

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΑΞΗ
ΜΕΡΟΣ ΙΙ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ

4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (PROCESS PLANNING)

4.1 Εισαγωγή

Ο αρχικός σχεδιασμός (conceptualization) μιας συσκευής ή ενός εξαρτήματος καταλήγει συνήθως σε ένα σχέδιο (σε χαρτί ή σε ηλεκτρονικό αρχείο/CAD) το οποίο προσδιορίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, τις διαστάσεις του, τις απαιτούμενες για την σωστή λειτουργία του ανοχές κ.λ.π. Προκειμένου να παραχθεί το σχεδιασμένο αντικείμενο, είναι απαραίτητες οδηγίες που να αναφέρονται στο είδος και την σειρά εκτέλεσης των διαφόρων διεργασιών, που απαιτούνται για την μετατροπή των πρώτων υλών στο τελικό αντικείμενο, όπως αυτό προβλέπεται στο σχέδιο. Οι οδηγίες αυτές περιλαμβάνουν συνήθως και πληροφορίες σχετικά με τον απαραίτητο τεχνολογικό εξοπλισμό, τις ιδιοσυσκευές και άλλα στοιχεία των παραγωγικών διεργασιών. Το σύνολο των οδηγιών αυτών αποτελεί το λεγόμενο Τεχνολογικό Πρόγραμμα Παραγωγής (Process Planning) του συγκεκριμένου αντικειμένου και καταγράφεται σε ένα φύλλο εργασίας ή σε ένα πρόγραμμα εργασιών (Σχ. 4.1), το οποίο περιέχει τις σχετικές πληροφορίες συμπεριλαμβανομένων του είδους του προϊόντος, των υλικών κατασκευής κ.λ.π.

Στα πλαίσια του Τεχνολογικού Προγραμματισμού Παραγωγής (ΤΠΠ) λαμβάνεται υπ' όψη ένα πλήθος παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν την επιλογή και την αλληλουχία των διαφορετικών διεργασιών και των παραμέτρων τους. Τέτοιοι παράγοντες είναι, π.χ., το σχήμα και το μέγεθος του υπό κατασκευή εξαρτήματος, οι απαιτούμενες ανοχές, η ποιότητα της επιφάνειας, τα υλικά κατασκευής και η παραγόμενη ποσότητα.

Είναι σαφές, ότι το προσωπικό, που είναι αρμόδιο για τον ΤΠΠ, πρέπει να έχει την ικανότητα να ερμηνεύει σωστά ένα συγκεκριμένο σχέδιο και να έχει σχετικά μεγάλη εμπειρία σε σχέση με τις διάφορες παραγωγικές διεργασίες και τον μηχανολογικό εξοπλισμό. Εξ αιτίας των απαιτούμενων ικανοτήτων και της εμπειρίας έχει εκτιμηθεί, διεθνώς, ότι στην βιομηχανία υπάρχει γενικά μεγαλύτερη ζήτηση για προσωπικό με ικανότητες Τεχνολογικού Προγραμματισμού Παραγωγής από το διαθέσιμο ή ικανό για την δραστηριότητα αυτή.

Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος δημιουργίας υπολογιστικών συστημάτων, με την βοήθεια των οποίων θα καθορίζεται ολικά ή μερικά το Τεχνολογικό Πρόγραμμα Παραγωγής με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (Computer Aided Process Planning/CAPP).

Ο Τεχνολογικός Προγραμματισμός Παραγωγής με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (ΤΠΠ Η/Υ) είναι δυνατόν να παρέχει ένα Τεχνολογικό Πρόγραμμα Παραγωγής γρήγορα και αξιόπιστα, ενώ η συγκέντρωση και καταχώρηση της εμπειρίας του ΤΠΠ σε μορφή προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή συμβάλλει στην αποτελεσματικότητα και την ομοιογένεια των Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής.

OPERATION SHEET (Process plan)				
Part No. _____		Material _____		
Part Name _____		Changes _____		
Orig. _____		Approved _____		
Checked _____				
No.	Operation Description	Machine	Set-up Description	Operate Hr/unit
5	Rough and finish mill 2 mating surfaces	Cinc. Mill (Kender 136)	Gang 6 castings in fixture	
10	Spotface and drill two holes 33/84 in. D, drill 27/84 in. D pipe hole, tap 1/4 in. pipe thread	Multispindle drill press	Piece on table Piece in 35° drill jig	
15	Rough and finish bore 6 1/4 in. D, bore 6 1/2 in D x 3/8 in. wide groove	Bullard vert. Boring Mill (kender = 335)	Clamp to eccentric Connector Half (S563-5), then mount both parts in 4-jaw chuck	

Operation Sheet = Φύλλο Διαργασιών
 Part No = Αριθμός εξαρτήματος
 Part Name = Ονομα εξαρτήματος
 Orig. = Προέλευση
 Checked = ελεγμένο
 Material = Υλικό
 Changes = Αλλαγές
 Approved = εγκεκριμένο
 Operation Description = Περιγραφή Διαργασίας
 Machine = Μηχανή
 Setup Description = Περιγραφή προετοιμασίας
 Operate Hr/Unit = Επεξεργασία -Ωρες/μονάδα
 Rough and finish mill: 2 mating surfaces = Χονδρικό και εκλεπτυσμένο φρεζάρισμα: 2 αντικριστές επιφάνειες
 Cinc. Mill (Kender #136) = Φρέζα (Kender #136)

Gang 6 castings in fixture = Ομάδα 6 χυτών τεμαχίων στον προσαρμογέα
 Spotface and drill: two holes 33/84 in. D, drill 27/84 in. D pipe hole, tap 1/4 in. pipe thread = Κεντράρισμα και διάτρηση: δύο οπές διαμέτρου 33/84 της ίντσας, δράπανο με διάμετρο οπής σωλήνα 27/84 της ίντσας, τάπα σπειρώματος σωλήνα του 1/4 της ίντσας
 Multispindle drill press = Πολυαξονική πρέσα διάτρησης
 Piece on table = Εξάρτημα στην τράπεζα εργασίας
 Piece in 35° jig = Εξάρτημα στην διάταξη κράτησης με γωνία 35°
 Clamp to Eccentric Connector Half (S563-5), then mount both parts in 4-jaw chuck = Σύσφιξη στο ήμισυ έκκεντρου συνδετήρα και στην συνέχεια τοποθέτηση των δύο εξαρτημάτων σε σφιγκτήρα τεσσάρων σιαγόνων

Σχήμα 4.1 Τυπικό Τεχνολογικό Πρόγραμμα (Typical Process Plan)

4.1.1 Τεχνολογικός προγραμματισμός παραγωγής με την βοήθεια Η/Υ (Computer Aided Process Planning)

Ο Τεχνολογικός Προγραμματισμός Παραγωγής με την βοήθεια Ηλεκτρονικών Υπολογιστών έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία 20 χρόνια. Η διεθνής πρακτική ανάπτυξης του ΤΠΠ Η/Υ έχει ακολουθήσει δυο διαφορετικές προσεγγίσεις:

- *Παραλλαγή* (υπαρχόντων) Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (Variant Computer Aided Process Planning/VCAPP). Η μέθοδος αυτή προβλέπει την δημιουργία αρχείων με βασικά Τεχνολογικά Προγράμματα Παραγωγής (Master Process Plans), που όπως θα αναλύσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια στην συνέχεια, χρησιμοποιούνται, μετά από μικρές αλλαγές, στην δημιουργία ΤΠΠ για νέα εξαρτήματα, τα οποία όμως είναι παρόμοια με εκείνα των οποίων τα ΤΠΠ έχουν ήδη ομαδοποιηθεί και αρχειοθετηθεί.
- *Δημιουργία* νέων Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (Generative Computer Aided Process Planning/GCAPP). Η προσέγγιση αυτή προβλέπει την δημιουργία Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής αυτόματα, όπου τα ΤΠΠ για τα νέα εξαρτήματα δημιουργούνται, χωρίς να είναι απαραίτητη η αναφορά σε ΤΠΠ που ήδη υπάρχουν.

Η δεύτερη προσέγγιση (GCAPP) είναι ο πλέον επιθυμητός τρόπος χρήσης Η/Υ στον ΤΠΠ, αφού είναι μια γενικευμένη μέθοδος, που επιτρέπει την δημιουργία ΤΠΠ οποιουδήποτε εξαρτήματος χωρίς την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα. Συγχρόνως, όμως, είναι και ο πλέον δύσκολος τρόπος εφαρμογής του Τεχνολογικού Προγραμματισμού Παραγωγής με την βοήθεια Η/Υ, δεδομένου ότι απαιτεί την "απογραφή" και χρήση με την βοήθεια Η/Υ της ανθρώπινης λογικής που χρησιμοποιείται στον ΤΠΠ.

Ο Τεχνολογικός Προγραμματισμός Παραγωγής συνδέει τον σχεδιασμό (Design) και την παραγωγή (Manufacturing) και επομένως ο ΤΠΠ Η/Υ είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στην προσπάθεια της ηλεκτρονικής ολοκλήρωσης των δραστηριοτήτων σχεδιασμού και παραγωγής.

Τα συστήματα, που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς και διατίθενται σαν εμπορικά προϊόντα ΤΠΠ Η/Υ, ποικίλουν από απλούς συντάκτες (editors), καταλλήλους για ΤΠΠ, έως πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα, τα οποία δημιουργούν Τεχνολογικά Προγράμματα Παραγωγής για μια ποικιλία εξαρτημάτων με σχετικά μικρή ανθρώπινη παρέμβαση. Η εισαγωγή συστημάτων ΤΠΠ Η/Υ σε μια επιχείρηση θεωρείται, γενικώς, ότι μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως:

1. *Βελτιωμένη παραγωγικότητα (Improved Productivity)* εξ αιτίας της αποτελεσματικότερης χρήσης μηχανών, εργαλείων, υλικών και εργατικού δυναμικού. Η "βέλτιστη πρακτική" (best practice), δηλαδή, τα

καλύτερα ΤΠΠ καταχωρούνται συστηματικά, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις πιθανές εφαρμογές σε μια επιχείρηση.

2. *Χαμηλότερο κόστος παραγωγής (Lower Production Cost)*. Η βελτίωση της παραγωγικότητας έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους παραγωγής, ενώ οι ικανότητες του προσωπικού, που απαιτούνται για τον ΤΠΠ Η/Υ, είναι σχετικά λιγότερες από αυτές που απαιτούνται για ΤΠΠ χωρίς την χρήση Η/Υ.
3. *Συνέπεια (Consistency)*. Ο ΤΠΠ Η/Υ διασφαλίζει την ομοιογενή εφαρμογή των σωστών κριτηρίων Τεχνολογικού Προγραμματισμού, έτσι ώστε ο αριθμός των λαθών που δημιουργούνται κατά την διάρκεια του ΤΠΠ να μειώνεται.
4. *Οικονομία χρόνου (Time saving)*. Η μείωση του χρόνου, που απαιτείται για ΤΠΠ, ποικίλει από μερικές ανθρωποώρες μέχρι αρκετούς ανθρωπομήνες ανάλογα με την πολυπλοκότητα του υπό προγραμματισμού εξαρτήματος. Οι χρόνοι ολοκλήρωσης παραγγελιών (Lead Times) μπορεί να μειωθούν σημαντικά, γιατί η ευελιξία του συστήματος αυξάνεται εξ αιτίας της ικανότητας του ΤΠΠ Η/Υ να αντιδρά γρήγορα σε καινούργιες ή μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Τέλος μειώνεται η γραφειοκρατία και ο χρόνος διοικητικής υποστήριξης, που δαπανάται στις περιπτώσεις συχνών αλλαγών στα αρχικά σχέδια των εξαρτημάτων.
5. *Ταχύτερη ενσωμάτωση νέων παραγωγικών δυνατοτήτων (Rapid integration of new production capabilities)*. Με την πάροδο του χρόνου δημιουργούνται νέες δυνατότητες παραγωγής, που μπορεί να προσφέρουν σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε μια επιχείρηση. Ο ΤΠΠ Η/Υ επιτρέπει την γρήγορη ενσωμάτωση των νέων δυνατοτήτων παραγωγής στην συνολική παραγωγική διαδικασία.

Η αυτοματοποίηση του ΤΠΠ και η δημιουργία και χρήση συστημάτων ΤΠΠ Η/Υ συνοδεύονται παράλληλα και από προβλήματα όπως:

1. Οι προθέσεις του σχεδιαστή ενός εξαρτήματος ή προϊόντος μπορεί να μην είναι σαφείς μόνο από το σχέδιο του εξαρτήματος ή του προϊόντος. Ο ΤΠΠ όμως, πρέπει να λάβει σοβαρά υπ' όψη του τις προθέσεις του σχεδιαστή ενός προϊόντος, τις οποίες ένας Η/Υ δεν είναι σε θέση να κατανοήσει ή να συζητήσει με τον σχεδιαστή. Κατά συνέπεια, μπορεί να προκληθεί σύγχυση, που εντείνεται εξ αιτίας των διαφορών στην ορολογία αλλά και στον τρόπο σκέψης μεταξύ του προσωπικού, που εκτελεί σχεδιασμό (Design) και του προσωπικού που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή (Manufacturing).

