτει από το LINGO.*

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Συγκρίνοντας τη μορφή που προκύπτει από τη λογική του αλγορίθμου με την αντίστοιχη μορφή που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου στο LINGO, είναι προφανές ότι στη λύση LINGO δεν ενδιαφέρει και συνεπώς δεν έχει ληφθεί υπόψη η φυσική σημασία των μεταβλητών. Το LINGO ως πρόγραμμα βελτιστοποίησης ψάχνει για τη βέλτιστη λύση με βάση το μοντέλο, την αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές και τους περιορισμούς, με μοναδικό στόχο την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του κόστους. Έτσι δημιούργησε μια λύση εντελώς ακανόνιστη (βλέπε Διάγραμμα 2), χωρίς να λαμβάνει υπόψη ότι πρόκειται για ανάγκες επάνδρωσης μηχανών με εργατικό δυναμικό. Στην πραγματικότητα, η συνεχόμενη λειτουργία των μηχανών (κυρίως για να μην υπάρχει νεκρός χρόνος) αποτελεί συνηθισμένη βιομηχανική πρακτική. Αντίθετα, η λογική του αλγορίθμου είναι να καλυφτούν πλήρως οι ανάγκες μιας μηχανής προτού προγραμματιστούν οι ανάγκες μιας άλλης. Αυτή ήταν και η έννοια «greedy» του αρχικού αλγορίθμου των Lagodimos and Leopoulos (2000). Συνεπώς, η μορφή της λύσης που παράγεται από τους αλγορίθμους βρίσκεται πιο κοντά στην καθημερινή πρακτική σε μια βιομηχανία, αυξάνοντας σημαντικά τις πιθανότητες της άμεσης εφαρμογής του αλγορίθμου ως καθημερινό πρακτικό εργαλείο προγραμματισμού. Βέβαια, το γεγονός δεν μειώνει τη χρησιμότητα του μοντέλου ILP, αφού πρόκειται ουσιαστικά για ανειδίκευτους εργάτες, οι οποίοι είναι ευέλικτοι και μπορούν να εργαστούν σε οποιαδήποτε μηχανή. Άρα η κατανομή τους σε συγκεκριμένες περιόδους (allocation) δεν έχει τόσο ζωτική σημασία, ούτε εξετάζεται άμεσα εδώ, όσο η γενική δομή της βέλτιστης λύσης σε ανώτερο επίπεδο προγραμματισμού (planning). Εξάλλου, η ίδια λογική μπορεί να ενσωματωθεί στο μοντέλο που εισάγεται στο LINGO, αλλά όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση των περιορισμών θα επιφέρει αναμφισβήτητα μείωση της γενικότητας του μοντέλου και πιθανότατα θα έχει επίπτωση και στην απόδοσή του.

Επιστρέφοντας στον κύριο στόχο της παρούσας έρευνας, ο οποίος είναι η λογική διερεύνηση της δομής της βέλτιστης λύσης, η παραπάνω προσέγγιση δεν είχε άμεσο ουσιαστικό αποτέλεσμα, αν και μελετήθηκαν πολλά παραδείγματα από το σύνολο των προβλημάτων. Στη συνέχεια, από όλα τα προβλήματα, η έρευνα εστιάστηκε αρχικά στα πιο απλά, δηλαδή σε αυτά όπου δεν υπάρχει υπερωρία (O), άρα εκτός από το LINGO και την OPT, η NOV δίνει συνήθως βέλτιστες λύσεις, και σε αυτά που υπάρχει πλήρης υπερωρία (για να καλυφτεί το overload), άρα η FOV δίνει βέλτιστες λύσεις. Σε αυτή τη φάση οι υπόλοιπες λύσεις OPT, όπου συνυπάρχει και υπερωρία (O) και μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U), θεωρήθηκαν ως στόχος για βελτίωση της NOV και της FOV. Πιο απλά, η ιδέα ήταν να βελτιωθούν οι αρχικές λύσεις NOV και FOV, εισάγοντας επιπλέον υπερωρία, με βάση την ιδιότητα «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing), που φαίνεται να συνδέει την υπερωρία και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό στη βέλτιστη λύση. Σε αυτό το σημείο δημιουργήθηκε η ανάγκη για τη θεωρητική τεκμηρίωση και απόδειξη αυτής της ιδιότητας. Όλες οι αποδείξεις που σχετίζονται με την ιδιότητα αυτή θα παρουσιαστούν παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ιδιότητα αυτή φαίνεται ότι ισχύει σίγουρα για συνθήκες ίδιου κόστους c_i μεταξύ των βαρδιών (identical regular remuneration rate) και μόνο παρατηρώντας τον Πίνακα III (για c_i *(I)* ισχύει O≠0 όταν U=0 και O=0 όταν U≠0, ή έστω O=0 όταν U=0, αλλά ποτέ O≠0 όταν U≠0). Το ζήτημα ήταν να ερευνηθεί αν αυτή η σημαντική ιδιότητα ισχύει και για διαφορετικό κόστος c_i μεταξύ των βαρδιών (unequal regular remuneration rate).

Το επόμενο βήμα βασιζόταν στην ιδιότητα αυτή για συνθήκες ίδιου κόστους c_i μεταξύ των βαρδιών. Συγκεκριμένα, για τη NOV η προσέγγιση ήταν να απομονωθούν οι «κορυφές», δηλαδή εκείνες οι περίοδοι όπου προγραμματίζονται να δουλέψουν οι περισσότερες μηχανές (άρα το συνολικό τους άθροισμα σε ανάγκες εργατικού δυναμικού είναι το μέγιστο σε σχέση με όλες τις άλλες). Έτσι δημιουργείται μια επίπεδη κατανομή, μηδενίζοντας το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U). Το σύνολο των «κορυφών» αυτών αρχικά ήταν ένας αριθμός ανειδίκευτων εργατών που απασχολούνταν με κανονική εργασία. Τώρα οι ίδιοι εργάτες απασχολούνται με υπερωριακή εργασία, με αποτέλεσμα επίσης να μειωθεί ο αριθμός του συνολικού προγραμματισμένου (κανονικού) εργατικού δυναμικού (R) στην αντίστοιχη βάρδια. Οι κορυφές αυτές είτε προσδιορίζονται γραφικά, είτε υπολογίζονται από το μαθηματικό τύπο:

$$n_1 = D \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} \right] \right] \qquad (11)$$

όπου $\sum OVL = \sum_{i=1}^{N} (w_i - D)$.

Ομοίως, για την περίπτωση της άλλης ακραίας πολιτικής FOV, ελέγχεται τι επιπτώσεις θα έχει στη δομή της λύσης και στο κόστος ο μηδενισμός του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (U) με παράλληλη εισαγωγή υπερωριακής εργασίας (ή πιο απλά, η μεταφορά όλων των κορυφών της πρώτης βάρδιας από κανονική σε υπερωριακή εργασία).

Η παραπάνω υποκατάσταση με βάση την ιδιότητα «all-or-nothing» είχε γενικά θετικά αποτελέσματα, με σημαντική μείωση του συνολικού κόστους και ταυτόχρονο μηδενισμό του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (U):

1. Όσον αφορά στη NOV: Για περιπτώσεις όπου η OPT λύση δεν έχει υπερωρία, προφανώς δεν συντρέχει θέμα βελτίωσης της NOV. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, η λογική της ιδιότητας «all-or-nothing» βελτίωσε τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, για το πρόβλημα HEIL2 (βλέπε παραπάνω για την κωδικοποίηση), η λύση με βάση την πολιτική NOV έγινε από R=54 και U=2,4 που ήταν αρχικά, R'=48 O'=3,6 U'=0, απέκτησε δηλαδή ακριβώς την ίδια δομή με τη βέλτιστη λύση OPT. Αυτό και άλλα προβλήματα (HEIL4, HEIL5, HEIL6 και HEIL10) αποδεικνύουν ότι α) οι αρχικές λύσεις της NOV μπορούν να βελτιωθούν με προσθήκη υπερωρίας και β) ότι ισχύει για c_i *(I)* η λογική «all-or-nothing» μεταξύ O και U. Με αυτό τον τρόπο, όχι μόνο γίνεται πιο επίπεδη η κατανομή (μηδενικό U), αλλά όπως ήταν αναμενόμενο, το συνολικό κόστος (που υπολογίζεται εύκολα από την αντικειμενική συνάρτηση) μειώνεται σημαντικά.

2. Όσον αφορά στη FOV: Ακολουθώντας την ίδια λογική, ειδικά για τις λύσεις με μορφή 1S, όπου η FOV παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και παρέχει λύσεις που ταυτίζονται με τις λύσεις OPT, τα αποτελέσματα ήταν επίσης ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, για τις λύσεις της FOV μορφής 1S (*Load (L)* και c_i *(U)*), που δεν συμπίπτουν αρχικά με τις λύσεις OPT, όπως οι LEUL2, LEUL8 και LEUL10 για *Manning (E)* και οι LIUL2, LIUL3, LIUL4, LIUL5 και LIUL6 για *Manning (I)*,

εισάγοντας επιπλέον υπερωρία, οι λύσεις FOV ταυτίστηκαν τελικά με τις OPT. Αυτό ίσχυε ανεξαρτήτως της υπερωριακής αμοιβής, δηλαδή και για *r(L)* αλλά και για *r(H)*. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι το γεγονός είναι ότι κατά την παραπάνω έρευνα βρέθηκε μια μοναδική περίπτωση, το πρόβλημα LIUL5, όπου η βελτιωμένη λύση FOV με επιπλέον υπερωρία ξεπέρασε ακόμα και τη λύση OPT, με δομή R’=42, O’=3,2 και U’=2,3 και συνολικό κόστος C’=50, ενώ το αντίστοιχο κόστος της OPT ήταν C=51. Το γεγονός αυτό χρήζει περαιτέρω έρευνας και μπορεί να αποτελέσει αφετηρία για μελλοντικές μελέτες.

3. Ειδικά, για *Load (L)*, *Manning (I)* και c_i *(U)*, κατά τη εφαρμογή της ιδιότητας για τη FOV, η ιδιότητα «all-or-nothing» ισχύει, αλλά όχι με ταυτόχρονη μείωση του κόστους, όπως στις παραπάνω περιπτώσεις. Η εισαγωγή υπερωρίας γίνεται με στόχο το μηδενισμό του U, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις το νέο κόστος δεν μειώνεται τόσο ώστε να φτάσει το αρχικό κόστος της λύσης OPT (στην καλύτερη περίπτωση τα κόστη είναι ίσα). Αντίθετα, ακόμα και όταν συνυπάρχει και υπερωρία (O) και μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U), το κόστος μπορεί να είναι ελάχιστο (δηλαδή συνολικό κόστος OPT = νέο συνολικό κόστος FOV). Πιο συγκεκριμένα:

α) Πρόβλημα LIUL2: Η εισαγωγή επιπλέον υπερωρίας (O) για να μηδενιστεί το U, συνοδεύεται από μείωση κόστους, και το νέο συνολικό κόστος είναι ίσο με αυτό της OPT. Αναλυτικά, αρχικά για τη FOV η δομή ήταν R=42, O=1,5, U=3 και C=45,8, ενώ μετά την εισαγωγή υπερωρίας ήταν R’=39, O’=1,8, U’=0,3 και $C'=C_{OPT}$=43,5. Οποιαδήποτε περαιτέρω προσπάθεια μείωσης του U, αν και είναι γενικά δύσκολη (αν όχι αδύνατη) λόγω της ακανόνιστης κατανομής του εργατικού δυναμικού (Irregular manning), αυξάνει το συνολικό κόστος. Το θέμα αυτό απαιτεί περαιτέρω έρευνα.

β) Πρόβλημα LIUL7: Η εισαγωγή επιπλέον υπερωρίας (O) για να μηδενιστεί το U, συνοδεύεται από μείωση κόστους, αλλά το νέο συνολικό κόστος δεν είναι ίσο με αυτό της OPT, απλά βελτιώνεται σε σχέση με την αρχική FOV. Αναλυτικά, η δομή της αρχικής λύσης FOV ήταν R=29, O=1, U=1,4 και C=31,5, ενώ μετά την εισαγωγή υπερωρίας ήταν R’=27, O’=1,6, U’=1,4 και C’=31. Η δομή της βέλτιστης λύσης ήταν R=28, O=1,1, U=0,5 και C=30,8. Η διαφορά στο κόστος αν και είναι μικρή, μπορεί να αποτελέσει άλλο ένα στόχο μελλοντικής έρευνας.

γ) Πρόβλημα LIUL9: Η εισαγωγή επιπλέον υπερωρίας (O) για να μηδενιστεί το U, δε συνοδεύεται από μείωση κόστους, και το νέο συνολικό κόστος είναι ίσο με αυτό της αρχικής FOV (περίπτωση αδιαφορίας). Αναλυτικά, η δομή της αρχικής λύσης FOV ήταν R=25, O=0,2, U=1,2 και C=25,5, ενώ μετά την εισαγωγή υπερωρίας ήταν R’=23, O’=1, U’=0 και C’=25,5. Η δομή της βέλτιστης λύσης ήταν R=24, O=0,4, U=0,4 και C=25. Οι λόγοι που οδηγούν στο παραπάνω γεγονός παραμένουν προς έρευνα.

Το γενικό συμπέρασμα από τα παραπάνω προκαλεί περαιτέρω ερευνητικά ερωτήματα. Η ιδιότητα «all-or-nothing» μεταξύ O και U ισχύει σε κάποιες περιπτώσεις, αλλά όχι πάντα με ταυτόχρονη μείωση του κόστους (σε όρους κόστους υπάρχουν περιπτώσεις αδιαφορίας). Ανάλογες περιπτώσεις περίπου παρατηρούνται γενικά και για *Load (H)* (π.χ. HEIL1, HEIL2 και HEIL7). Το σίγουρο είναι ότι η ακανόνιστη κατανομή του εργατικού δυναμικού (Irregular manning), ειδικά στην περίπτωση διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών ($c_i(U)$), δημιουργεί αυξημένη δυσκολία στην επίλυση του -έτσι και αλλιώς- δύσκολου προβλήματος EMSP-O. Για αυτό το λόγο, αποφασίστηκε η περαιτέρω έρευνα να επικεντρωθεί στις περιπτώσεις με ίση κατανομή εργατικού δυναμικού (Even Manning).

Ήδη, σε αυτό το σημείο, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένας νέος σύνθετος αλγόριθμος, που να συνδυάζει και τα πλεονεκτήματα της FOV και της NOV, αλλά και τα πλεονεκτήματα της βελτίωσης και των δύο, με βάση την ιδιότητα «all-or-nothing» μεταξύ O και U. Ο αλγόριθμος θα μπορούσε να ξεκινά με την πολιτική FOV για μία βάρδια (1S), δηλαδή να εισάγεται υπερωρία απλά για να καλυφτεί το overload (O=OVL) και να υπολογίζεται το αντίστοιχο συνολικό κόστος, έστω C_{FOV}. Στη συνέχεια, με χρήση της ιδιότητας «all-or-nothing», ο αλγόριθμος θα εισήγαγε επιπλέον υπερωρία για να μηδενιστεί το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U), δηλαδή μεταφέροντας τις κορυφές ως υπερωρία. Ταυτόχρονα, θα υπολόγιζε ένα νέο συνολικό κόστος, έστω C_{FOV}'. Το επόμενο βήμα θα ήταν να χρησιμοποιηθεί η πολιτική NOV ως έχει, δηλαδή να μεταφερθεί το overload στην δεύτερη βάρδια (2S) και να υπολογιστεί το αντίστοιχο συνολικό κόστος, έστω C_{NOV}. Στη συνέχεια, προκειμένου να βελτιωθεί η λύση, υπάρχουν πολλές επιλογές. Αρχικά, μπορούν να μεταφερθούν οι κορυφές της πρώτης βάρδιας στη δεύτερη με στόχο να μειωθεί το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U) και στις δύο βάρδιες, χωρίς εισαγωγή υπερωρίας και να υπολογιστεί το νέο συνολικό κόστος, έστω C_{NOV}'. Άλλη επιλογή, με βάση και πάλι την ιδιότητα «all-or-nothing», είναι να μεταφερθούν οι κορυφές της πρώτης βάρδιας ως υπερωρία (O_1) και να υπολογιστεί το νέο συνολικό κόστος, έστω $C_{2S\ with\ O1}$. Άλλη επιλογή, θα ήταν η μεταφορά των κορυφών της πρώτης βάρδιας στη δεύτερη και εφόσον προκύπτει νέα κορυφή στην δεύτερη βάρδια, να μεταφερθεί όλη ως υπερωρία (O_2), και να υπολογιστεί ένα νέο συνολικό κόστος, έστω $C_{2S\ with\ O2}$. Από μια τελική σύγκριση όλων των παραπάνω κοστών, το ελάχιστο θα έδινε την βέλτιστη λύση.