2. Ο πλήρης αυτοματισμός του ΤΠΠ προβλέπει, ότι όλα τα χαρακτηριστικά ενός εξαρτήματος πρέπει να προκύπτουν από το σχέδιο του ή το ηλεκτρονικό του αρχείο χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και σχολιασμό. Ωστόσο, μερικές φορές τα μηχανολογικά σχέδια δεν περιέχουν όλες τις απαιτούμενες για τον ΤΠΠ Η/Υ πληροφορίες.
3. Μια πηγή προβλημάτων για όλα τα συστήματα ΤΠΠ Η/Υ είναι η επικοινωνία τους (interface) με τα συστήματα σχεδιασμού με την βοήθεια Η/Υ (CAD). Η μετάφραση από συστήματα CAD σε συστήματα ΤΠΠ Η/Υ είναι σχετικά δύσκολη και συχνά απαιτεί ανθρώπινη παρέμβαση.
4. Ο σχεδιαστής συχνά δεν λαμβάνει υπ' όψη του τους πιθανούς κατασκευαστικούς περιορισμούς, οπότε το μηχανολογικό σχέδιο, που προκύπτει, μπορεί να είναι μη πραγματοποιήσιμο ή να έχει μεγάλο κατασκευαστικό κόστος.
5. Η δημιουργία και η εκτέλεση ενός προγράμματος παραγωγής μπορεί να έχει μεγάλη διάρκεια και να εμπλέκει πολλούς οργανισμούς, οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες. Η παρακολούθηση και η βελτίωση του προγράμματος παραγωγής μπορεί να είναι δύσκολο να αυτοματοποιηθεί.

Από τις διάφορες μεθόδους ΤΠΠ Η/Υ, η μέθοδος *Παραλλαγής Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (Variant Computer Aided Process Planning/VCAPP)* εφαρμόζεται ευκολότερα. Τα συστήματα αυτού του είδους επιτρέπουν την ταχεία δημιουργία ΤΠΠ, με βάση συγκρίσεις χαρακτηριστικών του υπό κατασκευή εξαρτήματος με χαρακτηριστικά γνωστών εξαρτημάτων, τα οποία είναι αποθηκευμένα σε μια βάση δεδομένων. Ωστόσο, προκειμένου να εφαρμόσουμε την μέθοδο της Παραλλαγής Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής, τα εξαρτήματα πρέπει πρώτα να ομαδοποιηθούν σε οικογένειες (part families) με βάση τα κοινά χαρακτηριστικά τους. Εάν ένα νέο υπό κατασκευή εξάρτημα δεν μπορεί εύκολα να συσχετισθεί με μια από τις ομάδες που υπάρχουν, τότε δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένα ΤΠΠ για το εξάρτημα αυτό. Επίσης, καθώς η πολυπλοκότητα της ομαδοποίησης των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων αυξάνεται, αυξάνεται και ο αριθμός των οικογενειών των εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα ο χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων κατά την δημιουργία ενός ΤΠΠ να γίνεται υπερβολικά μεγάλος. Στην περίπτωση που υπάρχει ένας μικρός αριθμός οικογενειών εξαρτημάτων με μικρή διασπορά χαρακτηριστικών για τα νέα σχέδια, η μέθοδος Παραλλαγής Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (Variant process planning) είναι μια γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδος για την δημιουργία νέων τεχνολογικών προγραμμάτων παραγωγής.

Η μέθοδος *Δημιουργίας νέων Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (GCAPP)* βασίζεται στην υπάρχουσα γνώση (knowledge base) για την δημιουρ-

γία τεχνολογικών προγραμμάτων παραγωγής, τα οποία αφορούν ένα νέο σχέδιο ανεξάρτητο από τα υπάρχοντα ΤΠΠ. Αυτή η γνώση (knowledge base) είναι ένα σύνολο κανόνων, που προέρχονται από την εμπειρία των ανθρώπων που σχεδιάζουν τον τεχνολογικό προγραμματισμό. Με την μέθοδο αυτή δημιουργούνται ΤΠΠ για ένα μεγάλο φάσμα σχεδίων με ανόμοια χαρακτηριστικά. Ωστόσο, οι μέθοδοι GCAPP είναι δύσκολο να εφαρμοσθούν από την άποψη, ότι πρέπει να κατασκευασθούν σύνολα κανόνων, τα οποία να περικλείουν όλα τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά των σχεδίων. Τα συστήματα GCAPP είναι, επίσης, δύσκολο να εφαρμοσθούν εξ αιτίας της μεγάλης ποσότητας των δεδομένων και της γνώσης που απαιτείται για την δημιουργία ακόμη και σχετικά απλών τεχνολογικών προγραμμάτων. Για την εφαρμογή των συστημάτων GCAPP απαιτείται η δημιουργία σημαντικού αριθμού σεναρίων, οπότε οι απαιτήσεις μνήμης του υπολογιστή για την επεξεργασία των στοιχείων φθάνουν στα όρια των υπολογιστικών συστημάτων.

Ο σημαντικότερος περιορισμός πολλών συστημάτων GCAPP, που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα, είναι η αδυναμία ακριβούς και ολοκληρωμένης αναπαράστασης του μοντέλου του προϊόντος ή του εξαρτήματος. Συχνά καλούνται οι τεχνικοί να κάνουν την διαστασιολόγηση και να ορίσουν τις ανοχές, επειδή το CAPP ή δεν έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει τις εργασίες αυτές σε λογικά χρονικά πλαίσια ή δεν μπορεί να τις πραγματοποιήσει καθόλου. Εμπορικά, η μέθοδος αυτή προγραμματισμού της παραγωγής έχει περιορισθεί σε λίγες εξειδικευμένες εφαρμογές.

4.2 Βασικές έννοιες του τεχνολογικού προγραμματισμού Παραγωγής (Basic Concepts of Process Planning)

Υπάρχουν ορισμένοι τρόποι προσέγγισης του προβλήματος του Τεχνολογικού Προγραμματισμού Παραγωγής (ΤΠΠ), που περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένες και μη μεθόδους. Οι μη αυτοματοποιημένες μέθοδοι περιλαμβάνουν το *βιβλίο εργασιών (workbook)*. Από την άλλη πλευρά, οι αυτοματοποιημένες μέθοδοι περιλαμβάνουν την ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση των *Παραλλαγών* (υπαρχόντων) Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (variant approach), την *πλήρως αυτοματοποιημένη προσέγγιση* Δημιουργίας νέων Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής και την *υβριδική μέθοδο (hybrid semi-generative)*.

4.2.1 Μη αυτοματοποιημένος τεχνολογικός (Manual Process Planning)

Η μη αυτοματοποιημένη μέθοδος (MPP) του τεχνολογικού προγραμματισμού παραγωγής αρχίζει από την στιγμή, όπου ένα λεπτομερές μηχανολογικό σχέδιο και τα δεδομένα που το συνοδεύουν, γνωστοποιούνται στον μηχανικό παρα-

γωγής. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα ακόλουθα:

- Τις μηχανουργικές κατεργασίες, που εμπλέκονται στην κατασκευή του εξαρτήματος
- Τις εργαλειομηχανές, που απαιτούνται για την εκτέλεση αυτών των κατεργασιών
- Τα εργαλεία που απαιτούνται σε κάθε στάδιο κατεργασίας
- Τα εξαρτήματα στήριξης, που απαιτούνται σε κάθε στάδιο κατεργασίας
- Το βάθος και τον αριθμό των πάσων (passes) κατά την διάρκεια μιας κατεργασίας
- Τις κατάλληλες προώσεις και ταχύτητες για κάθε κατεργασία
- Τον τύπο των διεργασιών φινιρίσματος, που είναι απαραίτητος, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι προκαθορισμένες ανοχές και η ποιότητα επιφάνειας.

Ο μηχανικός παραγωγής εξετάζει κατ' αρχήν το σχέδιο του εξαρτήματος, που πρόκειται να παραχθεί, προκειμένου να αναγνωρίσει τυχόν ομοιότητες με εξαρτήματα που είχαν παραχθεί στο παρελθόν. Στην περίπτωση, που αναγνωρισθούν κάποιες ομοιότητες, τότε ανασύρεται ένα ΤΠΠ με την βοήθεια μη αυτοματοποιημένων μεθόδων. Αυτό το πρόγραμμα παραγωγής είτε χρησιμοποιείται χωρίς τροποποιήσεις για την παραγωγή ίδιων εξαρτημάτων ή τροποποιείται ανάλογα, ώστε να ανταποκρίνεται στις κατασκευαστικές απαιτήσεις για τα νέα εξαρτήματα. Παρόλο που χρησιμοποιούνται παλιά Τεχνολογικά Προγράμματα Παραγωγής σαν αναφορές για την παραγωγή νέων ή παρόμοιων εξαρτημάτων, παρουσιάζονται ακόμη σημαντικές δυσκολίες επειδή δεν υπάρχουν ικανοποιητικές μέθοδοι ανάκτησης, σύγκρισης και επεξεργασίας των πληροφοριών. Η μη αυτοματοποιημένη μέθοδος μπορεί ακόμη να οδηγήσει σε ασυνέπεια, σχετικά με τα τελικά τεχνολογικά προγράμματα παραγωγής (ΤΠΠ) των προϊόντων, γιατί είναι μάλλον αδύνατο δυο μηχανικοί τεχνολογικού προγραμματισμού παραγωγής να δημιουργήσουν δύο πανομοιότυπα προγράμματα παραγωγής.

Σε πολλές περιπτώσεις, ένα μέρος του σχεδίου του εξαρτήματος τροποποιείται κατά την διάρκεια του κύκλου ανάπτυξης του προϊόντος. Επομένως, το πρόγραμμα παραγωγής πρέπει, επίσης, να τροποποιηθεί, έτσι ώστε να συμπεριλάβει και τα νέα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος. Εφ' όσον ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός, οι διεργασίες και το πλήθος των εξαρτημάτων, που πρέπει να παραχθούν, αλλάζουν συνεχώς, μεταβάλλεται κατά συνέπεια και η βέλτιστη μέθοδος παραγωγής του εξαρτήματος. Οι αλλαγές αυτές πρέπει να αποτυπώνονται και στον τεχνολογικό προγραμματισμό παραγωγής. Ωστόσο, η έλλειψη συνοχής και η εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα κατά την εφαρμογή της μη αυτοματοποιημένης μεθόδου κάνουν εξαιρετικά δύσκολη την ταχεία ενσωμάτωση των αλλαγών των κατεργασιών.

Η εμπειρία του υπεύθυνου για τον τεχνολογικό προγραμματισμό παραγωγής παίζει καθοριστικό ρόλο στην τροποποίηση ή στην δημιουργία των τεχνολογικών προγραμμάτων παραγωγής, αφού αυτός επιλέγει τις κατεργασίες και τις τιμές των μεταβλητών των κατεργασιών, οι οποίες έχουν επιτυχώς εφαρμοσθεί σε παρόμοιες περιπτώσεις στο παρελθόν.