Όπως παρατηρεί κανείς οι συνδυασμοί είναι πολλοί και επηρεάζονται άμεσα από τις τιμές των διάφορων παραμέτρων. Για παράδειγμα, αν η δεύτερη βάρδια είναι πιο ακριβή (*c_i (U)*, δηλαδή c_1=1 και c_2=2) και η υπερωριακή αμοιβή χαμηλή (*r (L)*, δηλαδή r_1=r_2=0,25), μπορεί να συμφέρει, δηλαδή να έχει μικρότερο κόστος, να εισαχθεί υπερωριακή εργασία, αντί να εισαχθεί επιπλέον κανονική εργασία (δηλαδή να αυξηθεί το R_2). Ο παράγοντας του κόστους μεταξύ των βαρδιών c_i είναι από τους πλέον σημαντικούς. Μόνο για την περίπτωση του ίδιου (κανονικού) μισθού (Identical regular remuneration rate), η μετακίνηση «κορυφών» είναι ελεύθερη μεταξύ των δύο βαρδιών, δηλαδή οποιαδήποτε μηχανή μπορεί να προγραμματιστεί σε οποιαδήποτε βάρδια και σε οποιαδήποτε περίοδο (αρκεί να είναι εφικτό). Η παρατήρηση αυτή αποτέλεσε τη βάση της διατύπωσης μιας αναλυτικής σχέσης (τύπου) για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους $C_{identical}$, για την περίπτωση ίδιου κόστους μεταξύ των βαρδιών (ή *c_i (I)*).

Η σπουδαία αυτή παρατήρηση έδωσε επίσης ισχυρό έρεισμα στην υπόθεση ότι για ίδιο κόστος μεταξύ των βαρδιών (*c_i (I)*), η «κορυφή» είναι μοναδική (πρακτικά κατά τη συνολική κατανομή δημιουργείται ένα μοναδικό «σκαλοπάτι»). Η απόδειξη της μοναδικότητας παρατίθεται παρακάτω. Το εκπληκτικό είναι ότι όσο απλή και αυταπόδεικτη φαίνεται, τόσο δύσκολη ήταν η σύλληψή της. Η απόδειξη δε σχετίζεται με τη μείωση κόστους, ούτε εξαρτάται από το μέγεθος στην κατανομή του εργατικού δυναμικού (manning), που μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή πέρα από το a_i=6, όσο με τη φυσική εξομάλυνση του φορτίου παραγωγής, γεγονός που της προσδίδει γενικότερο χαρακτήρα.

Οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και αφορούν στην πιθανή δημιουργία ενός σύνθετου εξελιγμένου αλγορίθμου, παρείχαν πρόσφορο έδαφος για μια νέα προσέγγιση με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Λόγω των πολλών συνδυασμών κανονικής εργασίας (R) και υπερωριακής εργασίας (O), που μπορούν να υπάρξουν (μεταξύ των μεγεθών R_1, R_2, O_1 και O_2), θεωρήθηκε σκόπιμο να προσδιοριστούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις και συγκεκριμένα να κατηγοριοποιηθούν σε λίγες κύριες περιπτώσεις. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργήθηκαν 6 κύριες περιπτώσεις. Η λογική ήταν απλή. Αρχικά, υπολογίζονταν οι «κορυφές» της πρώτης βάρδιας από τον τύπο:

$$n_1 = D \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} - \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} \right\rfloor \right] \qquad (11)$$

και το συνολικό υπερβάλλον φορτίο παραγωγής από τον τύπο:

$$\sum OVL = \sum_{i=1}^{N} \left(w_i - D\right). \qquad (9)$$

Στη συνέχεια τα μεγέθη αυτά συγκρίνονταν με τον όρο $\frac{D}{1+r}$ (που προκύπτει από την εξίσωση του κόστους κανονικής εργασίας με την υπερωριακή) και ανάλογα, προέκυπταν οι 6 περιπτώσεις. Περιληπτικά, οι 6 περιπτώσεις ήταν οι εξής:

1. Regular 1 – Overtime 2
2. Regular 1 – Regular 2
3. - – Overtime 2
4. - – Regular 2
5. Overtime 1 – Regular 2
6. Overtime 1 – Regular 2 + Overtime 2

Η έρευνα αποσκοπούσε στην κάλυψη των περιπτώσεων κυρίως άνισων (κανονικών) μισθών (Unequal regular remuneration rate), δηλαδή πρακτικά για διαφορετικό κόστος μεταξύ των βαρδιών. Επιπλέον, παρέμενε ως θέμα έρευνας η ιδιότητα «all-or-nothing» για c_i *(U)*.

Επειδή, η διατύπωση των παραπάνω περιπτώσεων ως είχε, δεν διευκόλυνε την περαιτέρω μελέτη τους, οι 6 αυτές περιπτώσεις ξαναδιατυπώθηκαν, αυτή τη φορά θεωρώντας ως βασικό κριτήριο επιλογής τους τη σχέση:

$$n_2 > A, \qquad (12)$$

όπου: $$A = \frac{D}{1+r} \qquad (13)$$

και $$n_2 = D \cdot \left[\frac{\sum OVL}{D} - \left\lfloor \frac{\sum OVL}{D} \right\rfloor \right]. \qquad (14)$$

Αναλυτικά, οι 6 περιπτώσεις διαμορφώθηκαν ως εξής:

Αν $n_2 > A$ τότε: Regular 2 & Regular 1,

ή Regular 2 & OVT 1 (=max [0, n_1+n_2-D]).

Αν $n_2 \leq A$ τότε: OVT 2 (=n_2) & Regular 1,

ή Regular 2 & OVT 1 (=max [0, n_1+n_2-D]),

ή OVT 2 (=n_2) & OVT 1 (=n_1),

ή OVT 2 (=n_1+n_2).

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η τελευταία περίπτωση δεν μπορεί να είναι γενικά βέλτιστη, αλλά είναι αναγκαστική επιλογή (forced), όταν για κάποια περίπτωση δεν μπορεί φυσικά να υπάρξει υπερωρία στην πρώτη βάρδια (OVT 1).

Το επόμενο βήμα ήταν να συγκριθούν οι παραπάνω περιπτώσεις μεταξύ τους σε επίπεδο συνολικού κόστους, για να προκύψουν οι σχέσεις (συνθήκες) κάτω από τις οποίες προτιμάται μια περίπτωση έναντι μιας άλλης. Εφόσον η εκτεταμένη διερεύνηση δεν απέφερε άλλες περιπτώσεις εκτός από αυτές τις 6 κύριες (που ουσιαστικά είναι 5 μοναδικές, αρκεί να παρατηρήσει κάποιος την δεύτερη και την τέταρτη), θεωρήθηκε ότι θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένας αντίστοιχος αναλυτικός τύπος υπολογισμού του συνολικού κόστους $C_{unequal}$ για την περίπτωση διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών (ή c_i *(U)*). Η αρχική μορφή αυτού του τύπου έπρεπε να επαληθεύει όλες τις περιπτώσεις τις οποίες αντιπροσώπευε (*Manning (E)* και c_i *(U)*).

Με δεδομένο το γεγονός ότι έχουν προσδιοριστεί πλήρως οι γενικές περιπτώσεις, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση όλων των περιπτώσεων, μίας προς μία, με στόχο να προκύψουν οι συνθήκες, υπό τις οποίες μια περίπτωση δίνει τη βέλτιστη λύση (δηλαδή είναι καλύτερη από τις άλλες). Οι συνθήκες αυτές θα προέκυπταν απλά, αλλά θα έπρεπε στη συνέχεια να επιβεβαιωθούν ως προς την ισχύ τους, με τη βοήθεια του προγράμματος Excel. Επίσης, κρίθηκε πιο σκόπιμο και πιο ουσιαστικό, να μελετηθούν τελικά οι 5 μοναδικές περιπτώσεις, οι οποίες θα αναφέρονται εφεξής και ως πολιτικές (policies). Οι 5 γενικές πολιτικές προς διερεύνηση ήταν οι εξής:

P1: Regular 1 & Regular 2
P2: Regular 1 & OVT 2 ($=n_2$)
P3: OVT 1 ($=n_1$) & OVT 2 ($=n_2$)
P4: OVT 1 ($=\max[0, n_1+n_2-D]$) & Regular 2
P5: OVT 2 ($=n_1+n_2$)

Από τη σύγκριση των 5 παραπάνω πολιτικών (ανά δύο) προέκυψαν οι συνθήκες της βέλτιστης πολιτικής (Conditions for Optimality). Η αρχική σκέψη ότι η πολιτική P5 είναι μια ειδική περίπτωση (forced), που υποκαθιστά την πολιτική P3, όταν $\sum OVL \leq D$. Έτσι, η P5 δεν μπορεί να είναι ποτέ βέλτιστη, παρατήρηση που οδήγησε στη λογική παράλειψη αυτής της πολιτικής από τη σύγκριση και την εξαγωγή των συνθηκών. Έτσι, συγκρίθηκαν αρχικά οι 4 πολιτικές P1, P2, P3 και P4, με τη σκέψη ότι η ενσωμάτωση της πολιτικής P5 θα γίνει μέσω της σχέσης $\sum OVL \leq D$.

Για να καταστεί εφικτή η επαλήθευση, έπρεπε πριν από όλα να βρεθεί σε ποιες πολιτικές αντιστοιχούν οι λύσεις OPT των υπό μελέτη προβλημάτων. Με τη βοήθεια του Πίνακα Vb των Lagodimos and Mihiotis (2004) (βλέπε Παράρτημα), που παρουσιάζει την αναλυτικότερη δομή της λύσης OPT για κάθε βάρδια (R_1, R_2, O_1, O_2 και U) για όλα τα προβλήματα, αντιστοιχήθηκε λογικά κάθε πρόβλημα σε μία από τις 5 πολιτικές. Για παράδειγμα, το πρόβλημα HEUL1 (βλέπε παραπάνω για κωδικοποίηση) έχει σύμφωνα με τον Πίνακα III αναλυτική δομή R=54, O=4,8 και U=0. Δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα το κόστος των δύο βαρδιών είναι διαφορετικό ($c_i(U)$), έχει μεγάλη σημασία η αναλυτικότερη δομή της βέλτιστης λύσης, προκειμένου να δημιουργηθεί μια καλύτερη εικόνα της κατανομής και να αντιστοιχηθεί η συγκεκριμένη βέλτιστη λύση σε μία εκ των 5 παραπάνω πολιτικών. Ο Πίνακας Vb δίνει σχεδόν όσες πληροφορίες δίνει και ο Πίνακας III και ακόμα περισσότερες. Με τη βοήθεια του Πίνακα Vb προκύπτει ότι η αναλυτικότερη δομή του προβλήματος HEUL1 είναι R_1=42, R_2=12, O_1=0,6, O_2=4,2 και U=0. Εφόσον υπάρχει υπερωρία και στην πρώτη βάρδια (O_1=0,6) και στην δεύτερη (O_2=4,2), το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιστοιχεί στην πολιτική P3. Με ανάλογες απλές λογικές σκέψεις προκύπτουν όλες οι αντιστοιχίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη του Πίνακα Vb και η αντιστοίχηση όλων των βέλτιστων λύσεων (OPT) των εξεταζόμενων προβλημάτων στις 5 πολιτικές που προτείνονται, οδήγησε στη δημιουργία μιας βάσης για σύγκριση. Γνωρίζοντας δηλαδή την πολιτική που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση, όχι μόνο προσδιορίζεται η βέλτιστη πολιτική σε κάθε περίπτωση, αλλά προσδιορίζονται και οι κατευθυντήριες γραμμές οι οποίες θα οδηγήσουν στη βελτίωση των πολιτικών NOV και FOV, που είναι και ο κύριος στόχος. Όλες οι αντιστοιχίες θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι από τη μελέτη των ακραίων πολιτικών NOV και FOV, που ήταν η αρχική προσέγγιση, η προσπάθεια εστιάστηκε σε μια γενική και πιο ολοκληρωμένη από μαθηματικής απόψεως έρευνα. Από την επαλήθευση, λοιπόν, των συνθηκών προέκυψαν αναντιστοιχίες. Για κάποιο λόγο, δεν επαληθεύονταν όλες οι περιπτώσεις.

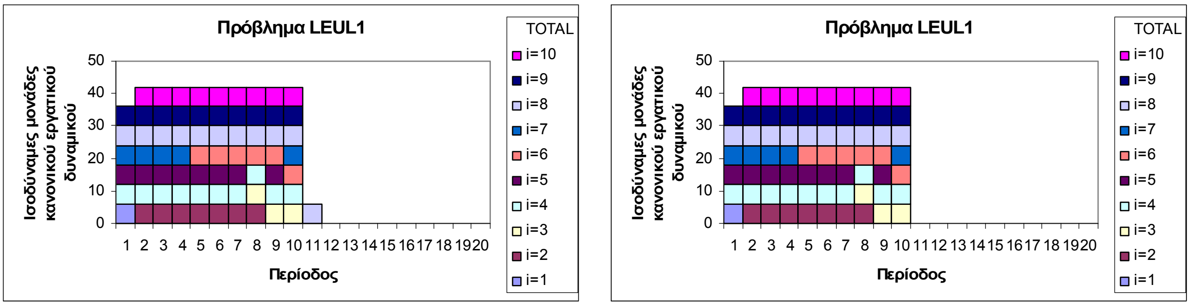
Η ιδέα για την δημιουργία του αναλυτικού τύπου για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους $C_{unequal}$ για την περίπτωση διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών (ή c_i *(U)*), βασιζόταν στη χρήση όλων των κοστών των 5 πολιτικών σε ένα τύπο, όπου θα υπολογίζονταν όλα τα κόστη (και τα 5) και θα επιλεγόταν το ελάχιστο. Δηλαδή ο τύπος πέραν των άλλων όρων, θα περιείχε την παράσταση min (K1, K2, K3, K4, K5). Ο ασφαλέστερος και πιο απλός τρόπος για την επαλήθευση και του προσδιορισμού του προβλήματος βασίστηκε επίσης σε αυτόν τον αναλυτικό τύπο. Για να βρεθεί ακριβώς που υπάρχει πρόβλημα, έπρεπε να βρεθεί το ελάχιστο κόστος από τον αναλυτικό τύπο και να προσδιοριστεί κάθε φορά σε ποια πολιτική αντιστοιχεί. Η βέλτιστη πολιτική βάση του αναλυτικού τύπου του κόστους θα συγκρινόταν με την πολιτική που προέκυπτε από το LINGO και τη μορφή της OPT. Επίσης, θεωρήθηκε σκόπιμο να βρεθούν τα κόστη όλων των πολιτικών και η αμέσως καλύτερη πολιτική με βάση τον αναλυτικό τύπο. Έτσι, θα υπήρχε μια γενική εικόνα, που έμελλε να λύσει το πρόβλημα.

Για τον προσδιορισμό των κοστών όλων των πολιτικών ήταν απαραίτητο να υπολογιστούν οι «κορυφές» της πρώτης βάρδιας (n_1) και οι «κορυφές» της δεύτερης βάρδιας (n_2). Ο προσδιορισμός τους μπορεί να γίνει είτε γραφικά, είτε από τις αντίστοιχες σχέσεις (11) και (15). Επειδή ενδιαφέρει πρωτίστως η φυσική εξήγηση, παρατίθενται εδώ παραδείγματα της εφαρμογής όλων των πολιτικών, για να γίνει απόλυτα κατανοητός ο τρόπος χρήσης τους.

Πολιτική P1 [Regular 1 & Regular 2]:

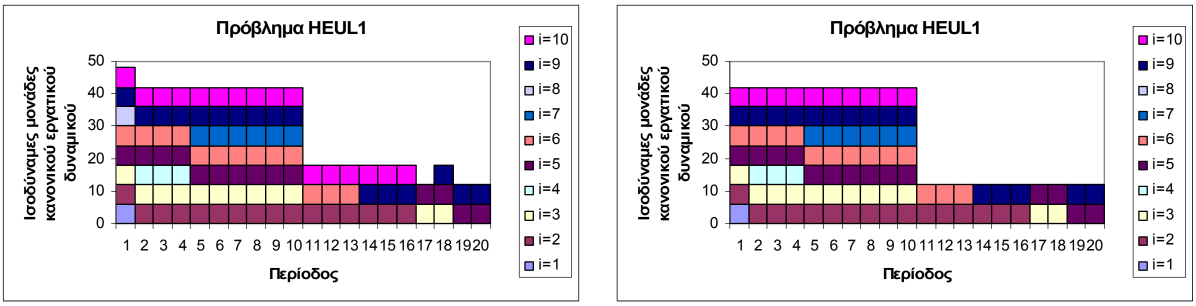
Δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα που να αντιστοιχεί σε αυτήν την πολιτική από αυτά που εξετάζονται.

Πολιτική P2 [Regular 1 & OVT 2 (=n_2)]:



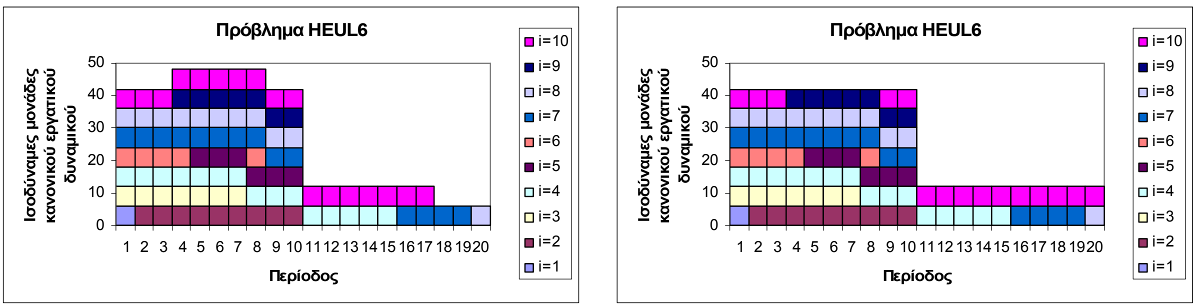
Διαγράμματα 3α και 3β : *Πρόβλημα πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της πολιτικής P2.*

Πολιτική P3 [OVT 1 (=n_1) & OVT 2 (=n_2)]:



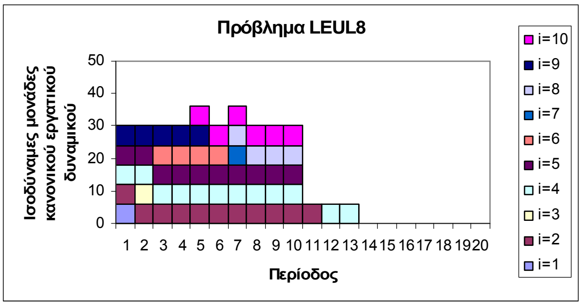
Διαγράμματα 4α και 4β : *Πρόβλημα πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της πολιτικής P3.*

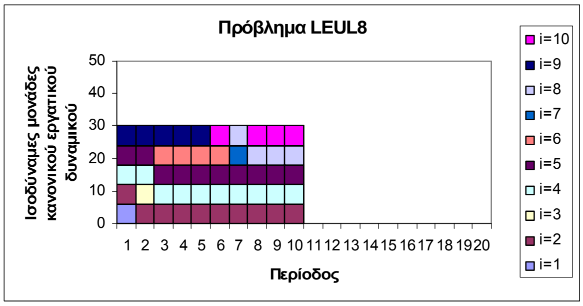
Πολιτική P4 [OVT 1 (=max [0, n_1+n_2-D]) & Regular 2]:



Διαγράμματα 5α και 5β : Πρόβλημα πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της πολιτικής P4.

Πολιτική P5 [OVT 2 (=n_1+n_2)]:





Διαγράμματα 6α και 6β : *Πρόβλημα πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της πολιτικής P5.*

Επιστρέφοντας στα προβλήματα, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά την επαλήθευση, τα προβλήματα που εντοπίστηκαν ήταν δύο. Το πρώτο πρόβλημα ήταν η παράλειψη της πολιτικής P5, η οποία υποκαθιστούσε την πολιτική P3, αλλά υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Το δεύτερο πρόβλημα ήταν η εφικτότητα (feasibility) της πολιτικής P3. Η επίλυση των αλληλένδετων προβλημάτων βασίστηκε στην παρατήρηση μετά από μελέτη των αποτελεσμάτων ότι η P3 δεν είναι εφικτή πολιτική (not feasible) όταν $\sum OVL < D$. Αυτό συμβαίνει, γιατί φυσικά, εφόσον δεν υπάρχει λόγος εισαγωγής και δεύτερης βάρδιας αφού το overload OVL δεν υπερβαίνει το χρονικό ορίζοντα D, δεν μπορεί να υπάρξει υπερωρία και στην πρώτη βάρδια (O_1) παράλληλα με υπερωρία στην δεύτερη βάρδια (O_2). Υπερωρία στην πρώτη βάρδια σημαίνει ότι κάποιοι εργάτες θα δουλέψουν υπερωριακά κατά την πρώτη βάρδια, που λόγω περιορισμών είναι αδύνατο (σύμφωνα με το σύνολο περιορισμών (3), κάποιος εργάτης δεν μπορεί να εργαστεί και υπερωριακά στη βάρδια που απασχολείται κανονικά). Τη θέση της λαμβάνει υποχρεωτικά η πιο ακριβή αλλά εφικτή πολιτική P5. Άρα ο τύπος πέραν των άλλων όρων, θα περιέχει τελικά την παράσταση min (K1, K2, K4, K5). Με την ίδια λογική, όταν συμβαίνει το αντίθετο ($\sum OVL \geq D$), η πολιτική P3 είναι εφικτή, όπως και η P5, αλλά τώρα προτιμάται πάντα η καλύτερη πολιτική (η πιο φτηνή), δηλαδή η P3. Άρα η πολιτική P5 σε αυτή την περίπτωση μπορεί να παραλειφθεί. Άρα ο τύπος πέραν των άλλων όρων, θα περιέχει σε αυτήν την περίπτωση την παράσταση min (K1, K2, K3, K4).

Αποτέλεσμα των παραπάνω λογικών παρατηρήσεων είναι να αναδιαρθρωθούν οι συνθήκες (Conditions for Optimality) και να προσδιοριστεί η τελική μορφή του αναλυτικού τύπου υπολογισμού του συνολικού κόστους. Η εκ νέου επαλήθευση και μέσω των συνθηκών και μέσω του αναλυτικού τύπου έδωσε άριστα αποτελέσματα, αφού επαληθεύτηκαν εν τέλει όλες οι περιπτώσεις και εξαλείφθηκαν όλα τα προβλήματα. Η τεράστια σημασία της παραπάνω ανακάλυψης είναι ότι με βάση τον αναλυτικό τύπο μπορεί άμεσα να προσδιοριστεί ποια πολιτική είναι βέλτιστη για κάθε περίπτωση, ακόμα και για την έως τώρα δύσκολη περίπτωση του διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών. Με απλά δεδομένα την κατανομή του φορτίου παραγωγής w_i, για ίση κατανομή εργατικού δυναμικού οποιαδήποτε τιμής a_i, για διαφορετικό κόστος μεταξύ των βαρδιών με οποιαδήποτε τιμή c_1 και c_2, για οποιαδήποτε υπερωριακή αμοιβή r και για οποιοδήποτε ορίζοντα προγραμματισμού D, μπορεί να υπολογιστεί σε δευτερόλεπτα η δομή της βέλτιστης λύσης μέσω μιας από τις 5 πολιτικές και παράλληλα το συνολικό κόστος αυτής της λύσης. Το επίτευγμα αυτό καθίσταται ακόμα πιο σπουδαίο, αν θυμηθεί κανείς ότι έως τώρα για να προκύψει μια βέλτιστη λύση μέσω του LINGO (γιατί ο αλγόριθμος των NOV και FOV δεν δίνει πάντα βέλτιστες λύσεις) στις περισσότερες περιπτώσεις έπρεπε να περιμένει κανείς από 1 έως και 4 ώρες! Εκτός αυτού, η μορφή και η δομή της λύσης μέσω της ακολουθούμενης προσέγγισης απέκτησαν νόημα και δόθηκε μια λογική εξήγηση.

4.2. Αποτελέσματα

Το βασικό αποτέλεσμα της έρευνας, που πραγματοποιήθηκε σε δύο επίπεδα, λογικής και μαθηματικής προσέγγισης, ήταν η διατύπωση 5 ιδιοτήτων και η απόδειξή τους. Οι 5 ιδιότητες (properties) είναι οι εξής:

1. Στο πρόβλημα με μία βάρδια (1S) υπάρχει μόνο μία «κορυφή» (σκαλοπάτι).

2. Στο πρόβλημα με δύο βάρδιες (2S) με ίσα ποσά κόστους $c_1 = c_2$ η βέλτιστη λύση παρουσιάζει μόνο μία «κορυφή» (σκαλοπάτι) για όλες τις βάρδιες.

3. Με βάση την ιδιότητα (2) για ίσα κόστη $c_1 = c_2$ ισχύει πάντα η ιδιότητα «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing), η οποία συνδέει την υπερωρία (O) και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U).

4. Για οποιαδήποτε ποσά κόστους c_1 και c_2 δεν μπορεί να βελτιωθεί η λύση μετακινώντας παραπάνω από $k = D - n_2$ ισοδύναμες μονάδες πλήρους απασχόλησης (μονάδες κανονικού εργατικού δυναμικού) στην δεύτερη βάρδια (2S) (οπότε το συνολικό φορτίο στην δεύτερη βάρδια γίνεται ίσο με $\sum OVL + k$).

5. Η τιμή του συνολικού κόστους της βέλτιστη λύσης μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια από δύο αναλυτικούς τύπους, έναν για $c_1 = c_2$ (σχέση (15)) και έναν για $c_1 < c_2$ (σχέση (16)):

Α. Για $c_1 = c_2$:

$$C_{identical} = c_1 \cdot a_i \cdot \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i}{D} \right\rfloor + c_1 \cdot a_i \cdot \min\left[1, (1+r) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} w_i}{D} - \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i}{D} \right\rfloor \right)\right] \tag{15}$$

Β. Για $c_1 < c_2$:

$$C_{unequal} = c_1 \cdot a_i \cdot \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} \right\rfloor + c_2 \cdot a_i \cdot \left\lfloor \frac{\sum OVL}{D} \right\rfloor + \begin{cases} a_i \cdot \min \begin{bmatrix} c_1 + c_2, \\ c_1 + c_2 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot n_2, \\ c_1 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot \max(0, n_1 + n_2 - D) + c_2, \\ c_2 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot (n_1 + n_2) \end{bmatrix}, & \text{όταν} \quad \sum OVL < D. \\ a_i \cdot \min \begin{bmatrix} c_1 + c_2, \\ c_1 + c_2 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot n_2, \\ c_1 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot n_1 + c_2 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot n_2, \\ c_1 \cdot \dfrac{1+r}{D} \cdot \max(0, n_1 + n_2 - D) + c_2 \end{bmatrix}, & \text{όταν} \quad \sum OVL \geq D. \end{cases}$$

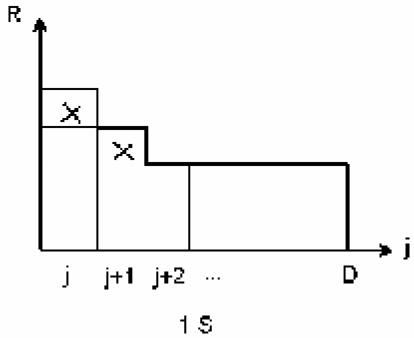
$$\text{όπου :} \quad \sum OVL = \sum_{i=1}^{N} (w_i - D), \qquad n_1 = D \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} - \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i - \sum OVL}{D} \right\rfloor \right], \qquad n_2 = D \cdot \left[\frac{\sum OVL}{D} - \left\lfloor \frac{\sum OVL}{D} \right\rfloor \right] \tag{16}$$

<u>Απόδειξη Ιδιότητας 1</u>

Ιδιότητα 1: Στο πρόβλημα με μία βάρδια (1S) υπάρχει μόνο μία «κορυφή» (σκαλοπάτι).

<u>Απόδειξη:</u>

Έστω ότι υπάρχουν 2 «κορυφές», έστω μία στην περίοδο *j* και μία στην περίοδο *j+1*, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1: *Σχήμα για την απόδειξη της ιδιότητας 1.*

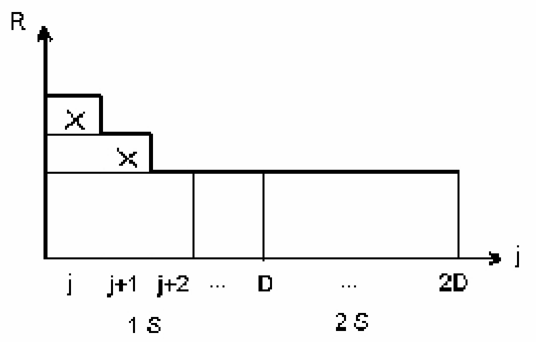
Αυτό σημαίνει ότι την περίοδο *j* θα δουλέψουν *N* μηχανές, την περίοδο *j+1*, έστω *N–1* μηχανές και σε όλες τις άλλες περιόδους *N–2* μηχανές. Επιλέγοντας μία μηχανή της περιόδου *j*, που δεν υπάρχει στην περίοδο *j+2*, γεγονός πάντα εφικτό με βάση τον περιορισμό ότι κάθε μηχανή δουλεύει μόνο μία φορά ανά περίοδο και ότι *N–1<N*, και μεταφέροντας τη μηχανή αυτή στην περίοδο *j+2*, η κορυφή *j* ταυτίζεται με την κορυφή *j+1*. Άρα η κορυφή είναι μοναδική.

Απόδειξη Ιδιότητας 2

Ιδιότητα 2: Στο πρόβλημα με δύο βάρδιες (2S) με ίσα ποσά κόστους $c_1 = c_2$ η βέλτιστη λύση παρουσιάζει μόνο μία «κορυφή» (σκαλοπάτι) για όλες τις βάρδιες.

Απόδειξη:

Εφόσον ισχύει $c_1 = c_2$, η απόδειξη είναι όμοια με την απόδειξη της Ιδιότητας 1, αρκεί να θεωρηθεί χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού *2D* αντί για *D* (βλέπε σχήμα παρακάτω).



Σχήμα 2: *Σχήμα για την απόδειξη της ιδιότητας 2.*

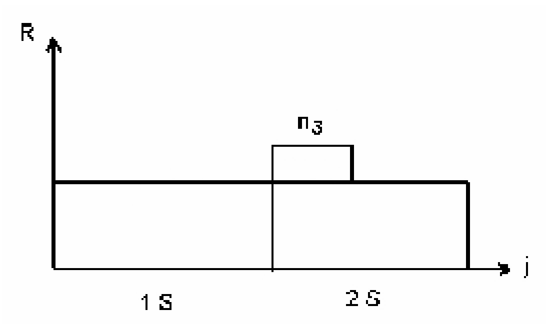
Απόδειξη Ιδιότητας 3

Ιδιότητα 3: Με βάση την ιδιότητα (2) για ίσα κόστη $c_1 = c_2$ ισχύει πάντα η ιδιότητα «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing), η οποία συνδέει την υπερωρία (O) και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U).

Απόδειξη:

1ος τρόπος:

Με σύγκριση του κόστους μόνο για την «κορυφή» n_3 και αγνοώντας το σταθερό μέρος του συνολικού κόστους κάτω από την κορυφή: $C_{solid} = c_1 \cdot a_i \cdot \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i}{D} \right\rfloor$.



Σχήμα 3: *Σχήμα για την απόδειξη της ιδιότητας 3.*

α) Έστω $n_3 > \frac{D}{1+r}$, τότε η κορυφή n_3 συμφέρει (μικρότερο κόστος) να παραμείνει ως κανονική εργασία (regular), άρα το κόστος είναι $C_{reg} = a_i \cdot c_1$.

β) Έστω $n_3 \leq \frac{D}{1+r}$, τότε η κορυφή n_3 συμφέρει (μικρότερο κόστος) να θεωρηθεί ως υπερωριακή εργασία (overtime), άρα το κόστος είναι $C_{ovt} = a_i \cdot c_1 \cdot n_3 \cdot \frac{1+r}{D} < C_{reg}$.

γ) Έστω ότι ένα μέρος της n_3 θεωρείται κανονική εργασία (ανεξαρτήτως του λόγου $\frac{D}{1+r}$), έστω $n_{3\,reg}$ και ένα μέρος της υπερωριακή εργασία, έστω $n_3 - n_{3\,reg}$, άρα το κόστος είναι $C_{reg+ovt} = a_i \cdot c_1 + a_i \cdot c_1 \cdot (n_3 - n_{3\,reg}) \cdot \frac{1+r}{D} > C_{reg} > C_{ovt}$.

Άρα σε καμιά περίπτωση δεν συμφέρει η συνύπαρξη και κανονικής και υπερωριακής εργασίας. Οπότε για τη βέλτιστη λύση ισχύει, ανάλογα με το λόγο $\frac{D}{1+r}$, ή καθόλου υπερωρία ή πλήρης υπερωρία, δηλαδή η ιδιότητα «all-or-nothing». (Είναι προφανές ότι στην περίπτωση α υπάρχει μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U) ίσο με $D–n_3$, ενώ στην περίπτωση β δεν υπάρχει.)

2^{ος} τρόπος:

Με άμεση χρήση του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (U). Η λογική είναι όμοια με τον 1^{ο} τρόπο.

α) Έστω n_3 regular, άρα $U_{reg} = \frac{D-n_3}{D}$ και $O_{reg} = 0$.

β) Έστω n_3 overtime, άρα $U_{ovt} = 0$ και $O_{reg} \neq 0$.