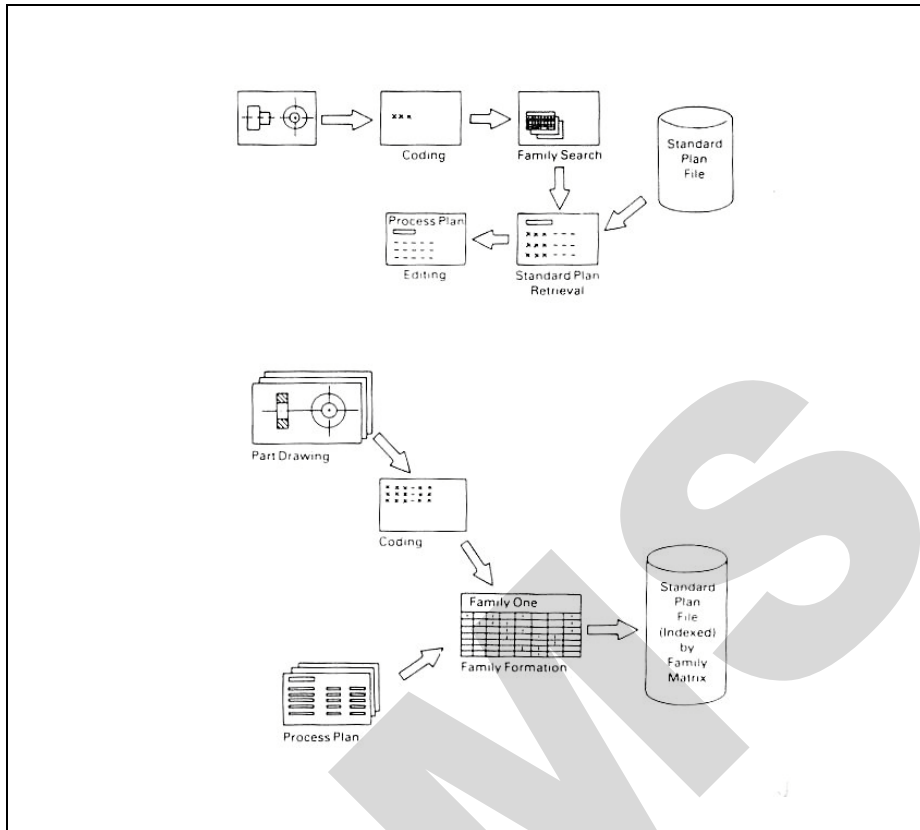
Εφ' όσον ο μη αυτοματοποιημένος τεχνολογικός προγραμματισμός είναι πολύ υποκειμενικός, η ποιότητα σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα και την εμπειρία του σχεδιαστή του Τεχνολογικού Προγράμματος Παραγωγής.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι δύσκολο αν όχι αδύνατο να επιτύχουμε τον βέλτιστο τεχνολογικό προγραμματισμό με την συμβατική μη αυτοματοποιημένη μέθοδο. Επομένως, το κόστος του Τεχνολογικού Προγραμματισμού και της παραγωγής αυξάνεται εξ αιτίας της αυξημένης προσπάθειας που καταβάλλεται για την δημιουργία του τεχνολογικού προγραμματισμού και τον καθορισμό των απαιτήσεων σε εργαλεία και υλικά. Οι χρόνοι παράδοσης της παραγωγής (production lead times) αυξάνονται, λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζονται στην διαδικασία δημιουργίας του τεχνολογικού προγραμματισμού.

4.2.2 Η μέθοδος του Βιβλίου Εργασιών (Workbook Approach)

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει καταλόγους διαδοχικών κατεργασιών για δεδομένες οικογένειες εξαρτημάτων. Ο μηχανικός παραγωγής έχει την δυνατότητα γρήγορης πρόσβασης σ' αυτές τις διαδοχικές κατεργασίες προκειμένου να σχεδιάσει ένα τεχνολογικό πρόγραμμα (process plan). Η χρησιμοποίηση της μεθόδου του Βιβλίου Εργασιών (WBA) διαφέρει από τον μη αυτοματοποιημένο τεχνολογικό προγραμματισμό στον τρόπο, με τον οποίο ο υπεύθυνος του Τεχνολογικού Προγραμματισμού αναγνωρίζει τις ομοιότητες στα εξαρτήματα –χρησιμοποιώντας κυρίως τον κατάλογο με τις ομάδες τους, παρά προηγούμενους τεχνολογικούς προγραμματισμούς παραγωγής. Με την χρησιμοποίηση του καταλόγου επιτυγχάνεται μεγαλύτερη συνέπεια στον τεχνολογικό προγραμματισμό και ταυτόχρονα παρέχεται στον σχεδιαστή μεγαλύτερη λειτουργικότητα. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή περιορίζεται από τον αριθμό των μεταβλητών (υλικά, γεωμετρία, ποιότητα) που μπορούν να καταχωρηθούν σε καταλόγους. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών, το πλήθος των δυνατών συνδυασμών και των σελίδων του βιβλίου αυξάνεται εκθετικά. Η χρησιμοποίηση της μεθόδου του Βιβλίου Εργασιών (WBA), όπως και η μη αυτοματοποιημένη μέθοδος τεχνολογικού προγραμματισμού, είναι μια υποκειμενική συνάρτηση που βασίζεται στην εμπειρία, στην προσωπική προτίμηση του σχεδιαστή, στην εκτενή γνώση της αγοράς, στην ερμηνεία των σχεδιαστικών απαιτήσεων και σε άλλους παράγοντες. Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν την συνεχή ενημέρωση των μηχανικών παραγωγής για τις νέες μεθόδους κατεργασίας καθώς και την απόσυρση του εξοπλισμού παραγωγής.

4.2.3 Η Μέθοδος της Παραλλαγής (Variant Approach)



Coding = Κωδικοποίηση
 Family Search = Αναζήτηση Οικογένειας
 Standard Plan File = Αρχείο Τυποποιημένου Προγράμματος
 Process Plan = Τεχνολογικό Πρόγραμμα Παραγωγής
 Editing = Έκδοση

Standard Plan Retrieval = Ανάσυρση Τυποποιημένου Προγράμματος
 Part drawing = Σχεδιασμός εξαρτήματος
 Family one = Πρώτη Οικογένεια
 Family Formation = Σχηματισμός οικογενειών
 Standard Plan File (Indexed) by Family Matrix = Αρχείο τυποποιημένου Προγράμματος με ένδειξη από τον Πίνακα Οικογενειών

Σχήμα 4.2 Διαδικασίες Μεταβλητού Προγραμματισμού Διεργασιών (Variant Approach)

Με την μέθοδο της παραλλαγής (VCAPP) αναζητούνται οι ομοιότητες μεταξύ των εξαρτημάτων και ανακτάται, μέσω μιας βάσης δεδομένων, ένας τυπικός τεχνολογικός προγραμματισμός εργασιών (standard process plan), για μια οικογένεια εξαρτημάτων, στην οποία ανήκει και το νέο εξάρτημα για το οποίο πρόκειται να δημιουργηθεί ένα Τεχνολογικό Πρόγραμμα Παραγωγής. Ο τυπικός ΤΠΠ εφαρμόζεται σε όλη την οικογένεια των εξαρτημάτων. Όταν ένας

τεχνολογικός προγραμματισμός διεργασιών ανακτηθεί, ακολουθούν ορισμένες αλλαγές, έτσι ώστε να ενσωματωθούν όλες οι λεπτομέρειες του μηχανολογικού σχεδίου. Γενικά, ο τεχνολογικός προγραμματισμός με την *μέθοδο της παραλλαγής* (VCAPP) περιλαμβάνει δυο στάδια: ένα προπαρασκευαστικό (preparatory stage) και αυτό της παραγωγής (production stage):

- Το *προπαρασκευαστικό στάδιο* (preparatory stage) περιλαμβάνει την κωδικοποίηση (coding), την κατηγοριοποίηση (classifying) και την ομαδοποίηση (grouping) των εξαρτημάτων που ήδη υπάρχουν σε ένα πίνακα οικογενειών (family matrix). Από τον πίνακα αυτόν εξάγονται ορισμένα τυπικά προγράμματα διεργασιών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να τροποποιηθούν αργότερα, έτσι ώστε να προκύψουν τα Τεχνολογικά Προγράμματα Παραγωγής για τα νέα εξαρτήματα.
- Το *στάδιο της παραγωγής* (production stage) ενός συστήματος τεχνολογικού προγραμματισμού παραγωγής περιλαμβάνει την κωδικοποίηση και την κατηγοριοποίηση των νέων εξαρτημάτων, έτσι ώστε να ευρεθεί η οικογένεια που τα προσεγγίζει καλύτερα. Ο τυπικός (standard) προγραμματισμός των διεργασιών για την οικογένεια αυτή ανακτάται και τροποποιείται προκειμένου να καθορισθεί ο τεχνολογικός προγραμματισμός για το καινούργιο εξάρτημα (Σχ.4.2).

Τεχνολογία ομαδοποίησης (Group Technology)

Ο σκοπός της μεθόδου είναι να οργανώσει ένα μεγάλο πλήθος κατεργασμένων εξαρτημάτων, τα οποία αποτελούν ένα προϊόν. Όπως στην Βιολογία, όπου εκατομμύρια ζωντανοί οργανισμοί κατατάσσονται σε γένη και κατηγορίες, έτσι και στην παραγωγή, η τεχνολογία ομαδοποίησης είναι η μέθοδος στην οποία τα κατεργασμένα εξαρτήματα κατατάσσονται σε οικογένειες εξαρτημάτων. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα, ότι δίδει την δυνατότητα δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων, στην οποία είναι σχετικά εύκολη η διαχείριση και η ανάκτηση των πληροφοριών για ένα εξάρτημα, καθώς και η χρήση των πληροφοριών σε υπολογιστικούς αλγορίθμους.

Κωδικοποίηση και κατηγοριοποίηση (Coding and Classification)

Η κωδικοποίηση και η ομαδοποίηση των εξαρτημάτων γίνεται με την βοήθεια ενός *συστήματος κωδικοποίησης* (coding system). Τα συστήματα κωδικοποίησης (coding systems), που είναι αντικείμενο της τεχνολογίας ομαδοποίησης (group technology), περιλαμβάνουν την εφαρμογή ενός πίνακα, όπως στο Σχήμα 4.3 όπου παρουσιάζεται ένα σύστημα κωδικοποίησης τεσσάρων (4) ψηφίων. Το πρώτο ψηφίο αντιστοιχεί στο πρωτεύον σχήμα του εξαρτήματος,

		Digit1	Digit2	Digit3	Digit4
Rotational	0	Primary Shape $\frac{L}{D} \leq 0.05$	Secondary Shape No shape element	Auxiliary Shape No shape element	Initial Form Round Bar
	1	$0.05 < \frac{L}{D} < 3$	Steps with round cross sections	No shape element	No shape element Hexagonal Bar
	2	$\frac{L}{D} \leq 3$		With screw thread	With screw thread Square Bar
	3	$\frac{L}{D} \leq 2$ with deviation		With functional groove	With functional groove Sheet
	4	$\frac{L}{D} \leq 2$ with deviation	Rotational cross section		Drill with pattern Plate and Slab
	5	Flat	Rectangular cross section		Two or more from 2-4 Cast or forged
	Nonrotational	6	Long	Rectangular with chamfer	Stepped plane surface
7		Cubic	Hexagonal Bar	Curved surface	Premachined

Digit = Ψηφίο

Primary Shape = Αρχική μορφή

Secondary Shape = Δευτερεύουσα μορφή

Auxiliary Shape = Βοηθητικό Σχήμα

Initial Form = Αρχικό Σχήμα

Rotational = Περιστροφικό

Nonrotational = Μη περιστροφικό

Round Bar = Στρογγυλή Ράβδος

Hexagonal Bar = Εξαγωνική Ράβδος

Square Bar = Τετράγωνη Ράβδος

Sheet = Φύλλο (έλασμα)

Plate and Slab = Έλασμα και Πλάκα

Cast or Forged = Χυτό ή Σφυρήλατο

Welded assembly = Συγκολλημένη συναρμολόγηση

Premachined = Προεπεξεργασμένο

Curved surface = Καμπύλη επιφάνεια

Πίνακας 4.1 Σύστημα Κωδικοποίησης

το δεύτερο αντιστοιχεί στο δευτερεύον σχήμα, το τρίτο αφορά το βοηθητικό σχήμα και το τέταρτο αντιστοιχεί στην αρχική μορφή της πρώτης ύλης. Οι τιμές των τεσσάρων αυτών ψηφίων εξαρτώνται από τα ειδικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξαρτήματος και παριστάνονται με τρόπο συστηματικό στον πίνακα, όπως τούτο φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Η διαδικασία αυτή βοηθά στην κωδικοποίηση των εξαρτημάτων με βάση τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, τις ιδιότητές τους καθώς και άλλους παράγοντες όπως, π.χ. τα υλικά –ανάλογα βέβαια με το μέγεθος του συστήματος κωδικοποίησης. Τα συστήματα κωδι-

κοποίησης μπορούν να έχουν πολλά ψηφία –για παράδειγμα, μερικοί κωδικοί, που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο, έχουν μέχρι και 25 ψηφία.

Το σύστημα κωδικοποίησης στην μέθοδο VCAPP (Variant Computer Aided Process Planning), αποτελεί το πρώτο βήμα για τον καθορισμό μιας διαδικασίας σχηματισμού οικογένειας (*family formation procedure*), η οποία επιτρέπει την κατάταξη των εξαρτημάτων που ήδη υπάρχουν και των αντίστοιχων ΤΠΠ σε οικογένειες, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία τυπικών προγραμμάτων παραγωγής. Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία

Operation Code	Operation Plan
01 SAW01 02 LATHE 02	Cut to size Face end Center drill Drill Ream Bore Turn straight Turn groove Chamfer Cutoff Face Chamfer
03 GRIND 05 04 INSP 06	Grind Inspect dimensions Inspect finish
(a) Operation Plan Code (OP Code) and Operation Plan	
01 SAW01 02 LATHE 02 03 GRIND 05 04 INSP 06	
(b) OP Code Sequence	

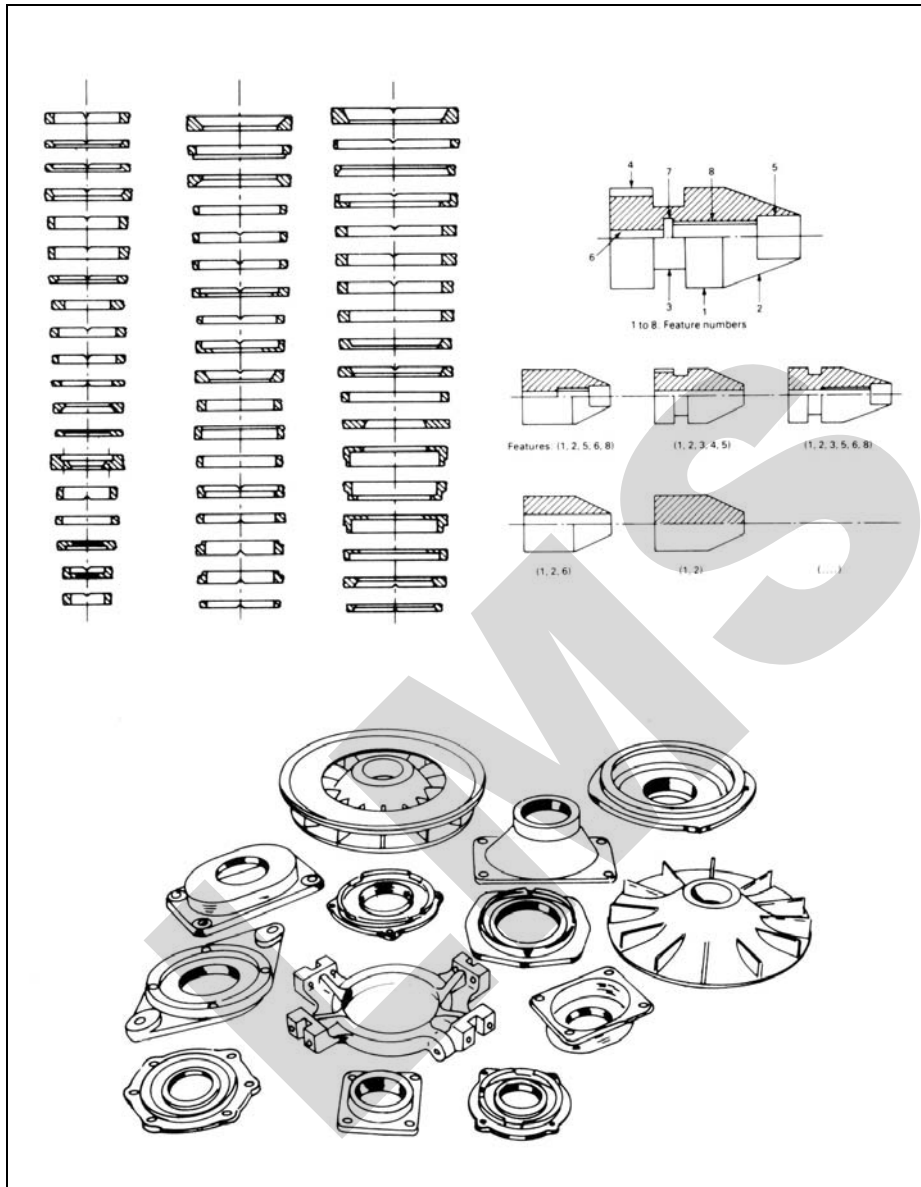
Saw = Κοπή
 Lathe = Τόρνευση
 Grind = Λείανση
 Operation Plan Code = Κωδικός Προγραμμάτων
 Διαργασιών
 Operation Plan = Πρόγραμμα Διαργασιών
 Cut to size = Κοπή στο σωστό μέγεθος
 Face end = Άκρο όψης
 Center drill = Αξονική (κεντρική) διάτρηση
 Drill = Διάτρηση
 Ream = Διάνηξη οπής

Bore = Οπή
 Turn straight = Μετωπικό τορνίρισμα
 Turn groove = Τορνίρισμα αλάκωσης
 Chamfer = Λοξοτομή
 Cutoff = Αποκοπή
 Inspect = Επιθεώρηση/Έλεγχος
 Dimensions = Διαστάσεις
 Inspect finish = Έλεγχος τελειώματος (π.χ. επιφανείας)
 Code Sequence = Αλληλουχία Κωδικών Προγράμματος Διαργασιών

Πίνακας 4.2 Προπαρασκευαστικά Σχέδια και κωδικοί Κατεργασιών (*Preparation Plans and Operation Code*)

σχηματισμού οικογένειας ακολουθεί μερικούς κανόνες. Αν οι κανόνες αυτοί είναι αυστηροί θα οδηγήσουν στην δημιουργία μεγάλου αριθμού σχετικά μικρών οικογενειών, ενώ αν οι κανόνες είναι χαλαροί θα δημιουργηθεί ένας μι-

κρός αριθμός σχετικά μεγάλων οικογενειών. Για κάθε εξάρτημα δημιουργείται ένα ΤΠΠ, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο από κώδικες καταγραφών (Πιν. 4.2).



Feature numbers = Αριθμοί διαμορφώσεων (χαρακτηριστικών)
 Features = Διαμορφώσεις (χαρακτηριστικά)

Σχήμα 4.3 Όμοια Εξαρτήματα

Ένας κώδικας κατεργασίας (operation code) είναι συνήθως μια αλφαριθμητική έκφραση η οποία περιγράφει τις λειτουργίες που γίνονται κατά την διάρκεια προετοιμασίας (set up) μιας μηχανής για την κατεργασία ενός εξαρτήματος. Ένα συγκεκριμένο σύνολο με τέτοιους κωδικούς παρέχει τον τεχνολογικό προγραμματισμό παραγωγής για το συγκεκριμένο εξάρτημα. Επομένως, ένα βήμα στην διαδικασία σχηματισμού της οικογένειας εξαρτημάτων είναι ο καθορισμός του προγραμματισμού των κατεργασιών [2] για κάθε εξάρτημα το οποίο θα τοποθετηθεί στην οικογένεια (Σχ. 4.3).

Component	Code	Process	OP code sequence		
A-112	1110	SAW01	LATHE02	GRIND05	INSP06
A-115	6514	MILL02	DRL01	INSP03	
A-120	2110	SAW01	LATHE02	GRIND05	INSP06
A-123	2010	SAW01	LATHE01	INSP06	
A-131	2110	SAW01	LATHE02	INSP06	
A-212	7605	MILL05	INSP03		
A-230	6604	MILL05	INSP03		
A-432	2120	SAW01	LATHE02	INSP06	
A-451	2130	SAW01	LATHE02	INSP06	
A-510	7654	MILL05	DRL01	GRIND06	INSP06
A-511					
A-511					
A-512					
A-550					
A-556					
B-105					
B-107					
B-108					
B-109					
B-115					
B-116					
B-117					
B-118					

Component = Εξάρτημα

Code = Κωδικός

Process = Διεργασία

Code sequence = Αλληλουχία Κωδικών Προγράμματος Διεργασιών

SAW = Κοπή

MILL = Φρεζάρισμα

LATHE = Τόρνευση

DRL = Διάτρηση

INSP = Έλεγχος

GRIND = Λείανση

Πίνακας 4.3 Προγραμματισμός Κατεργασιών των Εξαρτημάτων

Στον Πίνακα 4.3 έχει κωδικοποιηθεί ένα σύνολο εξαρτημάτων και οι αλληλουχίες των κωδικών κατεργασίας έχουν τοποθετηθεί δίπλα στους κωδικούς.

Το Σχήμα 4.4 δείχνει τις ίδιες πληροφορίες με διαφορετική μορφή. Έχει δημιουργηθεί ένας πίνακας εξαρτημάτων-κατεργασιών, οι στήλες του οποίου δείχνουν τα εξαρτήματα και οι γραμμές τους κωδικούς των κατεργασιών.

Αν ένα εξάρτημα απαιτεί μία ειδική κατεργασία, μαρκάρεται με ένα σύμβολο στην τομή της γραμμής και της στήλης του πίνακα.

Αν ο πίνακας είναι σχετικά μικρός, τα εξαρτήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν με την χρήση μη αυτοματοποιημένων μεθόδων. Αλλά καθώς ο α-

ριθμός των εξαρτημάτων και των διεργασιών αυξάνει, είναι απαραίτητη μια πιο συστηματική προσέγγιση του σχηματισμού των οικογενειών, η οποία μπορεί να ολοκληρωθεί με την χρησιμοποίηση αλγορίθμων. Με τον τρόπο αυτό ανακατατάσσουμε τον παραπάνω πίνακα έτσι ώστε τα εξαρτήματα να χωρισθούν σε *οικογένειες*, οι οποίες απαιτούν για την κατεργασία τους την ίδια ομάδα εξοπλισμού.

	A-112	A-115	A-120	A-123	A-131	A-212	A-230	A-432	A-451	A-510
SAW01	/		/	/	/			/	/	
LATHE01				/						
LATHE02	/		/		/			/	/	
DRL01		/								/
MILL02		/								
MILL05						/	/			/
GRIND05	/		/							
GRIND06										/
INSP03		/				/	/			
INSP06	/		/	/	/			/	/	/

SAW01 = Κοπή01

LATHE01 = Τόρνευση01

LATHE02 = Τόρνευση02

DRL01 = Διάτρηση01

MILL02 = Φρεζάρισμα02

MILL05 = Φρεζάρισμα05

GRIND05 = Λείανση05

GRIND06 = Λείανση06

INSP03 = Έλεγχος03

INSP06 = Έλεγχος06

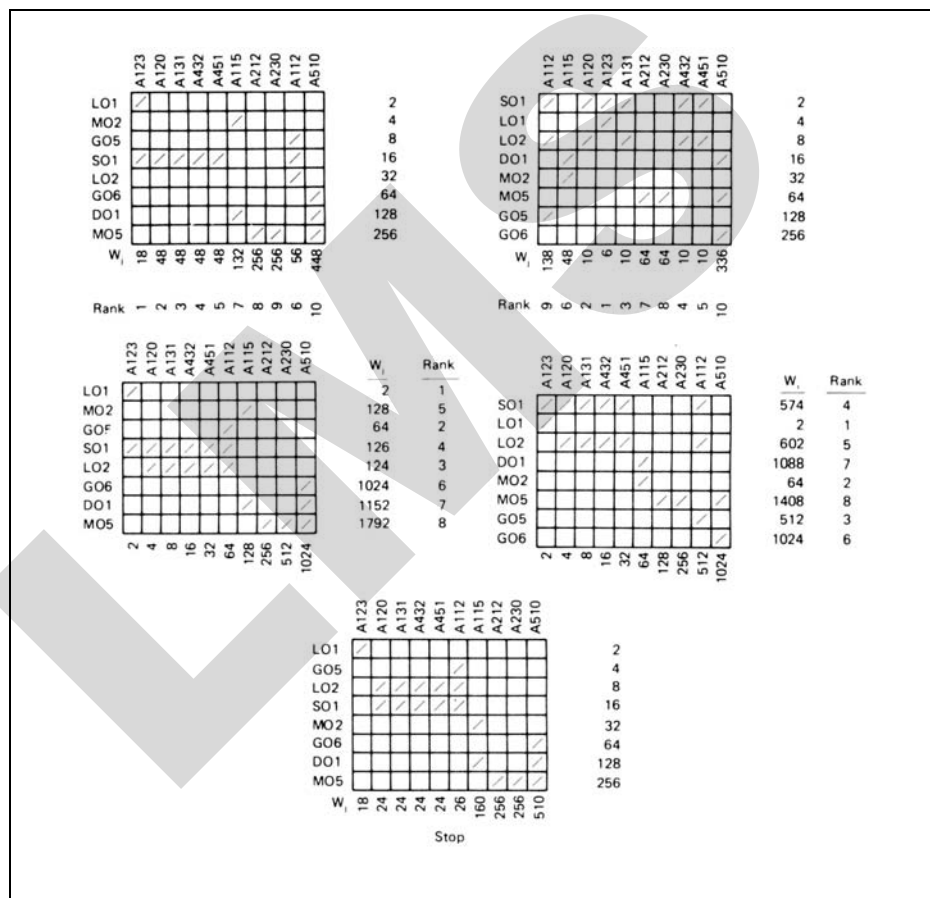
Σχήμα 4.4 Πίνακας Προγραμματισμού Διεργασιών

Ένας τέτοιος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε από την KING, χρησιμοποιεί απλούς μαθηματικούς χειρισμούς για να καθορίσει ένα συντελεστή βαρύτητας σε κάθε εξάρτημα και κάθε κατεργασία. Οι συντελεστές βαρύτητας των εξαρτημάτων προσδιορίζονται ως συνάρτηση του αριθμού των κατεργασιών που αντιστοιχούν σε αυτά, έτσι ώστε ένα εξάρτημα το οποίο χρειάζεται πολλές κατεργασίες για την παραγωγή του να έχει μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις κατεργασίες (ή γραμμές) του πίνακα. Πιο συγκεκριμένα, το βάρος κάθε στήλης ή κάθε εξαρτήματος υπολογίζεται με την αντικατάσταση μιας μονάδας για κάθε απαιτούμενη κατεργασία και πολ-