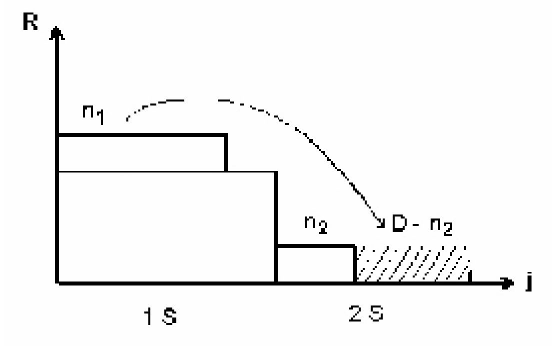
γ) Έστω $n_{3\,reg}$ regular και n_3 - $n_{3\,reg}$ overtime, άρα $U_{reg+ovt} = \frac{D-n_{3\,reg}}{D} > U_{reg} > U_{ovt}$ και $O_{reg+ovt} \neq 0$. Η λύση αυτή είναι προφανώς χειρότερη από τις άλλες δύο, που σημαίνει και πάλι ότι δεν συμφέρει η συνύπαρξη και κανονικής και υπερωριακής εργασίας. Οπότε για τη βέλτιστη λύση ισχύει, ή καθόλου υπερωρία (O=0 και U≠0) ή πλήρης υπερωρία (O≠0 και U=0), δηλαδή η ιδιότητα «all-or-nothing».

<u>Απόδειξη Ιδιότητας 4</u>

Ιδιότητα 4: Για οποιαδήποτε ποσά κόστους c_1 και c_2 δεν μπορεί να βελτιωθεί η λύση μετακινώντας παραπάνω από $k = D - n_2$ ισοδύναμες μονάδες πλήρους απασχόλησης (μονάδες κανονικού εργατικού δυναμικού) στην δεύτερη βάρδια (2S) (οπότε το συνολικό φορτίο στην δεύτερη βάρδια γίνεται ίσο με $\sum OVL + k$).

Απόδειξη:

Έστω ότι μεταφέρεται μέρος της κορυφής n_1 από την πρώτη βάρδια (1S) στην δεύτερη βάρδια (2S), έστω $k' > k = D - n_2$. Το μέρος αυτό θα είναι ίσο με $k' = (D - n_2) + k^*$. Άρα $n_2' = n_2 + (D - n_2) + k^* = D + k^* > n_2$.

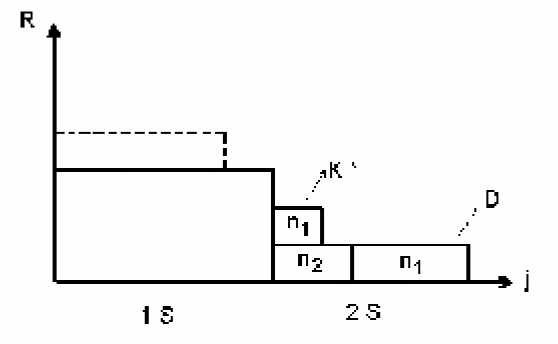


Σχήμα 4: *Σχήμα για την απόδειξη της ιδιότητας 4.*

1ος τρόπος:

Με σύγκριση του κόστους μόνο για την «κορυφή» n_1 και αγνοώντας το σταθερό μέρος του συνολικού κόστους κάτω από την κορυφή αυτή.

α) Έστω $k' = n_1$, άρα $n_1' = 0$ και $n_2' = D + k^*$.

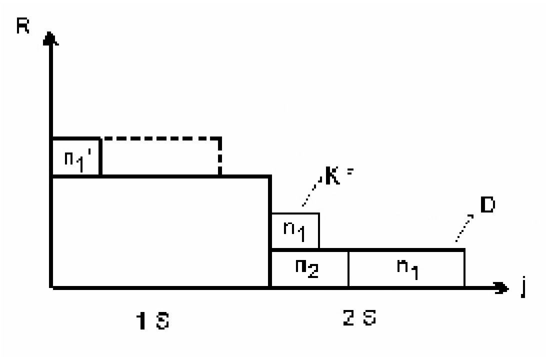


Σχήμα 4α: *Σχήμα για την απόδειξη της ιδιότητας 4.*

i. Για $c_1 = c_2$: $\left.\begin{aligned} C_{prin} &= c_1 + c_2 = 2 \cdot c_2 \\ C_{metá} &= 0 + 2 \cdot c_2 = 2 \cdot c_2 \end{aligned}\right\}$ $C_{prin} = C_{metá}$, άρα είναι αδιάφορο.

ii. Για $c_1 < c_2$: $\left.\begin{aligned} C_{prin} &= c_1 + c_2 \\ C_{metá} &= 0 + 2 \cdot c_2 = 2 \cdot c_2 \end{aligned}\right\}$ $C_{prin} < C_{metá}$, άρα χειρότερη λύση.

β) Έστω $k' < n_1$, άρα $n_1' = n_1 - k' \neq 0$ και $n_2' = D + k^*$.



Σχήμα 4β: *Σχήμα για την απόδειξη της ιδιότητας 4.*

i. Για $c_1 = c_2$: $\left.\begin{aligned} C_{prin} &= c_1 + c_2 = 2 \cdot c_2 \\ C_{metá} &= c_1 + 2 \cdot c_2 = 3 \cdot c_2 \end{aligned}\right\} C_{prin} < C_{metá}$, άρα χειρότερη λύση.

ii. Για $c_1 < c_2$: $\left.\begin{aligned} C_{prin} &= c_1 + c_2 \\ C_{metá} &= c_1 + 2 \cdot c_2 \end{aligned}\right\} C_{prin} < C_{metá}$, άρα χειρότερη λύση.

Άρα αφού σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις η λύση δεν βελτιώθηκε (δηλαδή μετά τη μεταφορά το νέο κόστος να είναι μικρότερο), η ιδιότητα αποδείχτηκε.

$2^{ος}$ τρόπος:

Με άμεση χρήση του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (U). Η λογική είναι όμοια με τον $1^{ο}$ τρόπο.

α) Έστω $k' = n_1$, άρα $n_1' = 0$ και $n_2' = D + k^*$.

$$U_{prin} = \frac{D - n_1}{D} + \frac{D - n_2}{D} = \frac{D - k'}{D} + \frac{D - n_2}{D} = \frac{D - k' + D - n_2}{D} = \frac{D - k' + k' - k^*}{D} = \frac{D - k^*}{D}$$

και $U_{metá} = 0 + \frac{D - k^*}{D} = \frac{D - k^*}{D}$, άρα $U_{prin} = U_{metá}$, άρα αδιάφορο. Δηλαδή η λύση δεν βελτιώνεται.

β) Έστω $k' < n_1$, άρα $n_1' = n_1 - k' \neq 0$ και $n_2' = D + k^*$.

$$U_{prin} = \frac{D - n_1}{D} + \frac{D - n_2}{D} = \frac{D - k'}{D} + \frac{D - n_2}{D} = \frac{D - k' + D - n_2}{D} = \frac{D - k' + k' - k^*}{D} = \frac{D - k^*}{D}$$

και $U_{metá} = \frac{D-n_1'}{D} + \frac{D-k^*}{D} = \frac{D-n_1'}{D} + U_{prin}$, άρα $U_{metá} > U_{prin}$, άρα χειρότερη λύση. Δηλαδή η λύση όχι μόνο δεν βελτιώνεται, αλλά χειροτερεύει.

Αυτό παρατηρείται και για τις δύο περιπτώσεις, άρα αποδείχτηκε η ιδιότητα.

Απόδειξη Ιδιότητας 5

Ιδιότητα 5: Η τιμή του συνολικού κόστους της βέλτιστη λύσης μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια από δύο αναλυτικούς τύπους, έναν για $c_1 = c_2$ (σχέση (15)) και έναν για $c_1 < c_2$ (σχέση (16)).

Η παραπάνω ιδιότητα αποδεικνύεται ότι ισχύει, αφού επαληθεύεται για όλα τα εξεταζόμενα προβλήματα, δηλαδή για ίση κατανομή εργατικού δυναμικού (Even manning). Για την επαλήθευση χρησιμοποιούνται οι τύποι υπολογισμού της κορυφής n_1 (σχέση (11)) και της κορυφής n_2 (σχέση (14)). Στον Πίνακα 6α φαίνεται το συνολικό κόστος όπως προκύπτει από τη λύση OPT και το LINGO (βλέπε Πίνακα II στο Παράρτημα), αλλά και το συνολικό κόστος όπως προκύπτει από τον αναλυτικό τύπο για $c_1 = c_2$ (σχέση (15)). Ομοίως στον Πίνακα 6β, φαίνεται το συνολικό κόστος από τη λύση OPT (και το LINGO), αλλά και το συνολικό κόστος από τον αναλυτικό τύπο για $c_1 < c_2$ (σχέση (16)).

Πίνακας 6α: *Το συνολικό κόστος από τη λύση OPT (και το LINGO) και το συνολικό κόστος από τον αναλυτικό τύπο για* $c_1 = c_2$.

	ci	(I)											
	r	(L)						(H)					
		rep	n1	n2	Σwi	C OPT	C identical	rep	n1	n2	Σwi	C OPT	C identical
LOAD (L)	MANNING (E)	1	9	1	70	42	42	1	9	1	70	42	42
		2	2	2	74	45	45	2	2	2	74	45,6	45,6
		3	5	2	57	35,25	35,25	3	5	2	57	36	36
		4	0	1	61	36,75	36,75	4	0	1	61	36,9	36,9
		5	1	7	88	54	54	5	1	7	88	54	54
		6	4	2	56	34,5	34,5	6	4	2	56	35,4	35,4
		7	9	3	62	37,5	37,5	7	9	3	62	37,8	37,8
		8	2	3	55	33,75	33,75	8	2	3	55	34,5	34,5
		9	6	1	47	29,25	29,25	9	6	1	47	30	30
		10	3	2	55	33,75	33,75	10	3	2	55	34,5	34,5
LOAD (H)	MANNING (E)	1	1	7	98	60	60	1	1	7	98	60	60
		2	5	1	86	52,5	52,5	2	5	1	86	53,4	53,4
		3	5	4	109	66	66	3	5	4	109	66	66
		4	8	3	81	48,75	48,75	4	8	3	81	48,9	48,9
		5	2	4	86	52,5	52,5	5	2	4	86	53,4	53,4
		6	5	7	92	55,5	55,5	6	5	7	92	55,8	55,8
		7	8	1	119	72	72	7	8	1	119	72	72
		8	4	6	90	54	54	8	4	6	90	54	54
		9	0	0	80	48	48	9	0	0	80	48	48
		10	0	4	84	51	51	10	0	4	84	51,6	51,6

Πίνακας 6β: *Το συνολικό κόστος από τη λύση OPT (και το LINGO) και το συνολικό κόστος από τον αναλυτικό τύπο για* $c_1 < c_2$.

	ci	(U)											
	r	(L)						(H)					
		rep	n1	n2	Σwi	C OPT	C identical	rep	n1	n2	Σwi	C OPT	C identical
LOAD (L)	MANNING (E)	1	9	1	70	43,5	43,5	1	9	1	70	43,8	43,8
		2	2	2	74	48	48	2	2	2	74	49,2	49,2
		3	5	2	57	39	39	3	5	2	57	39,6	39,6
		4	0	1	61	37,5	37,5	4	0	1	61	37,8	37,8
		5	1	7	88	60	60	5	1	7	88	60	60
		6	4	2	56	39	39	6	4	2	56	39,6	39,6
		7	9	3	62	40,5	40,5	7	9	3	62	41,4	41,4
		8	2	3	55	37,5	37,5	8	2	3	55	39	39
		9	6	1	47	31,5	31,5	9	6	1	47	31,8	31,8
		10	3	2	55	37,5	37,5	10	3	2	55	39	39
LOAD (H)	MANNING (E)	1	1	7	98	77,25	77,25	1	1	7	98	78	78
		2	5	1	86	65,25	65,25	2	5	1	86	66,3	66,3
		3	5	4	109	81,75	81,75	3	5	4	109	83,7	83,7
		4	8	3	81	58,5	58,5	4	8	3	81	59,4	59,4
		5	2	4	86	67,5	67,5	5	2	4	86	69	69
		6	5	7	92	67,5	67,5	6	5	7	92	67,8	67,8
		7	8	1	119	91,5	91,5	7	8	1	119	91,8	91,8
		8	4	6	90	66	66	8	4	6	90	66	66
		9	0	0	80	54	54	9	0	0	80	54	54
		10	0	4	84	60	60	10	0	4	84	61,2	61,2

Ένα άλλο σπουδαίο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας είναι η διατύπωση 5 πολιτικών προγραμματισμού, ειδικά για τη δύσκολη περίπτωση του διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών (c_i *(U)*). Η επιλογή μεταξύ των πολιτικών μπορεί να γίνει εύκολα μέσω του κόστους. Για να επαληθευτεί η παρατήρηση αυτή, υπολογίστηκαν για όλα τα εξεταζόμενα προβλήματα τα κόστη και των 5 πολιτικών καθώς και το ελάχιστο κόστος από αυτά τα 5, που αντιστοιχεί στην βέλτιστη πολιτική, άρα και στη βέλτιστη λύση. Η βέλτιστη αυτή πολιτική συγκρίθηκε στη συνέχεια με τη πολιτική που αντιστοιχεί στο κόστος της βέλτιστης λύσης OPT. Ο τρόπος που πραγματοποιήθηκε αυτή η αντιστοίχηση βέλτιστων λύσεων OPT με τις 5 πολιτικές έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά στην αρχή του κεφαλαίου (βλέπε Κεφάλαιο 4, Ενότητα 4.1. Υπολογισμοί και

Προσέγγιση, Πίνακα II, Πίνακες Va και Vb και Διαγράμματα 3α, 3β έως 6α και 6β). Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν οι σχετικοί Πίνακες 7α και 7β.

Πίνακας 7α: *Το συνολικό κόστος και η βέλτιστη πολιτική όπως προκύπτουν και από τη λύση OPT και από τον αναλυτικό τύπο για* $c_1 < c_2$ *και r (L).*

	ci	(U)													
	r	(L)													
		rep	n1	n2	Σwi	ΣOVL	C OPT	Βέλτιστη Πολιτική βάση λύσης OPT	C P1	C P2	C P3	C P4	C P5	C unequal	Βέλτιστη Πολιτική βάση C unequal
LOAD (L)	MANNING (E)	1	9	1	70	1	43,5	P2	54	43,5		48	51	43,5	P2
		2	2	2	74	2	48	P5	60	51		54	48	48	P5
		3	5	2	57	2	39	P2	48	39		42	40,5	39	P2
		4	0	1	61	1	37,5	P5	54	43,5		48	37,5	37,5	P5
		5	1	7	88	7	60	P4	66	64,5		60	60	60	P4 KAI P5
		6	4	2	56	2	39	P2	48	39		42	39	39	P2 KAI P5
		7	9	3	62	3	40,5	P2	48	40,5		43,5	48	40,5	P2
		8	2	3	55	3	37,5	P5	48	40,5		42	37,5	37,5	P5
		9	6	1	47	1	31,5	P2	42	31,5		36	34,5	31,5	P2
		10	3	2	55	2	37,5	P5	48	39		42	37,5	37,5	P5
LOAD (H)	MANNING (E)	1	1	7	98	27	77,25	P3	84	82,5	77,25	78		77,25	P3
		2	5	1	86	21	65,25	P3	78	67,5	65,25	72		65,25	P3
		3	5	4	109	24	81,75	P3	90	84	81,75	84		81,75	P3
		4	8	3	81	13	58,5	P3	66	58,5	58,5	60,75		58,5	P2 KAI P3
		5	2	4	86	24	67,5	P3	78	72	67,5	72		67,5	P3
		6	5	7	92	17	67,5	P4	72	70,5	68,25	67,5		67,5	P4
		7	8	1	119	31	91,5	P3	102	91,5	91,5	96		91,5	P2 KAI P3
		8	4	6	90	16	66	P4	72	69	66	66		66	P3 KAI P4
		9	0	0	80	10	54	P3	72	60	54	66		54	P3
		10	0	4	84	14	60	P3	72	66	60	66		60	P3

Πίνακας 7β: *Το συνολικό κόστος και η βέλτιστη πολιτική όπως προκύπτουν και από τη λύση OPT και από τον αναλυτικό τύπο για $c_1 < c_2$ και r (H).*

	ci	(U)													
	r	(H)													
		rep	n1	n2	Σwi	ΣOVL	C OPT	Βέλτιστη Πολιτική βάση λύσης OPT	C P1	C P2	C P3	C P4	C P5	C unequal	Βέλτιστη Πολιτική βάση C unequal
LOAD (L)	MANNING (E)	1	9	1	70	1	43,8	P2	54	43,8		48	54	43,8	P2
		2	2	2	74	2	49,2	P5	60	51,6		54	49,2	49,2	P5
		3	5	2	57	2	39,6	P2	48	39,6		42	42,6	39,6	P2
		4	0	1	61	1	37,8	P5	54	43,8		48	37,8	37,8	P5
		5	1	7	88	7	60	P4	66	66,6		60	62,4	60	P4
		6	4	2	56	2	39,6	P2	48	39,6		42	40,8	39,6	P2
		7	9	3	62	3	41,4	P2	48	41,4		43,8	51,6	41,4	P2
		8	2	3	55	3	39	P5	48	41,4		42	39	39	P5
		9	6	1	47	1	31,8	P2	42	31,8		36	36,6	31,8	P2
		10	3	2	55	2	39	P5	48	39,6		42	39	39	P5
LOAD (H)	MANNING (E)	1	1	7	98	27	78	***P4***	84	84,6	79,5	78		78	P4
		2	5	1	86	21	66,3	P3	78	67,8	66,3	72		66,3	P3
		3	5	4	109	24	83,7	P3	90	85,2	83,7	84		83,7	P3
		4	8	3	81	13	59,4	*P2*	66	59,4	60,6	60,9		59,4	P2
		5	2	4	86	24	69	P3	78	73,2	69	72		69	P3
		6	5	7	92	17	67,8	P4	72	72,6	71,1	67,8		67,8	P4
		7	8	1	119	31	91,8	*P2*	102	91,8	93	96		91,8	P2
		8	4	6	90	16	66	P4	72	70,8	68,4	66		66	P4
		9	0	0	80	10	54	P3	72	60	54	66		54	P3
		10	0	4	84	14	61,2	P3	72	67,2	61,2	66		61,2	P3

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι επιτέλους δεν απαιτείται η συνδρομή του LINGO και η χρονοβόρα εφαρμογή του μοντέλου για τον προσδιορισμό του κόστους. Με βάση τη λογική που έχει περιγραφεί αναλυτικά και τον απλό αναλυτικό τύπο υπολογισμού του κόστους (σχέση (16)) μπορεί να υπολογιστεί άμεσα το συνολικό κόστος και η πολιτική προγραμματισμού, η οποία αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη λύση.