λαπλασιάζεται με 2^i , όπου i είναι ο αριθμός της γραμμής που αντιστοιχεί την κάθε κατεργασία. Για παράδειγμα, το βάρος του εξαρτήματος A112 στο Σχήμα 4.4 είναι:

$$w_1 = 2^1(1) + 2^3(1) + 2^7(1) + 2^{10}(1) = 2 + 8 + 128 + 1024 = 1162$$

Εφ' όσον έχει υπολογισθεί κάθε βάρος για κάθε εξάρτημα και κάθε κατεργασία, οι στήλες και οι γραμμές του πίνακα κατατάσσονται με βάση την τάξη των βαρών, κατά απόλυτη αύξουσα σειρά. Μετά τον τελικό μετασχηματισμό του πίνακα (Σχ. 4.5), οι οικογένειες των εξαρτημάτων προσδιορίζονται εύκολα. Το παράδειγμα αυτό δείχνει δύο οικογένειες, από τις οποίες η πρώτη αποτελείται από τα εξαρτήματα A123, A120, A131, A432, A451, και A112 που απαιτεί διεργασίες όπως τόννο 01, λείανση 05, τόννο 02 και πρίονι 01, ενώ η



Rank= Κατάταξη

Σχήμα 4.5 Διαδικασία Σχηματισμού Οικογένειας Εξαρτημάτων

δεύτερη περιλαμβάνει τα εξαρτήματα A115, A212, A230 και A510 που απαιτεί διεργασίες όπως φρεζάρισμα 02, λείανση 06, τρυπάνι 01 και φρεζάρισμα 05. Τα βήματα ενός αλγόριθμου ταξινόμησης είναι:

Βήμα 1ο Για A_j υπολόγισε το ολικό βάρος της στήλης w_j :

$$w_j = \sum_{A^i} 2^i M_{ij}$$

Βήμα 2ο Αν το w_j είναι κατά αύξουσα σειρά, πήγαινε στο βήμα 3 ή αλλιώς αναδιάταξε τις στήλες για να γίνει το w_j κατά αύξουσα σειρά.

Βήμα 3ο Για το A_i υπολόγισε το συνολικό βάρος της γραμμής w_i :

$$w_i = \sum_{A^j} 2^j M_{ij}$$

Βήμα 4ο Αν το w_j είναι κατά αύξουσα σειρά, τέλος. Αλλιώς, αναδιάταξε τις στήλες για να γίνει το w_i κατά αύξουσα σειρά. Πήγαινε στο βήμα 1.

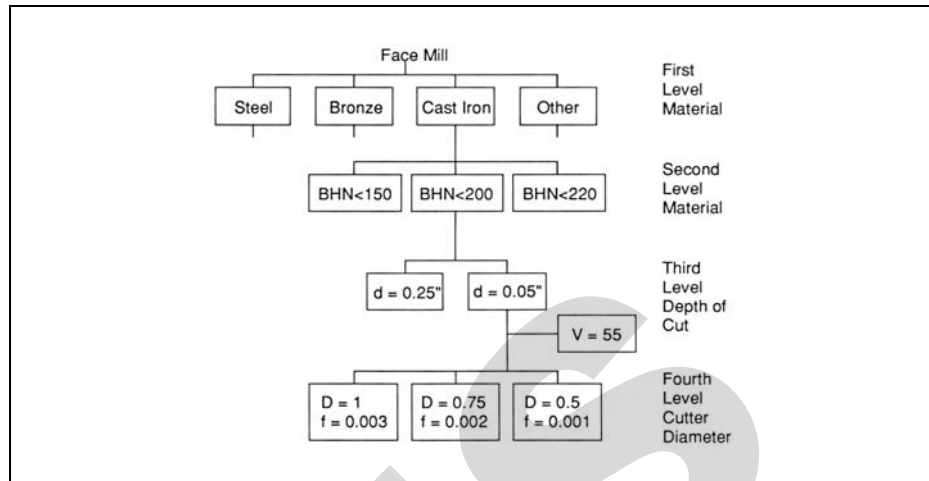
Ένας ΤΠΠ που σχετίζεται με τις δύο αυτές οικογένειες θα περιέχει μια τυπική αλληλουχία κατεργασιών και κωδικών κατεργασίας. Ο προγραμματισμός αυτός ανασύρεται κάθε φορά που ένα εισερχόμενο εξάρτημα αναγνωρίζεται με βάση τον κωδικό του, εφ' όσον ανήκει σε κάποια από τις δύο οικογένειες. Στη συνέχεια, ο προγραμματισμός αυτός τροποποιείται μέχρι να οριστικοποιηθεί ο τελικός προγραμματισμός για το νέο εξάρτημα.

Συχνά πρέπει να καθορίζονται οι διάφορες παράμετροι που διέπουν μια συγκεκριμένη κατεργασία. Το Σχήμα 4.6 δείχνει πως οι μεταβλητές της διεργασίας μετωπικού φρεζαρίσματος (face milling process) μπορούν να καθορισθούν με ιεραρχικό τρόπο. Στο πρώτο επίπεδο, παίρνεται μια απόφαση σχετικά με τον τύπο του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί αν αυτό δεν έχει ήδη καθορισθεί από τον σχεδιαστή. Στο δεύτερο επίπεδο, καθορίζονται οι φυσικές ιδιότητες του υλικού (για παράδειγμα, η σκληρότητα). Στο τρίτο επίπεδο επιλέγεται το βάθος κοπής, η διάμετρος του εργαλείου και η ταχύτητα κοπής [1].

Η σύγχρονη τάση που επικρατεί για την παραγωγή μεγάλης ποικιλίας προϊόντων σε μικρότερες παρτίδες, οδηγεί σε οργάνωση τύπου κυψέλης (cell type shop organization) η οποία βασίζεται ουσιαστικά στην τεχνολογία ομαδοποίησης (group technology).

Μερικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας ομαδοποίησης είναι:

- Η διευκόλυνση της αποθήκευσης και ανάκτησης των σχεδίων που ήδη υπάρχουν, ελαττώνοντας έτσι την συνολική εργασία. Προωθεί επίσης την τυποποίηση των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών οδηγώντας στην τυποποίηση των εργαλειομηχανών και των ιδιοσυσκευών συγκράτησης.



Face Mill = Μετωπικό Φρεζάρισμα
 Steel = Χάλυβας
 Bronze = Μπρούντζος
 Cast iron = Χυτοσίδηρος
 Other = Άλλα

First Level Material = Πρώτο Επίπεδο-Υλικό
 Second Level Material = Δεύτερο Επίπεδο-Υλικό
 Third Level Depth of Cut = Τρίτο Επίπεδο-Βάθος Κοπής
 Fourth Level Cutter Diameter = Τέταρτο Επίπεδο-Διάμετρος Κοπτικού

Σχήμα 4.6 Διαδικασία Επιλογής των Παραμέτρων των Διεργασιών

- Ο χειρισμός των υλικών γίνεται περισσότερο αποτελεσματικός μέσω της οργάνωσης τύπου κυψέλης (Cell).
- Μείωση του αριθμού των εργασιών που είναι σε εξέλιξη στην παραγωγική διαδικασία, σαν αποτέλεσμα της μείωσης των χρόνων προετοιμασίας των μηχανών λόγω αλλαγών και του χειρισμού των υλικών.

4.2.4 Η μέθοδος δημιουργίας νέων Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (Generative Approach)

Η μέθοδος δημιουργίας νέων Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (Generative process planning) *συνθέτει* τις πληροφορίες του τρόπου παραγωγής, συγκεκριμένα αυτές που αναφέρονται στις ικανότητες των διαφορετικών παραγωγικών διεργασιών και δημιουργεί προγράμματα για νέα εξαρτήματα.

LMS

Ένα ιδανικό σύστημα δημιουργίας νέων Τεχνολογικών Προγραμμάτων Παραγωγής (generative process planning system) λαμβάνει πληροφορίες που αφορούν τον σχεδιασμό του εξαρτήματος και στην συνέχεια καθορίζει τον τεχνολογικό προγραμματισμό –περιλαμβάνοντας τις διεργασίες που πρόκειται να πραγματοποιηθούν και την αλληλουχία τους, χωρίς ανθρώπινη επέμβαση. Σε αντίθεση με την μέθοδο της παραλλαγής (υπαρχόντων) ΤΠΠ (variant approach), η οποία χρησιμοποιεί τυπικά προγράμματα διεργασιών ομαδοποιημένων οικογενειών (standardised process grouped family plans), η δημιουργία νέων ΤΠΠ βασίζεται στον προσδιορισμό της *λογικής του προγραμματισμού διεργασιών (process planning logic)* χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως:

- Δέντρα αποφάσεων
- Πίνακες αποφάσεων
- Τεχνητή νοημοσύνη
- Αξιοματική προσέγγιση

Τα συστήματα του τύπου αυτού πρέπει να είναι γρήγορα και συνεπή ως προς την δημιουργία των τεχνολογικών προγραμμάτων. Πρέπει να δημιουργούν προγράμματα για τελειώς καινούργια εξαρτήματα σε αντίθεση με τα συστήματα παραλλαγής, τα οποία βασίζονται σε προγράμματα εξαρτημάτων που ήδη υπάρχουν. Ακόμη πρέπει να επιτρέπουν την ολοκλήρωση της δραστηριότητας προγραμματισμού με την σχεδίαση του εξαρτήματος και την δημιουργία προγραμμάτων για αριθμητικά ελεγχόμενες εργαλειομηχανές.

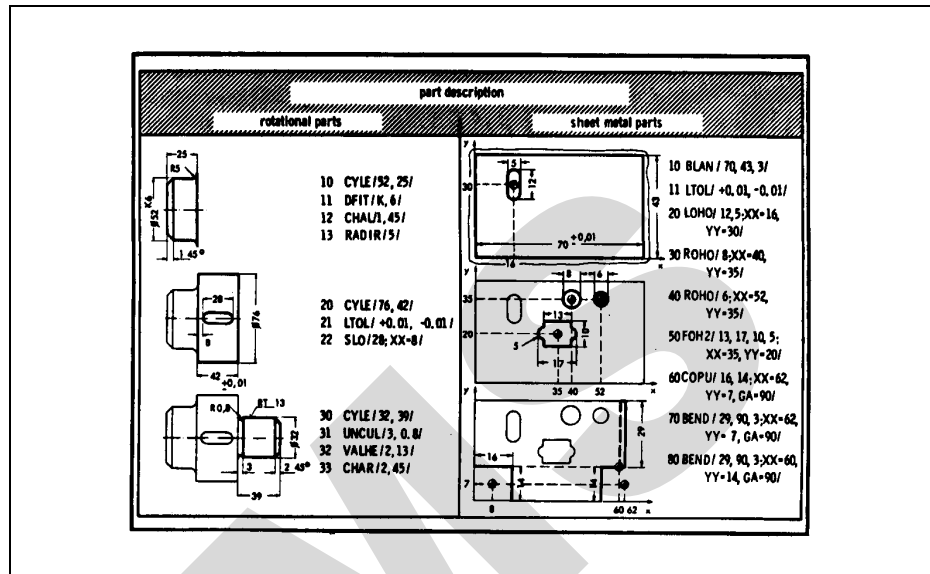
Η μέθοδος δημιουργίας νέων ΤΠΠ προσπαθεί να «μιμηθεί» την σκέψη του υπεύθυνου του προγραμματισμού διεργασιών, εφαρμόζοντας την λογική του στην λήψη αποφάσεων. Υπάρχουν τρία θέματα, που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη κατά την δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος:

- *Ορισμός του εξαρτήματος (Component definition)* ή σχεδιασμός του εξαρτήματος με απόλυτα ακριβή τρόπο, ώστε να γίνεται κατανοητός από το σύστημα ΤΠΠ.
- Αναγνώριση (Identification), καταγραφή (capture) και αναπαράσταση (representation) της γνώσης του μηχανικού και των αιτιών που βρίσκονται πίσω από τις διάφορες αποφάσεις, που παίρνονται για την επιλογή των κατεργασιών και την σειρά εφαρμογής τους.
- *Ο προσδιορισμός του εξαρτήματος και η λογική του προγραμματιστή* πρέπει να είναι συμβατά μέσα στο σύστημα.

Τα περισσότερα συστήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν λογική αποφάσεων, που είναι "χτισμένη" μέσα σ' αυτά (built-in decision logic) και η οποία ελέγχει τις απαιτούμενες συνθήκες για κάθε αντικείμενο. Μερικά από αυτά, μάλιστα, έχουν τυποποιημένα υποπρογράμματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν

συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που συνδυάζονται στον τελικό τεχνολογικό προγραμματισμό.