Ένα επίσης σημαντικό αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών, υπό τις οποίες μία πολιτική, από τις 5 που προτείνονται, είναι βέλτιστη (Conditions for Optimality). Για τον προσδιορισμό των συνθηκών αυτών, συγκρίνεται (ανά δύο) το κόστος των πολιτικών P1, P2, P4 και P5 όταν $\sum OVL < D$, και το κόστος των πολιτικών P1, P2, P3 και P4 όταν $\sum OVL \geq D$ (βλέπε Κεφάλαιο 4 για μια αναλυτική συζήτηση για το θέμα αυτό). Οι συνθήκες παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Όπως είναι φυσικό, όλες οι συνθήκες επαληθεύονται, δηλαδή χρησιμοποιώντας λογικά τις συνθήκες για την αντίστοιχη πολιτική, καταλήγει κανείς στην βέλτιστη πολιτική, που αντιστοιχεί στη λύση OPT (και όπως αποδείχτηκε συμπίπτει με τις πολιτικές, που προκύπτουν από τη χρήση του αναλυτικού τύπου). Γίνεται πλέον προφανής η άμεση σχέση του Πίνακα 8 και της σχέσης (16).

Πίνακας 8: *Συνθήκες υπό τις οποίες κάθε πολιτική είναι βέλτιστη (Conditions for Optimality).*

	Policy	Conditions for Optimality
P1	Regular 1 & Regular 2	$n_2 > A \quad \& \quad A < max\,[0, n_1 + n_2 - D] \quad \& \quad \begin{cases} A < \frac{c_2}{c_1}(n_1 + n_2 - A), & \text{όταν } \sum OVL < D \\ c_2\,(A - n_2) < c_1\,(n_1 - A), & \text{όταν } \sum OVL \geq D \end{cases}$
P2	Regular 1 & OVT 2 (=n_2)	$n_2 \leq A \quad \& \quad c_1\, min\,[A, A + D - n_1 - n_2] < c_2\,(A - n_2) \quad \& \quad \begin{cases} n_1 > A\frac{c_1}{c_2}, & \text{όταν } \sum OVL < D \\ n_1 > A, & \text{όταν } \sum OVL \geq D \end{cases}$
P3	OVT 1 (=n_1) & OVT 2 (=n_2)	$c_2\,(A - n_2) \geq c_1\,(n_1 - A) \quad \& \quad n_1 \leq A \quad \& \quad c_1\, min\,[n_1, D - n_2] < c_2\,(A - n_2), \quad \text{όταν } \sum OVL \geq D$
P4	OVT 1 (=max [0, n_1+n_2-D]) & Regular 2	$A \geq max\,[0, n_1 + n_2 - D] \quad \& \quad c_1\, min\,[A, A + D - n_1 - n_2] \geq c_2\,(A - n_2) \quad \& \quad \begin{cases} max\,[0, n_1 + n_2 - D] < \frac{c_2}{c_1}(n_1 + n_2 - A), & \text{όταν } \sum OVL < D \\ c_1\, min\,[n_1, D - n_2] \geq c_2\,(A - n_2), & \text{όταν } \sum OVL \geq D \end{cases}$
P5	OVT 2 (=n_1+n_2)	$A \geq \frac{c_2}{c_1}(n_1 + n_2 - A) \quad \& \quad n_1 \leq A\frac{c_1}{c_2} \quad \& \quad max\,[0, n_1 + n_2 - D] \geq \frac{c_2}{c_1}(n_1 + n_2 - A), \quad \text{όταν } \sum OVL < D$

4.3. Άμεσες Εφαρμογές

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα, συγκρίνοντας τη μορφή που προκύπτει από τη λογική του αλγορίθμου με την αντίστοιχη μορφή από την εφαρμογή του μοντέλου στο LINGO. Στη λύση του LINGO δεν λαμβάνεται υπόψη η φυσική σημασία των μεταβλητών, η αναγκαιότητα της συνεχόμενης λειτουργίας των μηχανών (που ισοδυναμεί με μηδενικό νεκρό χρόνο) και γενικά κοινές βιομηχανικές πρακτικές, όπως αντίθετα λαμβάνονται υπόψη, μέσα στη λογική του αλγορίθμου. Κατά συνέπεια, η μορφή της λύσης που προσδιορίζεται από τους αλγορίθμους βρίσκεται πιο κοντά στην καθημερινή πρακτική σε μια βιομηχανία, γεγονός που αυξάνει αισθητά τις πιθανότητες της άμεσης εφαρμογής του αλγορίθμου ως καθημερινό πρακτικό εργαλείο προγραμματισμού.

Η ιδέα της βελτίωσης των αρχικών λύσεων των πολιτικών NOV και FOV, εισάγοντας επιπλέον υπερωρία, με βάση την ιδιότητα «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing), που συνδέει την υπερωρία (O) και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U), αποδείχτηκε απολύτως σωστή και έχει θετικότατα αποτελέσματα, όπως τη σημαντική μείωση του συνολικού κόστους (C) και τον ταυτόχρονο μηδενισμό του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (U).

Με βάση αυτή τη λογική της ιδιότητας «all-or-nothing», ο αλγόριθμος της πολιτικής NOV μπορεί να βελτιωθεί άμεσα και εύκολα. Αν και υπάρχουν περιπτώσεις, όπου η NOV παρείχε ήδη βέλτιστες λύσεις (όταν η OPT λύση δεν έχει υπερωρία), οι αρχικές λύσεις της NOV θα βελτιωθούν με την προσθήκη υπερωρίας. Όσον αφορά στη FOV, με την ίδια ακριβώς λογική, ειδικά για λύσεις με μορφή 1S, εισάγοντας επιπλέον υπερωρία, οι λύσεις FOV θα ταυτιστούν με τις λύσεις OPT σε πολλές περιπτώσεις, ενώ αναμένεται και να τις ξεπεράσουν (δηλαδή κάποια βελτιωμένη λύση FOV θα δίνει συνολικό κόστος μικρότερο ακόμα και από αυτό της λύσης OPT).

Πέρα από την απλή βελτίωση των εν λόγω αλγορίθμων και των λογικών τους, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένας νέος σύνθετος αλγόριθμος, αρκετά εξελιγμένος ώστε να συνδυάζει όλα τα πλεονεκτήματα της βελτίωσης των πολιτικών FOV και NOV. Η πιθανή δημιουργία ενός σύνθετου εξελιγμένου αλγορίθμου μπορεί να βασιστεί στη χρήση των πολιτικών που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία. Έτσι, δύναται να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος, που ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κόστους μεταξύ των βαρδιών, να επιλέγει τη βέλτιστη πολιτική. Η επιλογή της βέλτιστης πολιτικής και γενικά η λογική του αλγορίθμου μπορεί να βασιστεί, είτε στον υπολογισμό της τιμής του συνολικού κόστους από τους δύο προτεινόμενους αναλυτικούς τύπους (σχέση (15) για ίδιο κόστος και σχέση (16) για διαφορετικό κόστος), είτε στις συνθήκες υπό της οποίες κάποια πολιτική είναι βέλτιστη (Conditions for Optimality) ή ενδεχομένως και στο συνδυασμό τους. Αναμφίβολα, η δημιουργία και η ανάπτυξη ενός τέτοιου αλγορίθμου έχει μεγάλη σημασία, αφού θα παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, με κυριότερο το ότι θα φτάνει σε μία βέλτιστη λύση μέσα σε ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Ο έλεγχος της παραγωγής σε επίπεδο εργοστασίου (shop floor) είναι ένα αρκετά σύνθετο και κρίσιμο έργο, το οποίο καλείται να επιτελέσει ο διευθυντής παραγωγής σε καθημερινή βάση. Ο ελλιπής έλεγχος της παραγωγής μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην δυνατότητα μίας εταιρείας να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της παραγωγής. Ο έλεγχος της παραγωγής σε επίπεδο εργοστασίου σχετίζεται κυρίως με τις διαδικασίες χρονοπρογραμματισμού. Το πρόβλημα του χρονο-προγραμματισμού μπορεί να οριστεί γενικά ως ο καθορισμός μιας ακολουθίας δραστηριοτήτων (operations) προκειμένου να ολοκληρωθεί ένας αριθμός παραγγελιών παραγωγής (production orders) και η ανάθεση χρόνων και πόρων (για παράδειγμα μηχανών παραγωγής, εργατικού δυναμικού) στις λειτουργίες, εντός ενός χρονικού ορίζοντα παραγωγής.

Ο προγραμματισμός του εργατικού δυναμικού θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα και πλέον δισεπίλυτα προβλήματα για μια βιομηχανία (Aykin, 2000). Ενώ η ελλιπής επάνδρωση με προσωπικό (understaffing) μειώνει γενικά το συνολικό κόστος εργασίας, οδηγεί στην μείωση της παρεχόμενης ποιότητας προϊόντων και υπηρεσιών, σε μεγαλύτερους νεκρούς χρόνους και συνεπώς, σε υψηλότερο συνολικό κόστος. Η επάνδρωση με υπερβολικό αριθμό προσωπικού (overstaffing), αντίθετα, βελτιώνει την ποιότητα των παρεχόμενων προϊόντων και υπηρεσιών, αλλά οδηγεί στη μειωμένη παραγωγική εκμετάλλευση του εργατικού δυναμικού και σε υπερβολικά κόστη εργασίας. Επομένως, είναι σημαντικό για μια επιχείρηση να προγραμματίσει αποελεσματικά το εργατικό δυναμικό για να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος εργασίας, παρέχοντας παράλληλα προϊόντα και υπηρεσίες με υψηλά επίπεδα ποιότητας.

Είναι εξαιρετικά δύσκολο (Ernst et al., 2004) να βρεθούν καλές λύσεις σε αυτά ιδιαίτερα σύνθετα προβλήματα και ακόμα πιο δύσκολο να καθοριστούν βέλτιστες λύσεις, οι οποίες ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος, ικανοποιούν τις προτιμήσεις των εργαζόμενων, κατανέμουν ομοιόμορφα και δίκαια τις βάρδιες μεταξύ των εργαζόμενων και ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς του εργασιακού περιβάλλοντος. Εξ' αιτίας, δηλαδή, του μεγάλου βαθμού πολυπλοκότητας ενός πραγματικού περιβάλλοντος παραγωγής, ο προγραμματισμός του εργατικού δυναμικού αποτελεί ένα πολυσύνθετο έργο, καθώς στη λήψη αποφάσεων εμπλέκεται ένας μεγάλος αριθμός συγκρουόμενων παραγόντων και περιορισμών.

Σε πολλές επιχειρήσεις, οι υπεύθυνοι για τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού χρειάζονται εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων, με τα οποία μπορούν να παρέχουν τους σωστούς εργαζόμενους στο σωστό χρόνο και με το σωστό κόστος, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα ένα υψηλό επίπεδο ικανοποίησης των εργαζομένων από την εργασία τους. Ένα τέτοιο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων περιλαμβάνει τυπικά, λογιστικά φύλλα για υπολογισμούς (spreadsheets), εργαλεία που βασίζονται σε βάσεις δεδομένων και ενδεχομένως εργαλεία προγραμματισμού που αναπτύσσονται από κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα και αλγορίθμους. Η μελέτη, η ανάπτυξη και η βελτίωση ενός τέτοιου εργαλείου ήταν ένας από τους κύριους στόχους αυτής της εργασίας.

Γενικά, τα μοναδικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών βιομηχανιών οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, τα συγκεκριμένα μαθηματικά μοντέλα και οι αλγόριθμοι πρέπει να αναπτυχθούν για την επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού εργατικού δυναμικού ανάλογα με τους διαφορετικούς τομείς εφαρμογής (Ernst et al., 2004). Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εμπορικών πακέτων λογισμικού διαθέσιμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση αυτών των προβλημάτων προγραμματισμού. Όμως, εκείνα τα πακέτα λογισμικού που παρέχουν σημαντικές ικανότητες βελτιστοποίησης στοχεύουν γενικά σε ένα συγκεκριμένο τομέα εφαρμογής και δεν μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν για να εφαρμοστούν για τα προβλήματα μιας άλλης βιομηχανίας. Αντίθετα, εκείνα που έχουν σχεδιαστεί να έχουν γενική εφαρμογή, εστιάζουν περισσότερο στο να παρέχουν στους χρήστες την δυνατότητα πολλών προσαρμόσιμων ρυθμίσεων και λειτουργιών καθώς και την δυνατότητα της εκτενούς παρουσίασης των αποτελεσμάτων, αλλά διαθέτουν περιορισμένη υποστήριξη για την αυτοματοποιημένη παραγωγή προγραμμάτων.

Τα παραδοσιακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (decision support systems) αποτελούνται από ένα αριθμό αναλυτικών εργαλείων, βασισμένα σε μαθηματικά μοντέλα, που μπορούν να υπολογίζουν βέλτιστες ή σχεδόν βέλτιστες λύσεις και παρέχουν στο χρήστη την δυνατότητα για δοκιμή, αξιολόγηση και επιλογή λύσεων. Ο χρήστης αποτελεί μέρος των συστημάτων αυτών, και συμμετέχει ενεργά σε όλη την διάρκεια του κύκλου λήψης απόφασης και τελικά στην λήψη της βέλτιστης απόφασης. Όμως, όπως προκύπτει και από τη βιβλιογραφία, οι εμπλεκόμενοι σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων στη βιομηχανία δεν παρέχουν βέλτιστες λύσεις, βασισμένες σε ποσοτικά μοντέλα, αλλά μάλλον ικανοποιητικές λύσεις βασισμένες σε ποιοτικές ερμηνείες και παραδοσιακές εμπειρικές πρακτικές.

Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε μια διερευνητική προσέγγιση, η οποία βασίστηκε στην ανάλυση ενός συγκεκριμένου μοντέλου ILP, το οποίο που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού του εργατικού δυναμικού (ή πρόβλημα EMSP-O). Το μοντέλο της παρούσας εργασίας και το μοντέλο των Lagodimos and Mihiotis (2004) ισχύουν αυστηρά για απλά τμήματα συσκευασίας, όπου το εργατικό δυναμικό είναι ο μόνος κοινός πόρος στις γραμμές συσκευασίας κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Αν και η παραπάνω συνθήκη ανταποκρίνεται αρκετά στην πραγματικότητα, για την προσαρμογή και εφαρμογή του μοντέλου σε πιο σύνθετα τμήματα συσκευασίας απαιτούνται πρόσθετοι περιορισμοί.

Μετά τη μελέτη των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων των Lagodimos and Mihiotis (2004), ερευνήθηκε σε βάθος η αναλυτική μορφή μιας βέλτιστης λύσης. Η γραφική απεικόνιση της αναλυτικής κατανομής μιας βέλτιστης λύσης, όπως προκύπτει από ένα έτοιμο πρόγραμμα βελτιστοποίησης (LINGO), επιβεβαίωσε το γεγονός ότι στις λύσεις αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη καθιερωμένες βιομηχανικές πρακτικές, καθιστώντας την άμεση εφαρμογή των λύσεων αυτών σε μια αντίστοιχη βιομηχανική μονάδα εξαιρετικά δύσκολη έως αδύνατη. Αντίθετα, οι ευρετικοί αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν ακριβώς για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος (EMSP-O) δύνανται να παρέχουν λύσεις, που μπορούν να εφαρμοστούν πιο εύκολα. Στο κορυφαίο επίπεδο προγραμματισμού (προσδιορισμός των γενικών αναγκών σε εργατικό δυναμικό) η απόδοση του LINGO και των αλγορίθμων στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ίδια σε πολλές περιπτώσεις, αλλά σε επίπεδο χρονοπρογραμματισμού (κατανομή του διαθέσιμου εργατικού δυναμικού χρονικά) και κατανομής (κατανομή εργατών σε συγκεκριμένες δραστηριότητες) οι αλγόριθμοι εμφανίζουν συγκριτικά καλύτερη απόδοση, ιδιαίτερα αν συμπεριληφθεί και ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού των λύσεων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, οι αρχικές λύσεις των πολιτικών NOV και FOV, και κατά συνέπεια ο αλγόριθμος των πολιτικών αυτών, μπορούν να βελτιωθούν με την εισαγωγή επιπλέον υπερωρίας, με βάση την ιδιότητα «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing), η οποία συνδέει την υπερωρία (O) και το μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U). Η βελτίωση των λύσεων των πολιτικών οδήγησε στις περισσότερες περιπτώσεις σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους (C) και στον ταυτόχρονο μηδενισμό του μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμου εργατικού δυναμικού (U), και για τις δύο πολιτικές.

Όσον αφορά στη NOV, με βάση πολλά προβλήματα που μελετήθηκαν, αποδεικνύεται επίσης, ότι οι αρχικές λύσεις της NOV βελτιώνονται με προσθήκη υπερωρίας και ότι ειδικά για c_i *(I)* ισχύει η λογική «all-or-nothing» μεταξύ O και U. Όσον αφορά στη FOV, με την ίδια ακριβώς λογική, και για λύσεις με μορφή 1S (*Load (L)* και c_i *(U)*), εισάγοντας επιπλέον υπερωρία, οι βελτιωμένες λύσεις με βάση τη FOV ταυτίστηκαν με τις λύσεις OPT σε πολλές περιπτώσεις, ανεξαρτήτως κατανομής εργατικού δυναμικού (δηλαδή και για *Manning (E)* και για *Manning (I)*) και ανεξαρτήτως υπερωριακής αμοιβής (δηλαδή και για *r(L)* αλλά και για *r(H)*). Το πιο σημαντικό γεγονός είναι ότι κατά την έρευνα βρέθηκε μια μοναδική αλλά εκπληκτική περίπτωση, όπου η βελτιωμένη λύση FOV (με επιπλέον υπερωρία) ξεπέρασε ακόμα και τη λύση OPT (δηλαδή μια συγκεκριμένη βελτιωμένη λύση FOV έδωσε συνολικό κόστος μικρότερο ακόμα και από αυτό της λύσης OPT). Το σπουδαίο αυτό γεγονός είναι άκρως ενθαρρυντικό και αναμφίβολα μπορεί και πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας και μελλοντικής μελέτης.

Από την περαιτέρω μελέτη των περιπτώσεων των λύσεων της FOV με διαφορετικό κόστος μεταξύ των βαρδιών ($c_i\,(U)$) και ακανόνιστης κατανομής του εργατικού δυναμικού (*Manning (I)*) προέκυψε ότι, και για *Load (L)* και για *Load (H)*, η ιδιότητα «all-or-nothing» ισχύει, αλλά όχι πάντα με ταυτόχρονη μείωση του κόστους. Η εισαγωγή υπερωρίας γίνεται με κύριο στόχο το μηδενισμό του U και τη μείωση του κόστους, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις το κόστος δεν παρουσιάζει τέτοια μείωση ώστε να φτάσει το αρχικό κόστος της λύσης OPT (δηλαδή στην καλύτερη περίπτωση τα δύο κόστη να είναι ίσα). Αντίθετα, ακόμα και όταν συνυπάρχει και υπερωρία (O) και μη παραγωγικά εκμεταλλεύσιμο εργατικό δυναμικό (U), το νέο συνολικό κόστος μιας λύσης FOV μπορεί να γίνει ίσο με το συνολικό κόστος μιας αρχικής λύσης OPT (άρα ελάχιστο). Υπήρξε δηλαδή μια περίπτωση, όπου η εισαγωγή επιπλέον υπερωρίας (O) για να μηδενιστεί το U, συνοδεύτηκε από μείωση κόστους, με το νέο συνολικό κόστος είναι ίσο με αυτό της OPT, αλλά το U δεν μηδενίστηκε. Οποιαδήποτε προσπάθεια μείωσης του U, είναι γενικά δύσκολη (έως αδύνατη) λόγω της ακανόνιστης κατανομής του εργατικού δυναμικού (Irregular Manning) και οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους. Το θέμα αυτό απαιτεί περαιτέρω έρευνα. Σε μια άλλη περίπτωση, το νέο συνολικό κόστος δεν έγινε ίσο με αυτό της OPT (δηλαδή ελάχιστο), απλά βελτιώθηκε σε σχέση με αυτό της αρχικής FOV. Τέλος, παρατηρήθηκε και η περίπτωση, όπου η εισαγωγή επιπλέον υπερωρίας (O), όχι μόνο δε συνοδεύτηκε από μείωση κόστους, αλλά το νέο συνολικό κόστος παρέμεινε ίσο με αυτό της αρχικής FOV (περίπτωση αδιαφορίας). Οι λόγοι που οδηγούν στα παραπάνω γεγονότα πρέπει να ερευνηθούν στο μέλλον.

Το γενικό συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι, η ιδιότητα «all-or-nothing» μεταξύ O και U ισχύει σε κάποιες περιπτώσεις, αλλά όχι πάντα με ταυτόχρονη μείωση του κόστους (αφού φαίνεται ότι υπάρχουν και περιπτώσεις αδιαφορίας) και αναμφίβολα προκαλεί περαιτέρω ερευνητικά ερωτήματα. Το βέβαιο είναι ότι η ακανόνιστη κατανομή του εργατικού δυναμικού, ειδικά στην περίπτωση διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών, δυσκολεύει αρκετά την επίλυση του προβλήματος EMSP-O. Αυτός ήταν και ο κυριότερος λόγος για τον οποίο οι κύριες προσπάθειες στην παρούσα έρευνα συγκεντρώθηκαν στις περιπτώσεις με ίση κατανομή εργατικού δυναμικού. Εντούτοις, εφαρμόζοντας στην πράξη τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, πέρα από την άμεση βελτίωση των αλγορίθμων της FOV και της NOV, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένας νέος σύνθετος αλγόριθμος, ο οποίος να συνδυάζει και τα πλεονεκτήματα της FOV και της NOV, αλλά και όλα τα πλεονεκτήματα της βελτίωσης των δύο αυτών πολιτικών. Η απόδοση ενός τέτοιου εξελιγμένου, αλλά και εξελίξιμου αλγορίθμου, μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και την απόδοση κλασικών προγραμμάτων βελτιστοποίησης, όπως το LINGO.

Το βασικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι το κόστος μεταξύ των βαρδιών c_i είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη μορφή της λύσης του προβλήματος. Όταν ο (κανονικός) μισθός είναι ίδιος για τις βάρδιες, οποιαδήποτε μηχανή μπορεί να προγραμματιστεί σε οποιαδήποτε βάρδια και σε οποιαδήποτε περίοδο, αρκεί να είναι εφικτό. Η σπουδαία αυτή παρατήρηση οδήγησε στην διατύπωση μιας αναλυτικής σχέσης (τύπου) για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους $C_{identical}$, για την περίπτωση ίδιου κόστους μεταξύ των βαρδιών (c_i *(I)*), ο οποίος επαληθεύτηκε ότι ισχύει για τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Παράλληλα, τεκμηριώθηκε η ιδιότητα «all-or-nothing» και θεωρητικά με μια σειρά αποδείξεων γενικής ισχύος, που βασίστηκαν στην παραπάνω παρατήρηση. Οι εν λόγω αποδείξεις δε σχετίζονται (μόνο) με τη μείωση κόστους, όσο με τη φυσική εξομάλυνση του φορτίου παραγωγής, άρα έχουν ένα γενικότερο χαρακτήρα. Η ιδιότητα «all-or-nothing» ισχύει, όπως αποδείχτηκε, για συνθήκες ίδιου κόστους c_i *(I)* μεταξύ των βαρδιών, ενώ επίσης ερευνήθηκε αν αυτή η σημαντική ιδιότητα ισχύει και για διαφορετικό κόστος c_i *(U)* μεταξύ των βαρδιών. Αν και η συγκεκριμένη ιδιότητα για c_i *(U)* δεν αποδείχτηκε θεωρητικά, προέκυψε και αποδείχτηκε μια άλλη σημαντική ιδιότητα, η οποία σχετίζεται με την δυνατότητα βελτίωσης μιας λύσης για c_i *(U)* και μπορεί να αποτελέσει αφετηρία μιας μελλοντικής έρευνας προς αυτή την κατεύθυνση.

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της παρούσας έρευνας είναι η διατύπωση πέντε πολιτικών προγραμματισμού, για τη δύσκολη περίπτωση του διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών, οι οποίες προκύπτουν από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς κανονικής εργασίας και υπερωριακής εργασίας που μπορούν να υπάρξουν, κάνοντας χρήση της ιδιότητας «all-or-nothing». Από τη σύγκριση των εν λόγω πολιτικών μεταξύ τους, σε επίπεδο συνολικού κόστους, προκύπτουν σχέσεις (συνθήκες) κάτω από τις οποίες προτιμάται μια πολιτική έναντι μιας άλλης (Conditions for Optimality). Με βάση αυτές τις πέντε πολιτικές δημιουργήθηκε επίσης ένας αναλυτικός τύπος υπολογισμού του συνολικού κόστους $C_{unequal}$ για την περίπτωση διαφορετικού κόστους μεταξύ των βαρδιών. Τόσο οι συνθήκες της βέλτιστης πολιτικής (Conditions for Optimality), όσο και ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού του συνολικού κόστους επαληθεύτηκαν πλήρως, μέσω σύγκρισης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα (βέλτιστες λύσεις OPT) του LINGO. Από την απλή μελέτη δηλαδή των ακραίων πολιτικών NOV και FOV, που ήταν η αρχική ερευνητική προσέγγιση, η προσπάθεια εστιάστηκε σε μια γενικότερη και πληρέστερη έρευνα. Όλα τα παραπάνω ισχύουν, όπως έχει ήδη αναφερθεί για περιπτώσεις με ίση κατανομή εργατικού δυναμικού (*Manning (E)*). Με δεδομένα τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί μια περαιτέρω έρευνα, για συνθήκες ακανόνιστης κατανομής εργατικού δυναμικού (*Manning (I)*).

Η σημασία των παραπάνω ευρημάτων είναι μεγάλη. Με βάση τον αναλυτικό τύπο μπορεί να προσδιοριστεί ταχύτατα και με ακρίβεια ποια πολιτική είναι βέλτιστη για κάθε περίπτωση και ποιο είναι το συνολικό κόστος αν εφαρμοστεί. Με δεδομένα την κατανομή του φορτίου παραγωγής w_i, για ίση κατανομή εργατικού δυναμικού οποιαδήποτε τιμής a_i, για διαφορετικό κόστος μεταξύ των βαρδιών με οποιαδήποτε τιμή c_1 και c_2, για οποιαδήποτε υπερωριακή αμοιβή r και για οποιοδήποτε ορίζοντα προγραμματισμού D, μπορεί να υπολογιστεί σε δευτερόλεπτα όχι μόνο το συνολικό κόστος της βέλτιστης λύσης, αλλά και η δομή αυτής της λύσης μέσω μιας από τις πέντε πολιτικές. Το συγκεκριμένο επίτευγμα αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία, λόγω του γεγονότος ότι έως τώρα για να προσδιοριστεί μια βέλτιστη λύση μέσω του LINGO, εφόσον ο αλγόριθμος των NOV και FOV δεν παρέχει σε όλες τις περιπτώσεις βέλτιστες λύσεις, απαιτείται ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (από 1 έως και 4 ώρες).

Τέλος, η μορφή και η δομή μιας βέλτιστης λύσης, μέσω της προσέγγισης που παρουσιάστηκε σε αυτή την εργασία, αναλύθηκαν σε βάθος και δόθηκε για αυτές μια λογική εξήγηση. Αυτός ήταν άλλωστε ένας από τους βασικούς αρχικούς στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που επιτεύχθηκε απόλυτα. Είναι πια γεγονός και προκύπτει από τα αποτελέσματα, ότι επιτέλους δεν απαιτείται η συνδρομή του LINGO και η πραγματικά χρονοβόρα εφαρμογή του μοντέλου για τον προσδιορισμό μιας λύσης. Η προσέγγιση του προβλήματος μέσω των πολιτικών, που προτείνονται, και ο ακριβής προσδιορισμός μιας βέλτιστης λύσης μέσων αυτών δίνει μια νέα ώθηση στην επίλυση του δύσκολου προβλήματος του προγραμματισμού του προσωπικού σε μια βιομηχανία. Η φυσική εξέλιξη όλης αυτής της έρευνας μπορεί να είναι η ενσωμάτωση της λογικής των πολιτικών, των αναλυτικών τύπων υπολογισμού του συνολικού κόστους, των συνθηκών της βέλτιστης πολιτικής (Conditions for Optimality) σε ένα νέο σύνθετο αλγόριθμο. Ο απώτερος στόχος κάθε παρόμοιας ερευνητικής προσπάθειας είναι - και οφείλει να είναι - η δημιουργία, η ανάπτυξη και η βελτίωση πρακτικών εργαλείων προγραμματισμού, με σκοπό να επιλυθούν αποτελεσματικά τα παραδοσιακά και ζωτικά προβλήματα προγραμματισμού μέσα σε μια βιομηχανία ανεξαρτήτως μεγέθους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abernathy, W.J., Ballof, N., Hershey, J.C., Wandel, S., 1973. “A three-stage manpower planning and scheduling model: a service-sector example”. Operations Research 21, 693-711.

2. Aghezzaf, E.H., 2000. “Lot-sizing problem with set-up times in labor-based capacity production systems”. International Journal of Production Economics 64, 1–9.

3. Anderson, E.J., 1995. The Management of Manufacturing: Models and Analysis, Addison-Wesley, Wokingham.

4. Anonymous, 2002. LINGO: Users Guide. LINDO Systems Inc., Chicago.

5. Artiba, A., 1994. “A rule based planning system for parallel multi-product manufacturing lines”. Production Planning and Control 5, 349–359.

6. Aykin, T., 2000. “A Comparative Evaluation of Modeling Approaches to the Labor Shift Scheduling Problem”. European Journal of Operational Research 125, 381–397.

7. Baker K., 1976. “Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey”. Operational Research Quarterly 27, 155-167.

8. Bard, J.F., Binici, C, deSilva, A.H., 2003. ”Staff scheduling at the United States postal services”. Computers and Operations Research 30, 745-771.

9. Bartholdi J., 1981. “A guaranteed-accuracy round-off algorithm for cyclic scheduling and set covering”. Operations Research 29, 501-510.

10. Bellanti, F., Carello, G., Della Croce, F., Tadei, R., 2004. “A greedy-based neighborhood search approach to a nurse rostering problem”. European Journal of Operational Research 153, 28–40.

11. Betchhold S., Brusco M., Showalter M., 1991. “A comparative evaluation of labour tour scheduling methods”. Decision Sciences 19, 353-373.

12. Bhatnagar, R., Venkataramanaiah, S., Rajagopalan, A., 2003. “A Model for Contingent Manpower Planning: Insights from a High Clock Speed Industry”. Innovation in Manufacturing Systems and Technology.

13. Brusco M.J., Jacobs L.W., 1993. “A simulated annealing approach to the solution of flexible labour scheduling problems”. Journal of the Operational Research Society 44, 1191-1200.

14. Brusco, M.J., Showalter, M.J., 1993. “Constrained nurse staffing analysis”. Omega 21, 175–186.

15. Buxey, G., 1995. “A managerial perspective of aggregate planning”. International Journal of Production Economics 41, 127–133.

16. Buxey, G., 2003. “Strategy not tactics drives aggregate planning”. International Journal of Production Economics 85, 331–346.

17. Campbell, G.M., 1999. “Cross-utilization of workers whose capabilities differ”. Management Science 45, 722-732.

18. Campbell, G.M., Diaby, M., 2002. “Development and evaluation of an assignment heuristic for allocating cross-trained workers”. European Journal of Operational Research 138, 9-20.

19. Cattrysse, D.G., van Wassenhove , L.N., 1992. “A survey of algorithms for the generalised assignment problem”. European Journal of Operational Research 60, 260-272.

20. Chang, S.Y., Hong, Y., Kim, J.H., Kim, X., 1999. "A heuristic algorithm for minimising maintenance workforce level". Production Planning and Control 10, 776–786.

21. Claassen, G.D.H., van Beek, P., 1993. "Planning and scheduling packaging lines in food industry". European Journal of Operational Research 70, 150–158.

22. Croci, F., Perona, M., Pozzetti, M., 2000. "Work-force management in automated assembly systems". International Journal of Production Economic 64, 243–255.

23. Dahlgaard, Jens J., Kristensen, Kai, Kanji, Gopal K., 1998. Fundamentals of Total Quality Management, 39, 155, 290-358.