Γενικά, η μέθοδος δημιουργίας νέων ΤΠΠ μπορεί να εφαρμοσθεί με δύο τρόπους. Είτε με "φορά προς τα εμπρός" (*forward fashion*), όπου ο προγραμματισμός διεργασιών ξεκινάει από την πρώτη ύλη και καταλήγει στην κατασκευή του εξαρτήματος διαμέσου των καταλλήλων διεργασιών. Είτε με "φορά προς τα πίσω" (*backwards*), ξεκινώντας, δηλαδή, από την τελική μορφή του εξαρτήματος και φθάνοντας στο αρχικό σχήμα της πρώτης ύλης.



Part description = Περιγραφή εξαρτήματος
Rotational parts = Εξαρτήματα εκ περιστροφής

Sheet metal parts = εξαρτήματα από μεταλλικό έλασμα

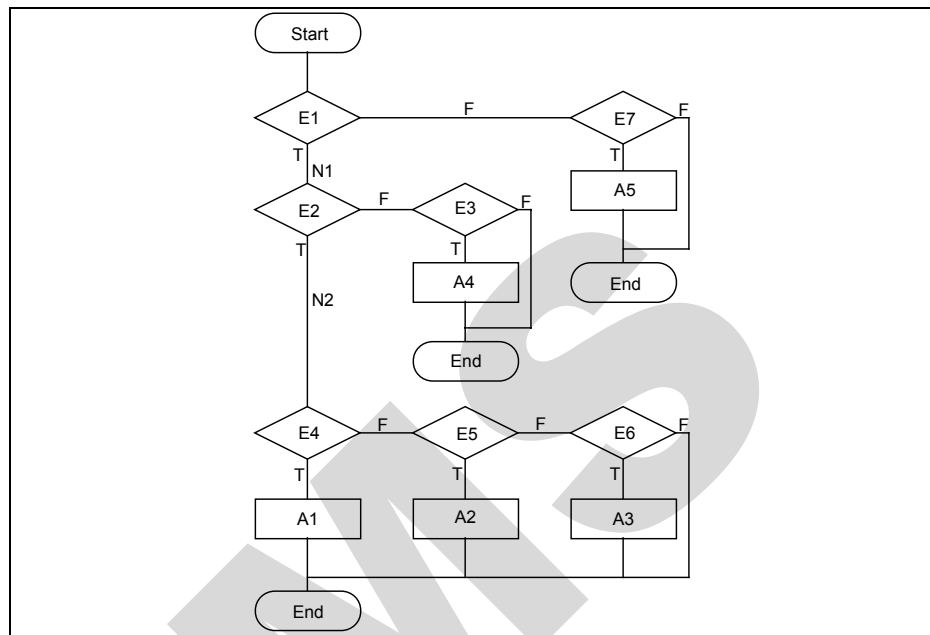
Σχήμα 4.7 Περιγραφική Γλώσσα Τεχνολογικού Προγραμματισμού

Ένας τρόπος προσέγγισης του καθορισμού των εξαρτημάτων είναι η χρησιμοποίηση της τεχνολογίας των ομάδων (*group technology*), όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης είναι η περιγραφή του εξαρτήματος (Σχ. 4.7), χρησιμοποιώντας περιγραφικές γλώσσες (*descriptive language*). Αυτή η προσέγγιση είναι περισσότερο γενική και μπορεί να εφαρμοσθεί για μια μεγάλη ποικιλία εξαρτημάτων. Μια γενική γλώσσα μπορεί να περιγράψει έναν μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων, ωστόσο είναι απαραίτητη μεγαλύτερη προσπάθεια για την περιγραφή κάθε εξαρτήματος. Μια λιγότερο γενική γλώσσα αφ' ενός, θα περιόριζε το πλήθος των εξαρτημάτων που θα μπορούσε να περιγράψει, αφ' ετέρου, όμως, η εφαρμογή της θα ήτο ευκολότερη [1].

Λογική του Τεχνολογικού Προγραμματισμού (Process Planning logic)

τους με κόμβους (Σχ. 4.8), οι οποίοι περιέχουν λογικές λειτουργίες όπως "και", "ή". Αν μια διακλάδωση είναι αληθής, τότε η πορεία κατά μήκος της είναι επιτρεπτή έως ότου συναντήσουμε τον επόμενο κόμβο όπου προσδιορίζεται κάποια άλλη λειτουργία ή εκτελείται κάποια άλλη διαδικασία [1].

Ένα δέντρο αποφάσεων (Σχ. 4.9) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάπτυξη ενός διαγράμματος ροής (Σχ. 4.10) και κώδικα προγραμματισμού, που θα χρησιμοποιηθεί στο ΤΠΠΠ.



Start = Αρχή

End = Τέλος

Σχήμα 4.10 Διάγραμμα Ροής Διαδικασίας Διάνοιξης οπής

Πίνακες αποφάσεων (Decision Tables)

Οι πίνακες αποφάσεων (Decision tables) χρησιμοποιούνται για να οργανώσουν τις συνθήκες, τις δραστηριότητες και τους κανόνες αποφάσεων σε πινακοποιημένη μορφή. Οι συνθήκες και οι δραστηριότητες τοποθετούνται στις γραμμές, ενώ οι κανόνες στις στήλες. Το επάνω μέρος του πίνακα περιλαμβάνει τις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιηθούν, ώστε οι δραστηριότητες, που αντιπροσωπεύονται στο κατώτερο μέρος του πίνακα, να πραγματοποιηθούν. Όταν όλες οι συνθήκες ενός πίνακα αποφάσεων ικανοποιηθούν, τότε οριστικοποιείται η απόφαση [1]. Το περιεχόμενο των πληροφοριών και για τις δύο προσεγγίσεις είναι το ίδιο, παρ' όλο που οι πίνακες αποφάσεων έχουν τέτοια δομή, η οποία επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή με νέες εγγραφές σε πινακο-

ποιημενη μορφή.

Τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence-AI)
Έμπειρα συστήματα (Expert Systems)

Οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης όπως η τυπική λογική (formal logic) –για την περιγραφή των εξαρτημάτων– και τα έμπειρα συστήματα –για την κωδικοποίηση της επεξεργασίας των δεδομένων από τον άνθρωπο– εφαρμόζονται, επίσης, σε προβλήματα τεχνολογικού προγραμματισμού. Ένα έμπειρο σύστημα ορίζεται ως το εργαλείο εκείνο, το οποίο έχει την ικανότητα να καταλαβαίνει το ειδικό πρόβλημα και να χρησιμοποιεί την υπάρχουσα γνώση έξυπνα, ώστε να προτείνει εναλλακτικούς τρόπους δράσης. Ο ορισμός ενός εξαρτήματος μπορεί να γίνει με μεθόδους, που χρησιμοποιούνται στη «επεξηγηματική» γνώση (declarative knowledge) ή πιο συγκεκριμένα με υποδηλωτικό λογισμό πρώτης τάξης (*first order predicate calculus -FOPC*). Η γνώση βάσει της οποίας επιλέγονται διάφορες διεργασίες είναι διαδικαστική και ως εκ τούτου για την κωδικοποίηση και χρήση της χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα (σε όρους τεχνητής νοημοσύνης) *παραγωγικά συστήματα*, που αποτελούνται από κανόνες της μορφής "εάν-τότε" (if-then).

Η επεξηγηματική γνώση (declarative knowledge), η οποία χρησιμοποιεί υποδηλωτικό λογισμό πρώτης τάξης (FOPC), αναπαρίσταται από μια καλοσχηματισμένη μέθοδο (Well-formed formula, WFF), που είναι ατομική και περιλαμβάνει ένα σύμβολο δήλωσης (predicate symbol), ένα σύμβολο λειτουργίας (function symbol) και μια σταθερά –η οποία μπορεί να είναι ψευδής ή αληθής. Για παράδειγμα, η αναπαράσταση μιας οπής θα μπορούσε να γραφεί ως "βάθος οπής (x), 2,5", όπου το βάθος είναι σύμβολο δήλωσης, η οπή είναι σύμβολο λειτουργίας και το 2.5 είναι η σταθερά. Με την διαδικαστική γνώση (procedural knowledge) μπορούν να κατασκευασθούν κανόνες, οι οποίοι θα συσχετίζουν τις διεργασίες με συγκεκριμένα γεωμετρικά ή άλλα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος. Με έναν κατάλληλο μηχανισμό συμπερασμάτων (inference engine) μπορούν να προσδιορισθούν ένα σύνολο διαδικασιών, όπως επίσης και η αλληλουχία τους για ένα συγκεκριμένο εξάρτημα.

Αξιοματική προσέγγιση (Axiomatic Approach)

Η μέθοδος αξιωματικού σχεδιασμού (axiomatic design) αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Manufacturing and Productivity στο MIT [3]. Ο σκοπός της είναι να παρέχει ένα λογικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό προϊόντων και τον προγραμματισμό των διεργασιών. Ένα σύνολο επιθυμητών χαρακτηριστικών του σχεδίου, που είναι γνωστό σαν *λειτουργικές απαιτήσεις* (*functional requirements, FRs*), πρέπει να προσδιορισθεί, προκειμένου να καθορισθεί η *περιοχή σχεδίασης*. Επίσης, ένα σύνολο *σχεδιαστικών παραμέτρων* (*design parameters, DPs*) –που μπορεί να ποικίλουν και που περιορίζονται από την φύση του συστήματος– πρέπει να προσδιορισθούν, ώστε να καθορισθεί η *περιοχή του συστήματος* (*system range*). Μια επιτυχημένη λύση είναι αυτή που μπορεί να συμβιβάσει τις

λειτουργικές απαιτήσεις (FRs) με τις σχεδιαστικές παραμέτρους (DPs) και μπορεί να θεωρηθεί σαν αντιστοίχιση των λειτουργικών απαιτήσεων από τον λειτουργικό χώρο (*functional domain*) με τις σχεδιαστικές παραμέτρους από τον φυσικό χώρο (*physical domain*). Αυτός ο τρόπος σχεδιασμού χρησιμοποιείται για να καθορίσει και να απλοποιήσει την σχέση μεταξύ των λειτουργικών απαιτήσεων (FRs) και των σχεδιαστικών παραμέτρων (DPs) μέσω ενός συνόλου αξιωμάτων. Ολόκληρο το πλαίσιο στηρίζεται σε δύο αξιώματα:

Αξίωμα 1ο *Το αξίωμα της ανεξαρτησίας (Independence Axiom)*. Διατήρηση της ανεξαρτησίας των λειτουργικών απαιτήσεων.

Αξίωμα 2ο *Το αξίωμα της πληροφορίας (Information Axiom)*. Ελαχιστοποίηση του περιεχόμενου της πληροφορίας.

Η εφαρμογή του αξιωματικού σχεδιασμού (axiomatic design) στον προγραμματισμό των διαδικασιών κατεργασίας απαιτεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Δημιουργία καταλόγου με όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού (ή παραγωγής) που πρόκειται να εκτιμηθούν.
2. Διαχωρισμός των προς παραγωγή επιφανειών σε ομάδες επιφανειών, που η κάθε μια μπορεί να κατεργασθεί από μια μόνο μηχανή.
3. Δημιουργία καταλόγου με τις υποψήφιες μηχανές, που αντιστοιχούν σε κάθε ομάδα επιφανειών.
4. Εκτίμηση όλων των εναλλακτικών παραμέτρων των μηχανών και της παραγωγής.
5. Υπολογισμός του συνολικού περιεχομένου της πληροφορίας και επιλογή του καλύτερου συνδυασμού μηχανών, με βάση το περιεχόμενο της πληροφορίας αυτής.

Οι λειτουργικές απαιτήσεις (FRs) σε μια διεργασία αφαίρεσης υλικού μπορεί να είναι η τραχύτητα της επιφάνειας, η ακρίβεια των διαστάσεων και το κόστος. Πρώτα πρέπει να προσδιορίσουμε αν οι λειτουργικές απαιτήσεις (FRs) ικανοποιούν το πρώτο αξίωμα, με την προϋπόθεση ότι είναι πιθανοθεωρητικά ανεξάρτητες. Στην συνέχεια πρέπει να δούμε αν ικανοποιείται το δεύτερο αξίωμα. Η πληροφορία για την τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να προσδιορισθεί πειραματικά, μετρώντας την τραχύτητα επιφάνειας όπως αυτή προκύπτει από κάθε μηχανή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται το άνω και κάτω όριο τραχύτητας για το σύστημα. Η πληροφορία, που αφορά την ακρίβεια των διαστάσεων, μπορεί να καθορισθεί με παρόμοιο τρόπο, ώστε να τεθούν τα αντίστοιχα όρια. Το χαμηλότερο και το υψηλότερο όριο του εύρους του συστήματος για το κόστος υπολογίζεται για κάθε μηχανή, αν πολλαπλασιάσουμε

τους μέγιστους και ελάχιστους χρόνους παραγωγής με το κόστος ανά μονάδα χρόνου. Εφ' όσον υπολογισθεί το περιεχόμενο της πληροφορίας για κάθε λειτουργική απαίτηση (FR), ομαδοποιούνται σε ομάδες επιφανειών οι επιφάνειες, που πρόκειται να καταργασθούν σε μια συγκεκριμένη μηχανή. Τότε υπολογίζεται το περιεχόμενο της πληροφορίας για κάθε ομάδα επιφανειών. Για παρά-

	Combination			
	1	2	3	4
Surface Group 1				
Lathe	L1	L2	L3	L4
Order	1	2	5	24
Information	1.36	1.39	1.94	4.27
Surface Group 2				
Cylindrical Grinder	G1	G2	G3	G3
Order	1	2	3	3
Information	0.58	2.19	3.73	3.73
Total				
Order	1	21	49	72
Information	1.94	3.58	5.67	8.00

Combination = Συνδυασμός
Surface Group 1 = Ομάδα επιφανειών 1
Lathe = Τόρνος
Order = Παραγγελία

Information = Πληροφορία
Surface Group 2 = Ομάδα επιφανειών 2
Cylindrical Grinder = Τριβείο
Total = Σύνολο

Πίνακας 4.4 *Απαιτούμενη Πληροφορία για τη Δημιουργία Ομάδων Επιφανειών σε Διάφορες Μηχανές*

δειγμα, ας υποθέσουμε, ότι ένα συγκεκριμένο εξάρτημα έχει δύο τύπους επιφανειών, οι οποίες απαιτούν δύο λειτουργίες: μια σε τόρνο και μια άλλη σε κυλινδρική λειαντική μηχανή. Το περιεχόμενο της πληροφορίας, που αναφέρθηκε προηγουμένως, υπολογίζεται για κάθε μηχανή και καταγράφεται κατά σειρά τάξης μεγέθους ξεκινώντας από την αριστερή στήλη (Πίν. 4.4). Κάθε στήλη παριστάνει ένα πιθανό «μονοπάτι» (path) δράσης, από τα οποία το καλύτερο είναι εκείνο, που ικανοποιεί πληρέστερα τα αξιώματα.

Η στήλη 1 του πίνακα 4.4 έχει το μικρότερο συνολικό περιεχόμενο πληροφορίας και πρέπει να επιλεγεί σαν η καλύτερη λύση. Για την επαλήθευση της μεθόδου έγινε ένα πείραμα προσομοίωσης ενός αναλυτικού προβλήματος [3]. Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Οι πραγματικοί χρόνοι καταργασίας για τους συνδυασμούς 1 και 2 είχαν περίπου την ίδια διάρκεια, αν και οι αντίστοιχοι χρόνοι για τους συνδυασμούς 3 και 4 ήταν πολύ μεγαλύτεροι, όπως προβλέπεται από την αναλυτική μέθοδο.

	Combination			
	1	2	3	4
Surface Group 1 Lathe Measured Time	L1 1,453	L2 1,405	L3 1,665	L4 2,487
Surface Group 2 Cylindrical Grinder Measured Time	G1 1,158	G2 1,205	G3 1,433	G3 1,481
Total Time	2,661	2,610	3,098	3,948

Combination = Συνδυασμός
Surface Group 1 = Ομάδα επιφανειών 1
Lathe = Τόρνος
Surface Group 2 = Ομάδα επιφανειών 2

Cylindrical Grinder = Τριβείο
Measured Time = Μετρηθείς χρόνος
Total Time = Συνολικός χρόνος

Πίνακας 4.5 Συνολικός Μετρούμενος Χρόνος Κατεργασίας σε Δευτερόλεπτα

Αναγνώριση χαρακτηριστικών (Feature Recognition)

Είναι επιθυμητή η σχεδίαση μιας μεθοδολογίας, που να μετατρέπει το σχέδιο ενός εξαρτήματος σε ένα σύνολο ειδικών δεδομένων κατεργασίας με *συνέπεια* (*consistency*) και χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Δύο βήματα σχετίζονται με την τεχνική αυτή: η «αποσύνθεση» του εξαρτήματος (part decomposition) και η αναγνώριση των χαρακτηριστικών του (feature recognition).

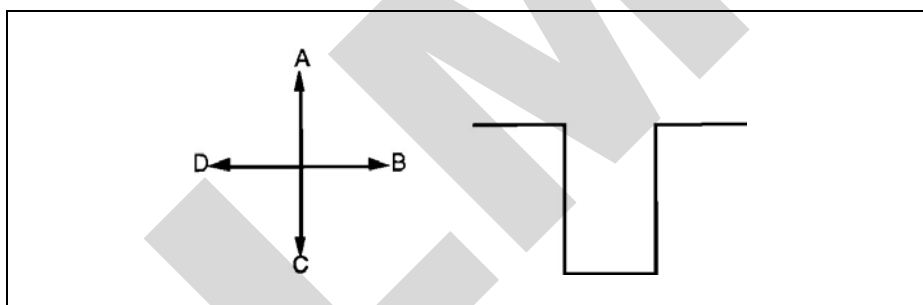
Για την εφαρμογή ενός έμπειρου συστήματος απαιτείται η δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου του εξαρτήματος, που να περιέχει όλες τις πληροφορίες για την γεωμετρία του σε αναλυτική μορφή. Τα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος πρέπει να διαχωρισθούν με βάση τον συνδυασμό των γεωμετρικών σχημάτων (επίπεδα, καμπύλες, επιφάνειες ή κύκλοι, γραμμές και τόξα, όπως αυτά φαίνονται από διαφορετικές όψεις) που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του. Εφ' όσον βρεθεί ένα σύνολο γεωμετρικών σχημάτων το οποίο προσδιορίζει το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, τότε το χαρακτηριστικό αφαιρείται από το σχέδιο (αποσύνθεση χαρακτηριστικών) και κατατάσσεται σε μια ομάδα ανάλογα με τον βαθμό σημαντικότητας και ομοιότητας του χαρακτηριστικού (αναγνώριση χαρακτηριστικού).

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν γίνει για την εφαρμογή τέτοιου είδους τεχνικών όπως:

- Συντακτική αναγνώριση μοντέλου
- Διαγράμματα μετάβασης κατάστασης και Automata
- Προσέγγιση αποσύνθεσης
- Λογική προσέγγιση
- Προσέγγιση με βάση γραφήματα

Αναγνώριση Συντακτικού Μοντέλου (Syntactic Pattern Recognition)

Στην αναγνώριση συντακτικού μοντέλου, μια εικόνα αποσυντίθεται σε "πρωτόγονα" εξαρτήματα, τα οποία παριστάνονται με γράμματα. Έτσι το μοντέλο μπορεί να αναπαρασταθεί από μια σειρά ή ένα σύνολο γραμμάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και την κατάταξη των εικόνων σε συγκεκριμένες κατηγορίες, όπως ακριβώς γίνεται και στην «επεξεργασία τυπικής γλώσσας» (formal language processing) όπου μια πρόταση αναλύεται για να δει κανείς αν είναι γραμματικά σωστή ή όχι. Αν η σύνταξη μιας γλώσσας εικόνων συμφωνεί με την γραμματική σύνταξη, τότε η εικόνα κατατάσσεται στην αντίστοιχη κατηγορία μοντέλου [4]. Έτσι χρησιμοποιώντας αυτά τα αρχέτυπα, μια απλή γεωμετρία μπορεί να μετατραπεί σε μια σειρά γραμμάτων. Για παράδειγμα το περίγραμμα της οπής του Σχήματος 4.11 μπορεί να αναπαρασταθεί με την γραμματοσειρά "BBCCCBBAABB".

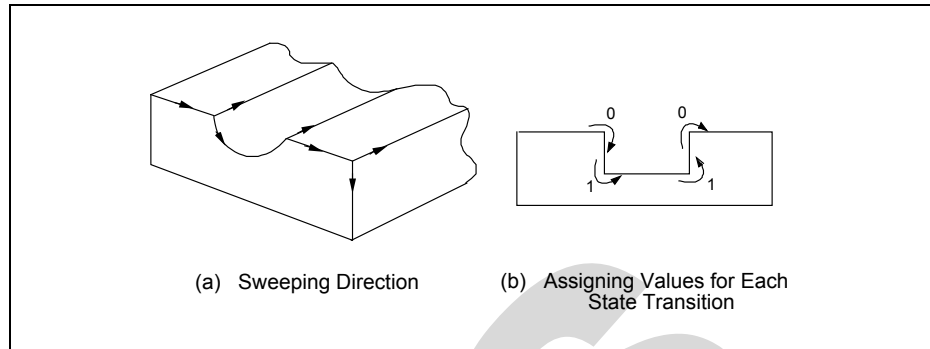


Σχήμα 4.11 Αρχέγονα Πρότυπα και Απλός Σχεδιασμός Οπής

Διάγραμμα μετάβασης μιας κατάστασης (State Transition Diagram)

Σ' αυτό το σύστημα, η γεωμετρία του εξαρτήματος περιγράφεται από σαρωτικές (sweeping) λειτουργίες και χρησιμοποιεί διαδικασίες *AND/OR* για την ένωση των σαρωτικών ποσοτήτων. Τα συστήματα, που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική, είναι τα CIMS/PRO και CIMS/DEC [5]. Εδώ η παραγόμενη επιφάνεια περιγράφεται από μια σειρά "αρχέγονων" προτύπων, αλλά αντί της

γραμματικής, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις με τα γειτονικά αρχέγονα πρότυπα. Η "κυρτή" γειτνίαση ορίζεται με το "0" ενώ η "κοίλη" με το "1". Θεωρείστε το αυλάκι του Σχήματος 4.12 (a). Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της σάρωσης και σε κάθε μετάβαση από το ένα σχήμα στο άλλο ορίζεται το "0" ή το "1". Το απλό αυλάκι του Σχήματος 4.12 (b) αντιπροσωπεύεται από τις αριθμοσειρές "0 1 1 0" [4].

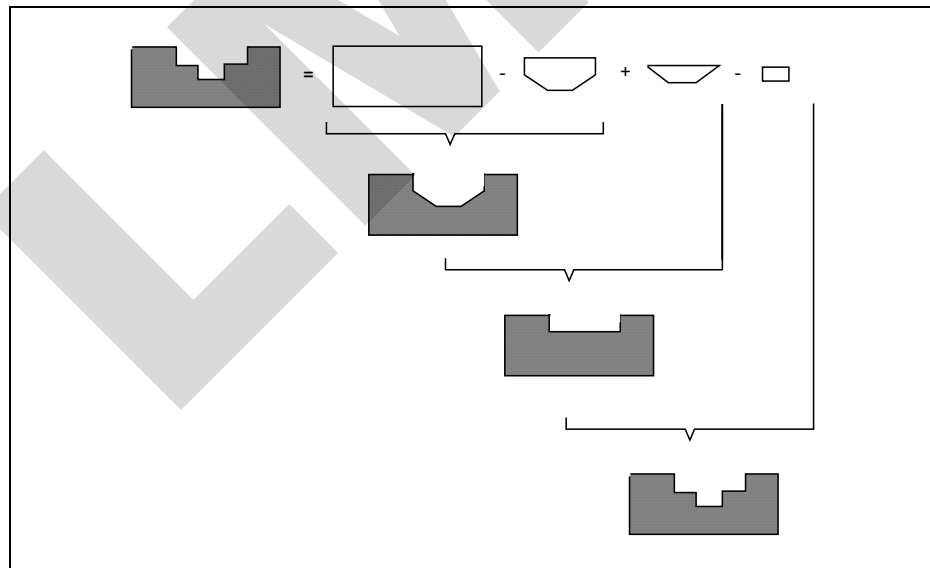


Sweeping Direction = Κατεύθυνση Σάρωσης
Assigning Values for Each State Transition =

Ανάθεση τιμής σε κάθε μετάβαση

Σχήμα 4.12 Χαρακτηριστικά της Μεθόδου Μετάβασης

Η προσέγγιση αποσύνθεσης (Decomposition Approach)



Σχήμα 4.13 Αποσύνθεση σε Μηχανουργικούς Όρους

Όπως φαίνεται και από το όνομα της μεθόδου, κάθε σχέδιο διασπάται σε μικρότερα (Σχ. 4.13) και πιο απλά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία της αρχικής γεωμετρίας μέσω απλών μαθηματικών πράξεων, όπως η πρόσθεση και η αφαίρεση. Έτσι γίνεται προσπάθεια αναγνώρισης και κατάταξης κάθε μικρού όγκου με βάση τα χαρακτηριστικά του. Δυστυχώς, όμως, μέχρι τώρα, καμμία μέθοδος αυτού του τύπου δεν μπορεί να εγγραφεί για την παραγωγή χρήσιμων κατασκευαστικών ή σχεδιαστικών χαρακτηριστικών. Το βασικό πρόβλημα με την μέθοδο αυτή είναι, ότι η λύση δεν είναι μοναδική. Το ίδιο πρόβλημα έχει και η μετατροπή της γεωμετρίας στις μεθόδους συνοριακής αναπαράστασης.