24. Dantzig G., 1954. "A comment on Edie's traffic delays at toll booths". Operations Research 2, 339-341.

25. Easton F.F., Rossin D.F., 1991. "Sufficient working subsets for the tour scheduling problem". Management Science 37, 1441-1451.

26. Easton, F.F., Rossin, D.F., 1997. "Overtime schedules for full-time service workers". Omega 26, 285–299.

27. Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B., Sier, D., 2004. "An Annotated Bibliography of Personnel Scheduling and Rostering". Annals of Operations Research 127, 21–144.

28. Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier, D., 2004. "Staffing Scheduling and Rostering: A Review of Applications, Methods and Models". European Journal of Operations Research 153, 3–27.

29. Garey, R.M., Johnson, D.C., 1979. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. Freeman and Company, New York.

30. Grabot, B., Letouzey. A., 2000. "Short-term manpower management in manufacturing systems: new requirements and DSS prototyping". Computers in Industry 43, 11-29.

31. Hart, R.A., Malley, J.R., Ruffell, R.J., 1996. "What shapes are overtime premium schedules? Some evidence from Japan, the UK, and the US". Economics Letters 53, 97-102.

32. Jarrah A.I.Z., Bard J.F., de Silva A.H., 1994. "Solving large-scale tour scheduling problems". Management Science 40, 1125-1144.

33. Kher, H.V., Fry, T.D., 2001. "Labour Flexibility and assignment policies in a job shop having incommensurable objectives". International Journal of Production Research 39, 2295-2311.

34. Krajewski L., Ritzman L., McKenzie J., 1980. "Shift scheduling in a banking operation: A case application". Interfaces 10, 1-8.

35. Lagodimos, A.G., Charalambopoulos, A., Kavgalaki, A., 1996. "Computer-aided packing shop scheduling in a manufacturing plant". International Journal of Production Economics 46, 621–630.

36. Lagodimos, A.G., Leopoulos, V., 2000. "Greedy heuristic algorithms for manpower shift planning". International Journal of Production Economics 68, 95–106.

37. Lagodimos, A.G., Mihiotis, A.N., 2004. "Overtime vs. regular shift planning decisions in packing shops". Article in press, International Journal of Production Economics.

38. Lagodimos, A.G., Paravantis, J.A., 2003. "Improved heuristic for manpower shift planning with modified shift priorities”. Production Planning and Control, in press.

39. Lagodimos, A.G., Paravantis, J.A., 2004. ”Comparative performance of greedy algorithms for cost-based manpower shift planning”. Working Paper, Department of Business Administration, University of Piraeus, Greece.

40. Lau, H., 1996. “On the Complexity of Manpower Shift Scheduling”. Computers and Operations Research 23, 93–102.

41. Lodi, A., Martello, S., Monaci, M., 2002. “Two-dimensional packing problems: a survey”. European Journal of Operational Research 141, 241-252.

42. Loucks J.S., Jacobs F.R., 1991. “Tour scheduling and task assignment of heterogeneous work force: A heuristic approach”. Decision Sciences 22, 700-718.

43. Morris J., Showalter M., 1983. “Simple approaches to shift, days-off and tour scheduling problems”. Management Science 8, 942-950.

44. Siferd, S.P., Benton, W.C., 1992. “Workforce staffing and scheduling: Hospital nursing specific models”. European Journal of Operational Research 60, 233-246.

45. Silver, E.A., Pyke, D.F., Peterson, R., 1998. Inventory Management and Production Planning and Scheduling. Wiley, New York.

46. Tien J., Kamiyama A., 1982. “On manpower scheduling algorithms”. SIAM Review 24, 275-287.

47. Trivedi, V.M., Warner, D.M., 1976. “A branch and bound algorithm for optimum allocation of float nurses”. Management Science 22, 972-981.

48. van Dam, P., Gaalman, G.J.C., Sierksma, G., 1998. “Designing scheduling systems for packaging in process industries: A tobacco company case”. International Journal of Production Economics 56–57, 649–659.

49. van Dam, P., Gaalman, G.J.C., Sierksma, G., 1999. “Production scheduling across multi-machine packaging lines for pre-scheduling level”. International Journal of Production Research 37, 3619–3641.

50. Venkataraman, R., Brusco, M.J., 1996. “An integrated analysis of nurse staffing and scheduling policies”. Omega 24, 57–71.

51. Yang, B., Geunes, J., O’Brien, W. J., 2004. “A heuristic approach for minimizing weighted tardiness and overtime costs in single resource scheduling”. Computers & Operations Research 31, 1273–1301.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Ι: *Διαφορετικά επίπεδα παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην έρευνα.*

Παράμετρος	**Επίπεδο**	**Τιμές**
Επάνδρωση με εργατικό δυναμικό (Manning) (a_i)	Ίση (Even) (E) Ακανόνιστη (Irregular) (I)	a_i=6 $\forall$ i a_i~U(1,10) -1 επανάληψη
Φορτίο παραγωγής (Production load) (w_i)	Χαμηλό (Low) (L) Υψηλό (High) (H)	w_i~U(1,12) -10 επαναλήψεις w_i~U(1,18) -10 επαναλήψεις
(Κανονικός) Μισθός (Regular remuneration rate) (c_i)	Ίδιος (Identical) (I) Άνισοι (Unequal) (U)	c_1=c_2=1 c_1=1 και c_2=2
Υπερωριακή αμοιβή (Overtime rate) (r)	Χαμηλή (Low) (L) Υψηλή (High) (H)	r =0.25 r =0.5

Πηγή: Lagodimos and Mihiotis (2004).

Πίνακας II: *Συνολικό κόστος για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού.*

	ci	(I)						(U)					
	r	(L)			(H)			(L)			(H)		
		OPT	NOV	FOV	OPT	NOV	FOV	OPT	NOV	FOV	OPT	NOV	FOV
LOAD (L)	MANNING (E)	42	42	42,8	42	42	42,9	43,5	48	43,5	43,8	48	43,8
		45	48	49,5	45,6	48	49,8	48	54	51	49,2	54	51,6
		35,3	36	37,5	36	36	37,8	39	42	39	39,6	42	39,6
		36,8	42	36,8	36,9	42	36,9	37,5	48	37,5	37,8	48	37,8
		54	54	59,3	54	54	60,3	60	60	64,5	60	60	66,6
		34,5	36	37,5	35,4	36	37,8	39	42	39	39,6	42	39,6
		37,5	42	38,3	37,8	42	38,7	40,5	48	40,5	41,4	48	41,4
		33,8	36	38,3	34,5	36	38,7	37,5	42	40,5	39	42	41,4
		29,3	30	30,8	30	30	30,9	31,5	36	31,5	31,8	36	31,8
		33,8	36	37,5	33,6	36	37,8	37,5	42	39	39	42	39,6
	avg.	38,2	40,2	40,8	38,7	40,2	41,2	41,4	46,2	42,6	42,1	46,2	43,3
	MANNING (I)	32,9	33	33,4	33	33	33,5	33,8	37	33,8	33,9	37	33,9
		40,6	41	43,9	40,8	41	44,3	43,5	51	45,8	44,4	51	46,5
		24,5	25	25,5	24,6	25	25,6	25,5	27	26	25,8	27	26,2
		32,8	34	35,6	32,9	34	35,8	34,8	39	36,3	35,3	39	36,5
		43	43	48,6	43	43	49,4	51	55	52,3	51,6	55	53,7
		27	27	29	27	27	29,4	30	36	31	31	36	31,8
		28,8	30	30,3	28,9	30	30,5	31,5	34	31,5	31,3	34	32
		31,4	32	34,9	31,5	32	35,5	36,8	41	37,8	38,7	41	38,9
		24,3	24	25,3	24	24	25,3	25	27	25,5	25,2	27	25,6
		27,3	28	28,3	27,3	28	28,3	28	29	28,5	28,2	29	28,6
	avg.	31,2	31,6	33,5	31,3	31,6	33,7	33,9	37,6	34,8	34,5	37,6	35,4
	L-avg.	34,7	35,9	37,1	35,0	35,9	37,4	37,7	41,9	38,7	38,3	41,9	39,3
LOAD (H)	MANNING (E)	60	60	68,3	60	60	72,3	77,3	78	88,5	78	78	96,6
		52,5	54	57,8	53,4	54	60,9	65,3	72	73,5	66,3	72	79,8
		66	66	72	66	66	75,6	81,8	84	90	83,7	84	97,2
		48,8	54	51,8	48,9	54	53,7	58,5	66	61,5	59,4	66	65,4
		52,5	54	60	53,4	54	63,6	67,5	72	78	69	72	85,2
		55,5	60	60,8	55,8	60	63,3	67,5	72	73,5	67,8	72	78,6
		72	72	77,3	72	72	81,9	91,5	96	100,5	91,8	96	109,8
		54	54	60	54	54	62,4	66	66	72	66	66	76,8
		48	48	49,5	48	48	51	54	54	57	54	54	60
		51	54	52,5	51,6	54	54,6	60	66	63	61,2	66	67,2
	avg.	56,0	57,6	61,0	56,3	57,6	63,9	68,9	72,6	75,8	69,7	72,6	81,7
	MANNING (I)	49,8	51	56,9	49,9	51	60,1	63,8	67	72,8	65,1	67	79,1
		38,1	39	41,4	38,9	39	43,7	48,4	52	52,8	49,2	52	57,3
		53,8	54	58,5	54	54	61,2	67,1	69	72	68,0	69	77,4
		43,1	44	48,9	43,5	44	50,9	53,1	57	58,8	53,0	57	62,7
		42,3	43	47,8	42,2	43	50,7	57,3	58	62,5	57,8	58	68,4
		43,8	44	46,6	43,5	44	48,2	53	53	54,3	52,6	53	57,3
		61	61	67	61	61	71	80	80	87	79,3	80	95
		42,4	43	45,4	42,5	43	47,3	52,8	53	54,8	52,9	53	58,5
		44	44	45	43,6	44	45,8	49	53	49	50,4	53	50,6
		50,9	51	57,4	50,5	51	59,9	64	65	69,8	64,2	65	74,7
	avg.	46,7	47,4	51,5	46,8	47,4	53,9	58,6	60,9	63,4	59,2	60,9	68,1
	H-avg.	51,4	52,5	56,2	51,6	52,5	58,9	63,7	66,8	69,6	64,4	66,8	74,9
	T-AVG.	**43,0**	**44,2**	**46,7**	**43,3**	**44,2**	**48,2**	**50,7**	**54,3**	**54,1**	**51,4**	**54,3**	**57,1**

Πηγή: Lagodimos and Mihiotis (2004).

Πίνακας III: *Αναλυτική δομή της λύσης για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού.*

			OPT																NOV				FOV		
		ci	(I)								(U)								(I)		(U)		ALL		
		r	(L)				(H)				(L)				(H)				ALL		ALL		ALL		
		OVL	S	R	O	U	S	R	O	U	S	R	O	U	S	R	O	U	R	U	R	U	R	O	U
LOAD (L)	MANNING (E)	0,6	2	42	0	0	2	42	0	0	1	42	0,6	0,6	1	42	0,6	0,6	42	0	42	0	42	0,6	0,6
		1,2	2	42	2,4	0	2	42	2,4	0	1	42	2,4	0	1	42	2,4	0	48	3,6	48	3,6	48	1,2	4,8
		1,2	2	30	4,2	0	2	36	0	1,8	1	36	1,2	3	1	36	1,2	3	36	1,8	36	1,8	36	1,2	3
		0,6	2	36	0,6	0	2	36	0,6	0	1	36	0,6	0	1	36	0,6	0	42	5,4	42	5,4	36	0,6	0
		4,2	2	54	0	1,2	2	54	0	1,2	2	54	0	1,2	2	54	0	1,2	54	1,2	54	1,2	54	4,2	5,4
		1,2	2	30	3,6	0	2	30	3,6	0	1	36	1,2	3,6	1	36	1,2	3,6	36	2,4	36	2,4	36	1,2	3,6
		1,8	2	36	1,2	0	2	36	1,2	0	1	36	1,8	0,6	1	36	1,8	0,6	42	4,8	42	4,8	36	1,8	0,6
		1,8	2	30	3	0	2	30	3	0	1	30	3	0	1	30	3	0	36	3	36	3	36	1,8	4,8
		0,6	2	24	4,2	0	2	30	0	1,8	1	30	0,6	2,4	1	30	0,6	2,4	30	1,8	30	1,8	30	0,6	2,4
		1,2	2	30	3	0	2	30	3	0	1	30	3	0	1	30	3	0	36	3	36	3	36	1,2	4,2
	avg.	1,4	2,0	35,4	2,2	0,1	2,0	36,6	1,4	0,5	1,1	37,2	1,4	1,1	1,1	37,2	1,4	1,1	40,2	2,7	40,2	2,7	39,0	1,4	2,9
	MANNING (I)	0,3	2	32	0,7	0	2	33	0	0,3	1	33	0,3	0,6	1	33	0,3	0,6	33	0,3	34	1,3	33	0,3	0,6
		1,5	2	40	0,5	0	2	40	0,5	0	1	39	1,8	0,3	1	39	1,8	0,3	41	0,5	42	1,5	42	1,5	3
		0,4	2	24	0,4	0	2	24	0,4	0	1	24	0,6	0,2	1	24	0,6	0,2	25	0,6	25	0,6	25	0,4	1
		0,5	2	32	0,6	0	2	32	0,6	0	1	32	1,1	0,5	1	32	1,1	0,5	34	1,4	34	1,4	35	0,5	2,9
		2,9	2	43	0	0,1	2	43	0	0,1	1	43	3,2	3,3	1	42	3,2	2,3	43	0,1	44	1,1	45	2,9	5
		1,6	2	27	0	0	2	27	0	0	1	25	2	0	1	25	2	0	27	0	28	1	27	1,6	1,6
		1,0	2	28	0,6	0	2	28	0,6	0	1	28	1,1	0,5	1	28	1,1	0,5	30	1,4	30	1,4	29	1	1,4
		2,3	2	31	0,3	0	2	31	0,3	0	1	28	3,5	0,2	1	30	2,9	1,6	32	0,7	32	0,7	32	2,3	3
		0,2	2	24	0	0	2	24	0	0	1	24	0,4	0,4	1	24	0,4	0,4	24	0	25	1	25	0,2	1,2
		0,2	2	27	0	0	2	27	0	0	1	27	0,4	0,4	1	27	0,4	0,4	27	0	28	1	28	0,2	1,2
	avg.	1,1	2,0	30,8	0,3	0,0	2,0	30,9	0,2	0,0	1,0	30,3	1,4	0,6	1,0	30,4	1,4	0,7	31,6	0,5	32,2	1,1	32,1	1,1	2,1
	L-avg.	1,3	2,0	33,1	1,3	0,1	2,0	33,8	0,8	0,3	1,1	33,8	1,4	0,9	1,1	33,8	1,4	0,9	35,9	1,6	36,2	1,9	35,6	1,3	2,5
LOAD (H)	MANNING (E)	16,2	2	60	0	1,2	2	60	0	1,2	2	54	4,8	0	2	60	0	1,2	60	1,2	60	1,2	48	16,2	5,4
		12,6	2	48	3,6	0	2	48	3,6	0	2	48	3,6	0	2	48	3,6	0	54	2,4	54	2,4	42	12,6	3
		14,4	2	66	0	0,6	2	66	0	0,6	2	60	5,4	0	2	60	5,4	0	66	0,6	66	0,6	54	14,4	3
		7,8	2	48	0,6	0	2	48	0,6	0	2	42	6,6	0	2	48	1,8	1,2	54	5,4	54	5,4	42	7,8	1,2
		14,4	2	48	3,6	0	2	48	3,6	0	2	48	3,6	0	2	48	3,6	0	54	2,4	54	2,4	42	14,4	4,8
		10,2	2	54	1,2	0	2	54	1,2	0	2	54	1,2	0	2	54	1,2	0	60	4,8	60	4,8	48	10,2	3
		18,6	2	72	0	0,6	2	72	0	0,6	2	66	5,4	0	2	72	0,6	1,2	72	0,6	72	0,6	54	18,6	1,2
		9,6	2	54	0	0	2	54	0	0	2	54	0	0	2	54	0	0	54	0	54	0	48	9,6	3,6
		6,0	2	48	0	0	2	48	0	0	2	48	0	0	2	48	0	0	48	0	48	0	42	6	0
		8,4	2	48	2,4	0	2	48	2,4	0	2	48	2,4	0	2	48	2,4	0	54	3,6	54	3,6	42	8,4	0
	avg.	11,8	2,0	54,6	1,1	0,2	2,0	54,6	1,1	0,2	2,0	52,2	3,3	0,0	2,0	54,0	1,9	0,4	57,6	2,1	57,6	2,1	46,2	11,8	2,5
	MANNING (I)	12,7	2	49	0,5	0	2	49	0,5	0	2	46	3,6	0,1	2	46	3,6	0,1	51	1,5	51	1,5	41	12,7	4,2
		9,1	2	38	0,1	0	2	38	0,1	0	2	36	2,2	1,7	2	37	1,5	2	39	0,9	40	1,9	30	9,1	1
		10,8	2	53	0,6	0	2	54	0	0,4	2	50	3,8	0,2	2	50	3,8	0,2	54	0,4	55	1,4	45	10,8	2,2
		7,9	2	43	0,1	0	2	43	0,1	0	2	41	2,1	0	2	42	1,3	0,2	44	0,9	47	3,9	39	7,9	3,8
		11,8	2	41	0,7	0	2	41	0,7	0	2	34	8,5	0,8	2	38	4,3	0,6	43	1,3	43	1,3	33	11,8	3,1
		6,1	2	43	0,3	0	2	43	0,3	0	2	42	2,1	0,8	2	45	0,2	1,9	44	0,7	45	1,7	39	6,1	1,8
		16,0	2	61	0	0,3	2	61	0	0,3	2	62	0,2	1,5	2	62	0,2	1,5	61	0,3	62	1,3	47	16	2,3
		7,5	2	42	0,3	0	2	42	0,3	0	2	39	3,9	0,6	2	42	0,6	0,3	43	0,7	43	0,7	36	7,5	1,2
		3,2	2	43	0,3	0	2	43	0,3	0	1	41	3,2	0,9	2	43	1,8	1,5	44	0,7	45	1,7	41	3,2	0,9
		9,9	2	50	0,3	0	2	50	0,3	0	2	49	1,6	0,3	2	49	1,6	0,3	51	0,7	52	1,7	45	9,9	4,6
	avg.	9,5	2,0	46,3	0,3	0,0	2,0	46,4	0,3	0,1	1,9	44,0	3,1	0,7	2,0	45,4	1,9	0,9	47,4	0,8	48,3	1,7	39,6	9,5	2,5
	H-avg.	10,7	2,0	50,5	0,7	0,1	2,0	50,5	0,7	0,2	2,0	48,1	3,2	0,3	2,0	49,7	1,9	0,6	52,5	1,5	53,0	1,9	42,9	10,7	2,5
	T-AVG.	**6,0**	**2,0**	**41,8**	**1,0**	**0,1**	**2,0**	**42,1**	**0,8**	**0,2**	**1,5**	**40,9**	**2,3**	**0,6**	**1,5**	**41,8**	**1,6**	**0,8**	**44,2**	**1,5**	**44,6**	**1,9**	**39,2**	**6,0**	**2,5**

Πηγή: Lagodimos and Mihiotis (2004).

Πίνακας IV: *Κατανομές (προφίλ) φορτίων παραγωγής (w_i).*

Load (L)	Επανάληψη									
Μηχανή	1 rep.	2 rep.	3 rep.	4 rep.	5 rep.	6 rep.	7 rep.	8 rep.	9 rep.	10 rep.
i=1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
i=2	7	11	3	7	11	3	7	11	3	7
i=3	3	9	4	10	5	12	6	1	7	2
i=4	10	7	4	1	9	6	3	12	9	10
i=5	8	11	3	7	11	2	6	10	2	6
i=6	6	8	9	11	12	1	3	4	6	7
i=7	5	6	7	8	9	10	12	1	2	3
i=8	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
i=9	10	4	12	5	11	5	11	5	11	5
i=10	9	7	5	3	12	10	8	6	3	12
Σύνολο	70	74	57	61	88	56	62	55	47	55

Load (H)	Επανάληψη									
Μηχανή	1 rep.	2 rep.	3 rep.	4 rep.	5 rep.	6 rep.	7 rep.	8 rep.	9 rep.	10 rep.
i=1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
i=2	16	4	9	15	3	9	15	3	9	15
i=3	12	4	14	6	15	7	17	9	11	10
i=4	3	16	12	7	2	15	11	6	1	14
i=5	14	1	7	13	18	6	12	17	5	11
i=6	13	15	17	1	3	5	8	10	12	14
i=7	6	8	9	11	13	14	16	18	2	3
i=8	1	17	15	14	12	11	9	7	6	4
i=9	16	7	16	7	16	7	16	8	17	8
i=10	16	13	9	6	3	17	14	11	7	4
Σύνολο	98	86	109	81	86	92	119	90	80	84

Πηγή: Lagodimos and Mihiotis (2004).

Πίνακας Va: *Αναλυτικότερη δομή της λύσης για κάθε βάρδια για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού.*

	ci	(I)																					
	r	(L)											(H)										
		OPT					NOV			FOV			OPT					NOV			FOV		
		R1	R2	O1	O2	U	R1	R2	U	R	O	U	R1	R2	O1	O2	U	R1	R2	U	R	O	U
LOAD (L)	MANNING (E)	6	36	0	0	0	36	6	0	42	0,6	0,6	12	30	0	0	0	36	6	0	42	0,6	0,6
		18	24	1,8	0,6	0	42	6	3,6	48	1,2	4,8	18	24	1,8	0,6	0	42	6	3,6	48	1,2	4,8
		18	12	1,8	2,4	0	30	6	1,8	36	1,2	3	12	24	0	0	1,8	30	6	1,8	36	1,2	3
		6	30	0,6	0	0	36	6	5,4	36	0,6	0	18	18	0,6	0	0	36	6	5,4	36	0,6	0
		36	18	0	0	1,2	36	18	1,2	54	4,2	5,4	18	36	0	0	1,2	36	18	1,2	54	4,2	5,4
		6	24	3,6	0	0	30	6	2,4	36	1,2	3,6	6	24	2,4	1,2	0	30	6	2,4	36	1,2	3,6
		18	18	1,2	0	0	36	6	4,8	36	1,8	0,6	24	12	0,6	0,6	0	36	6	4,8	36	1,8	0,6
		18	12	3	0	0	30	6	3	36	1,8	4,8	18	12	1,8	1,2	0	30	6	3	36	1,8	4,8
		12	12	3	1,2	0	24	6	1,8	30	0,6	2,4	18	12	0	0	1,8	24	6	1,8	30	0,6	2,4
		12	18	3	0	0	30	6	3	36	1,2	4,2	18	12	2,4	0,6	0	30	6	3	36	1,2	4,2
	MANNING (I)	17	15	0,2	0,5	0	16	17	0,3	33	0,3	0,6	14	19	0	0	0,3	16	17	0,3	33	0,3	0,6
		19	21	0,5	0	0	27	14	0,5	42	1,5	3	28	12	0,5	0	0	27	14	0,5	42	1,5	3
		19	5	0,4	0	0	7	18	0,6	25	0,4	1	16	8	0,2	0,2	0	7	18	0,6	25	0,4	1
		14	18	0,6	0	0	18	16	1,4	35	0,5	2,9	17	15	0,3	0,3	0	18	16	1,4	35	0,5	2,9
		16	27	0	0	0,1	16	27	0,1	45	2,9	5	16	27	0	0	0,1	16	27	0,1	45	2,9	5
		15	12	0	0	0	15	12	0	27	1,6	1,6	12	15	0	0	0	12	15	0	27	1,6	1,6
		13	15	0,6	0	0	26	4	1,4	29	1	1,4	9	19	0,5	0,1	0	26	4	1,4	29	1	1,4
		9	22	0,3	0	0	19	13	0,7	32	2,3	3	15	16	0,3	0	0	19	13	0,7	32	2,3	3
		15	9	0	0	0	17	7	0	25	0,2	1,2	17	7	0	0	0	17	7	0	25	0,2	1,2
		8	19	0	0	0	8	19	0	28	0,2	1,2	8	19	0	0	0	19	8	0	28	0,2	1,2
LOAD (H)	MANNING (E)	30	30	0	0	1,2	36	24	1,2	48	16,2	5,4	30	30	0	0	1,2	36	24	1,2	48	16,2	5,4
		12	36	3,6	0	0	36	18	2,4	42	12,6	3	18	30	3	0,6	0	36	18	2,4	42	12,6	3
		24	42	0	0	0,6	42	24	0,6	54	14,4	3	36	30	0	0	0,6	42	24	0,6	54	14,4	3
		18	30	0,6	0	0	36	18	5,4	42	7,8	1,2	24	24	0,6	0	0	36	18	5,4	42	7,8	1,2
		24	24	2,4	1,2	0	30	24	2,4	42	14,4	4,8	18	30	3	0,6	0	30	24	2,4	42	14,4	4,8
		18	36	1,2	0	0	42	18	4,8	48	10,2	3	30	24	1,2	0	0	42	18	4,8	48	10,2	3
		30	42	0	0	0,6	42	30	0,6	54	18,6	1,2	30	42	0	0	0,6	42	30	0,6	54	18,6	1,2
		24	30	0	0	0	42	12	0	48	9,6	3,6	18	36	0	0	0	42	12	0	48	9,6	3,6
		12	36	0	0	0	36	12	0	42	6	0	12	36	0	0	0	36	12	0	42	6	0
		24	24	0,6	1,8	0	36	18	3,6	42	8,4	0	24	24	1,2	1,2	0	36	18	3,6	42	8,4	0
	MANNING (I)	23	26	0,3	0,2	0	28	23	1,5	41	12,7	4,2	23	26	0,3	0,2	0	28	23	1,5	41	12,7	4,2
		22	16	0	0,1	0	24	15	0,9	30	9,1	1	22	16	0	0,1	0	24	15	0,9	30	9,1	1
		23	30	0,6	0	0	36	18	0,4	45	10,8	2,2	32	22	0	0	0,4	36	18	0,4	45	10,8	2,2
		24	19	0,1	0	0	26	18	0,9	39	7,9	3,8	24	19	0,1	0	0	26	18	0,9	39	7,9	3,8
		18	23	0,7	0	0	23	20	1,3	33	11,8	3,1	18	23	0,7	0	0	23	20	1,3	33	11,8	3,1
		21	22	0,1	0,2	0	23	21	0,7	39	6,1	1,8	21	22	0,1	0,2	0	23	21	0,7	39	6,1	1,8
		32	29	0	0	0,3	37	24	0,3	47	16	2,3	32	29	0	0	0,3	37	24	0,3	47	16	2,3
		23	19	0,3	0	0	16	27	0,7	36	7,5	1,2	20	22	0,1	0,2	0	16	27	0,7	36	7,5	1,2
		20	23	0	0,3	0	29	15	0,7	41	3,2	0,9	20	23	0	0,3	0	29	15	0,7	41	3,2	0,9
		21	29	0,3	0	0	30	21	0,7	45	9,9	4,6	21	29	0,3	0	0	30	21	0,7	45	9,9	4,6

Πηγή: Lagodimos and Mihiotis (2004).

Πίνακας Vb: *Αναλυτικότερη δομή της λύσης για κάθε βάρδια για όλα τα προβλήματα και όλες τις πολιτικές προγραμματισμού.*

	ci	(U)																					
	r	(L)											(H)										
		OPT					NOV			FOV			OPT					NOV			FOV		
		R1	R2	O1	O2	U	R1	R2	U	R	O	U	R1	R2	O1	O2	U	R1	R2	U	R	O	U
LOAD (L)	MANNING (E)	42	0	0	0,6	0,6	36	6	0	42	0,6	0,6	42	0	0	0,6	0,6	36	6	0	42	0,6	0,6
		42	0	0	2,4	0	42	6	3,6	48	1,2	4,8	42	0	0	2,4	0	42	6	3,6	48	1,2	4,8
		36	0	0	1,2	3	30	6	1,8	36	1,2	3	36	0	0	1,2	3	30	6	1,8	36	1,2	3
		36	0	0	0,6	0	36	6	5,4	36	0,6	0	36	0	0	0,6	0	36	6	5,4	36	0,6	0
		48	6	0	0	1,2	48	6	1,2	54	4,2	5,4	48	6	0	0	1,2	48	6	1,2	54	4,2	5,4
		36	0	0	1,2	3,6	30	6	2,4	36	1,2	3,6	36	0	0	1,2	3,6	30	6	2,4	36	1,2	3,6
		36	0	0	1,8	0,6	36	6	4,8	36	1,8	0,6	36	0	0	1,8	0,6	36	6	4,8	36	1,8	0,6
		30	0	0	3	0	30	6	3	36	1,8	4,8	30	0	0	3	0	30	6	3	36	1,8	4,8
		30	0	0	0,6	2,4	24	6	1,8	30	0,6	2,4	30	0	0	0,6	2,4	24	6	1,8	30	0,6	2,4
		30	0	0	3	0	30	6	3	36	1,2	4,2	30	0	0	3	0	30	6	3	36	1,2	4,2
	MANNING (I)	33	0	0	0,3	0,6	31	3	1,3	33	0,3	0,6	33	0	0	0,3	0,6	31	3	1,3	33	0,3	0,6
		39	0	0	1,8	0,3	33	9	1,5	42	1,5	3	39	0	0	1,8	0,3	33	9	1,5	42	1,5	3
		24	0	0	0,6	0,2	23	2	0,6	25	0,4	1	24	0	0	0,6	0,2	23	2	0,3	25	0,4	1
		32	0	0	1,1	0,5	29	5	1,4	35	0,5	2,9	32	0	0	1,1	0,5	29	5	1,4	35	0,5	2,9
		43	0	0	3,2	3,3	33	11	1,1	45	2,9	5	42	0	0	3,2	2,3	33	11	1,1	45	2,9	5
		25	0	0	2	0	20	8	1	27	1,6	1,6	25	0	0	2	0	20	8	1	27	1,6	1,6
		28	0	0	1,1	0,5	26	4	1,4	29	1	1,4	28	0	0	1,1	0,5	26	4	1,4	29	1	1,4
		28	0	0	3,5	0,2	23	9	0,7	32	2,3	3	30	0	0	2,9	1,6	23	9	0,7	32	2,3	3
		24	0	0	0,4	0,4	23	2	1	25	0,2	1,2	24	0	0	0,4	0,4	23	2	3	25	0,2	1,2
		27	0	0	0,4	0,4	27	1	1	28	0,2	1,2	27	0	0	0,4	0,4	27	1	1	28	0,2	1,2
LOAD (H)	MANNING (E)	42	12	0,6	4,2	0	42	18	1,2	48	16,2	5,4	42	18	0	0	1,2	42	18	1,2	48	16,2	5,4
		36	12	3	0,6	0	36	18	2,4	42	12,6	3	36	12	3	0,6	0	36	18	2,4	42	12,6	3
		48	12	3	2,4	0	48	18	0,6	54	14,4	3	48	12	3	2,4	0	38	18	0,6	54	14,4	3
		36	6	4,8	1,8	0	42	12	5,4	42	7,8	1,2	42	6	0	1,8	1,2	42	12	5,4	42	7,8	1,2
		36	12	1,2	2,4	0	36	18	2,4	42	14,4	4,8	36	12	1,2	2,4	0	36	18	2,4	42	14,4	4,8
		42	12	1,2	0	0	48	12	4,8	48	10,2	3	42	12	1,2	0	0	48	12	4,8	48	10,2	3
		48	18	4,8	0,6	0	48	24	0,6	54	18,6	1,2	54	18	0	0,6	1,2	48	24	0,6	54	18,6	1,2
		42	12	0	0	0	42	12	0	48	9,6	3,6	42	12	0	0	0	42	12	0	48	9,6	3,6
		42	6	0	0	0	42	6	0	42	6	0	42	6	0	0	0	42	6	0	42	6	0
		42	6	0	2,4	0	42	12	3,6	42	8,4	0	42	6	0	2,4	0	42	12	3,6	42	8,4	0
	MANNING (I)	35	11	1,8	1,8	0,1	35	16	1,5	41	12,7	4,2	35	11	1,8	1,8	0,1	35	16	5,5	41	12,7	4,2
		28	8	0,9	1,3	0,1	28	12	1,9	30	9,1	1	29	8	0,2	1,3	0,4	28	12	1,9	30	9,1	1
		40	10	2,3	1,5	0,2	41	14	1,4	45	10,8	2,2	40	10	2,3	1,5	0,2	41	14	1,4	45	10,8	2,2
		32	9	2,1	0	0	37	10	3,9	39	7,9	3,8	33	9	1,3	0	0,2	27	10	3,9	39	7,9	3,8
		24	10	6,4	2,1	0,8	28	15	1,3	33	11,8	3,1	28	10	2,1	2,2	0,6	28	15	1,3	33	11,8	3,1
		34	8	1,8	0,3	0,8	37	8	1,7	39	6,1	1,8	38	7	0	0,2	1,9	37	8	1,7	39	6,1	1,8
		45	17	0,2	0	1,5	42	20	1,3	47	16	2,3	45	17	0,2	0	1,5	42	20	1,3	47	16	2,3
		33	6	1,6	2,3	0,6	33	10	0,7	36	7,5	1,2	32	10	0,6	0	0,3	33	10	0,7	36	7,5	1,2
		41	0	0	3,2	0,9	37	8	1,7	41	3,2	0,9	41	2	0	1,8	1,5	37	8	1,7	41	3,2	0,9
		37	12	1,6	0	0,3	39	13	1,7	45	9,9	4,6	37	12	1,6	0	0,3	39	13	1,7	45	9,9	4,6

Πηγή: Lagodimos and Mihiotis (2004).