Η λογική προσέγγιση

Στην μέθοδο αυτή, οι λογικοί κανόνες εφαρμόζονται στην τοπολογική δομή των εξαρτημάτων για την εξαγωγή και αναγνώριση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Η τοπολογική δομή προκύπτει από την συνοριακή αναπαράσταση του σχεδίου. Οι λογικοί κανόνες, που χρησιμοποιούνται, είναι: ΕΑΝ/TΟΤΕ (IF/THEN) και ΚΑΙ/Η (AND/OR). Για παράδειγμα:

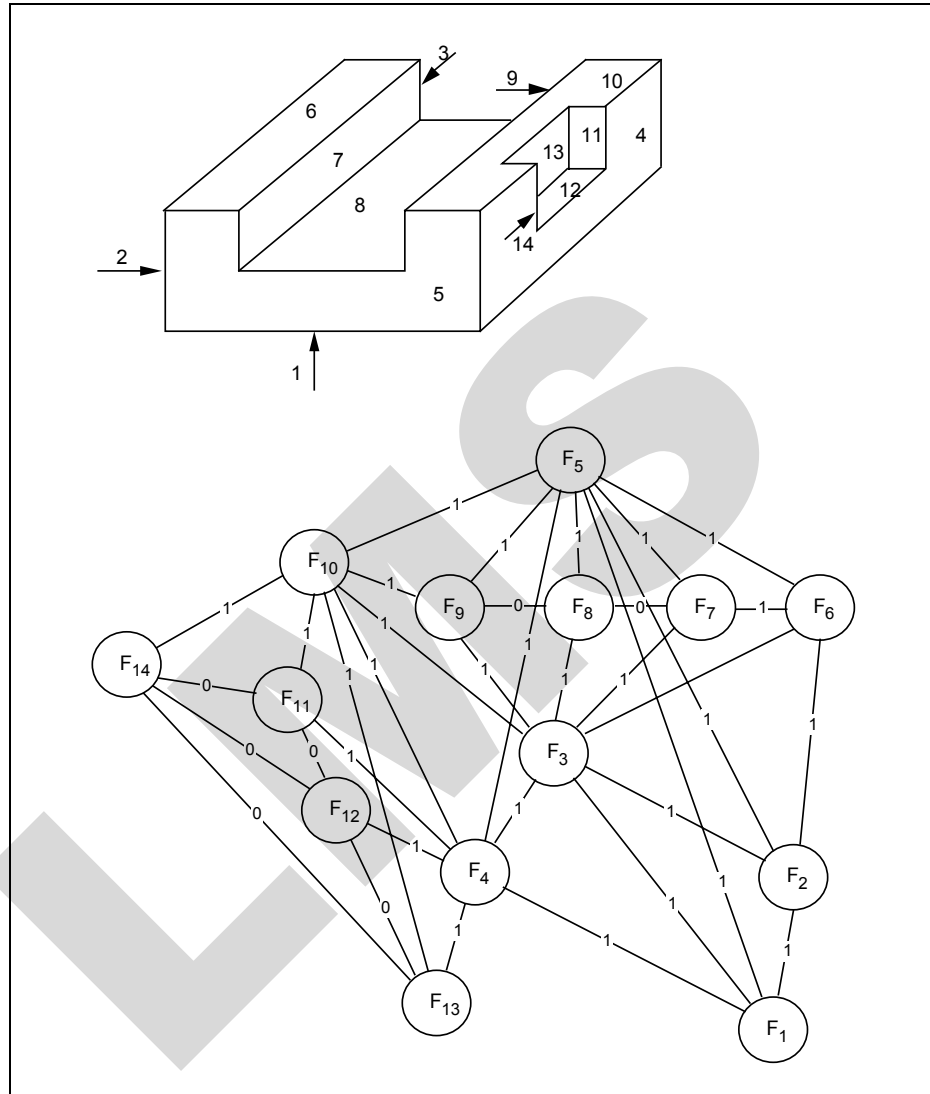
ΑΝ η είσοδος μιας οπής υπάρχει
ΚΑΙ η πλευρά δίπλα στην είσοδο είναι κυλινδρική
ΚΑΙ η πλευρά είναι κυρτή
ΚΑΙ η επόμενη πλευρά είναι επίπεδη
ΚΑΙ η πλευρά αυτή είναι γειτονική μόνο με τον κύλινδρο
ΤΟΤΕ η πλευρά της εισόδου, η κυλινδρική πλευρά του κυλίνδρου και το επίπεδο αποτελούν μια κυλινδρική οπή.

Οι όροι "είσοδος", "γειτονικός", "κυρτός", "κυλινδρικός," κ.λ.π. καθορίζονται σαν ξεχωριστοί κανόνες, έτσι ώστε να μπορούν να διαχωρισθούν και να προκύψουν από το συνοριακό μοντέλο. Οι κανόνες αυτοί καθορίζουν το εξάρτημα στην επιβεβαιωμένη του μορφή. Έτσι, ενώ υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ της επιβεβαιωμένης και συνοριακής αναπαράστασης, η μετατροπή των χαρακτηριστικών από την μια μορφή στην άλλη περιλαμβάνει την έρευνα μέσω όλων των γεγονότων μέχρι ένας δεδομένος κανόνας να αποδειχθεί ότι είναι αληθής.

Η προσέγγιση που βασίζεται στα γραφήματα

Οι τεχνικές, που βασίζονται στα έμπειρα συστήματα, χρησιμοποιούν μια αλυσιδωτή διαδικασία με ανάστροφη φορά για την αναγνώριση χαρακτηριστικών του εξαρτήματος. Η διαδικασία αυτή εκτελείται με την κλήση αρχέτυπων, ένα προς ένα, πραγματοποιώντας μια εκτεταμένη έρευνα για την εμφάνιση ενός χαρακτηριστικού. Μια γραφική αναπαράσταση εξαρτήματος, η οποία διευκολύνει την ευριστική έρευνα, ώστε να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος, είναι το Γράφημα Γειννίαςης χαρακτηριστικών *Attributed Adja-*

acency Graph (AAG) [6], στο οποίο η συντοιακή αναπαράσταση του εξαρτήματος μετατρέπεται σε γράφημα. Το Γράφημα Γειτνίασης χαρακτηριστικών (AAG) ορίζεται σαν ένα γράφημα $G = (N, A, T)$ όπου N είναι το σύνολο των κόμβων, A είναι το σύνολο των τόξων, και T το σύνολο των χαρακτηριστικών στα τόξα στο A , έτσι ώστε:

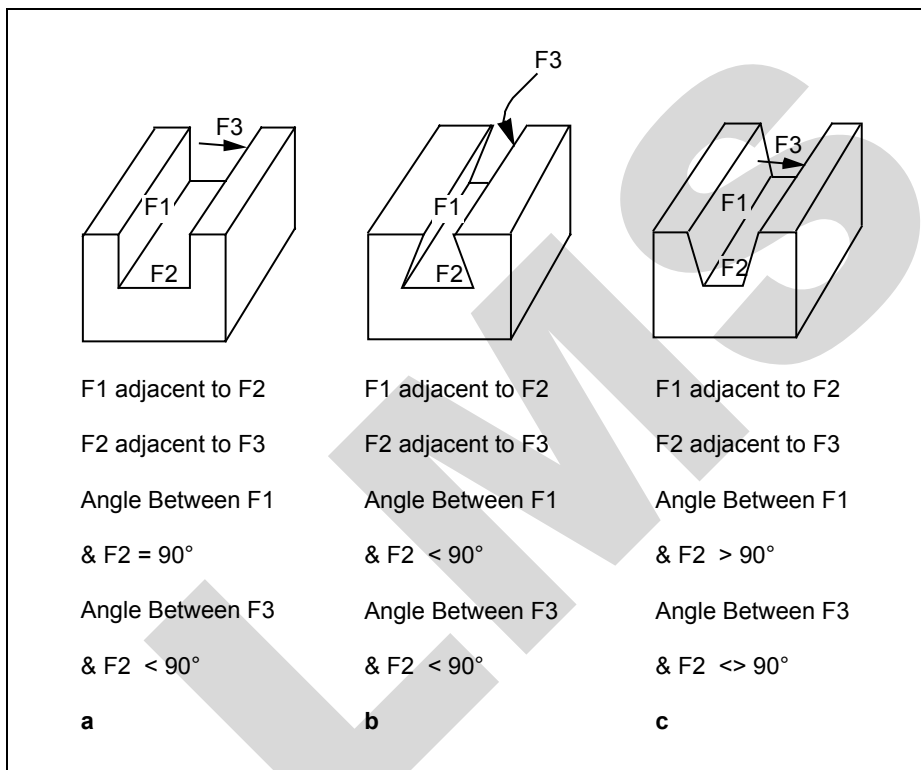


Σχήμα 4.14 Παράδειγμα ενός Γραφήματος Γειτνίασης χαρακτηριστικών (AAG) για Ένα Εξάρτημα

- Για κάθε όψη f στο F , υπάρχει ένας μοναδικός κόμβος στο N .

- Για κάθε ακμή e στο E , υπάρχει ένα μοναδικό τόξο a στο A , συνδέοντας τους κόμβους n_i και n_j που αντιστοιχούν στις όψεις f_i και f_j οι οποίες έχουν κοινή την ακμή e .
- Κάθε τόξο a στο A έχει ένα χαρακτηριστικό t , όπου $t = 0$ αν οι όψεις που έχουν κοινή ακμή σχηματίζουν κοίλη γωνία και $t = 1$ αν οι όψεις με κοινή ακμή σχηματίζουν κυρτή γωνία.

Το Γράφημα Γειννίαςης χαρακτηριστικών (AAG) αναπαρίσταται (Σχ. 4.14) στον Η/Υ από έναν τριγωνικό πίνακα. Κάθε κόμβος αποθηκεύει τον δείκτη της αντίστοιχης πληροφορίας για την όψη, δημιουργώντας έτσι ένα σύνδεσμο με την συνοριακή αναπαράσταση, εάν αυτό είναι επιθυμητό.



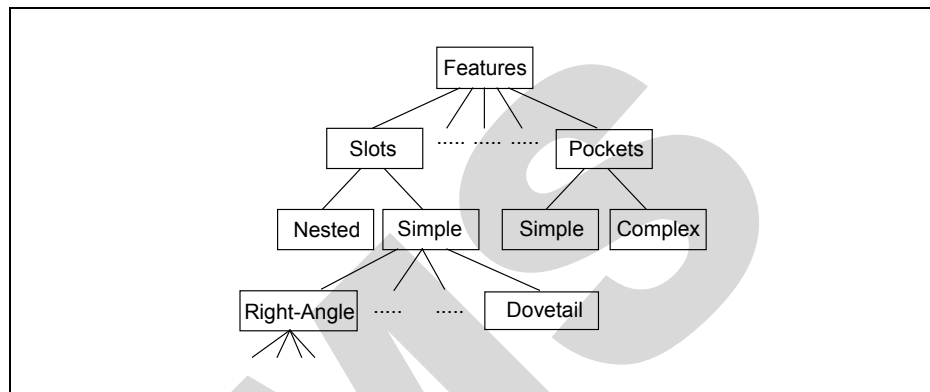
adjacent to = σε γειννίαση με

Angle Between = Γωνία Μεταξύ

Σχήμα 4.15 Διάφοροι Τύποι Υποδοχής και Κανόνες για την Αναγνώρισή τους

Προκειμένου να αναγνωρισθούν τα χαρακτηριστικά, πρέπει αυτά να ορισθούν με ακρίβεια. Προτείνονται ελάχιστα σύνολα απαραίτητων συνθηκών, οι οποίες κατατάσσουν μερικά χαρακτηριστικά [6]. Τα Σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17 παρουσιάζουν γενικές κατηγορίες για αυλάκια και υποδοχές. Στο Σχήμα 4.15,

ο γενικός καθορισμός για μια κατηγορία αυλακιών βασίζεται στην γειτνίαση της F1 με την F2, της F2 με την F3 και την γωνία μεταξύ των F1 και F2 (κυρτή ή κοίλη) και την γωνία μεταξύ της F2 και της F3. Αυτή η γενικευμένη κατηγοριοποίηση παρέχει ένα πλαίσιο για την αναπαράσταση των χαρακτηριστικών με ιεραρχικό τρόπο. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της ιεραρχικής οργάνωσης είναι η μείωση του υπολογιστικού χρόνου, που απαιτείται για την αναγνώριση των χαρακτηριστικών. Ένα άλλο ακόμη πλεονέκτημα προκύπτει από την έννοια της κληρονομικότητας. Επειδή τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης υποομάδας είναι επίσης χαρακτηριστικά και της υπερομάδας, οι ιδιότητες της υπερομάδας μπορούν να κληρονομηθούν από την υποομάδα χωρίς να επαναλαμβάνονται. Αυτό παρέχει μια συμπληκνωμένη αναπαράσταση για την επόμενη επεξεργασία.



Features = Χαρακτηριστικά
 Slots = Κοιλότητες
 Nested = Περιβαλλόμενες
 Simple = Απλές, -οί

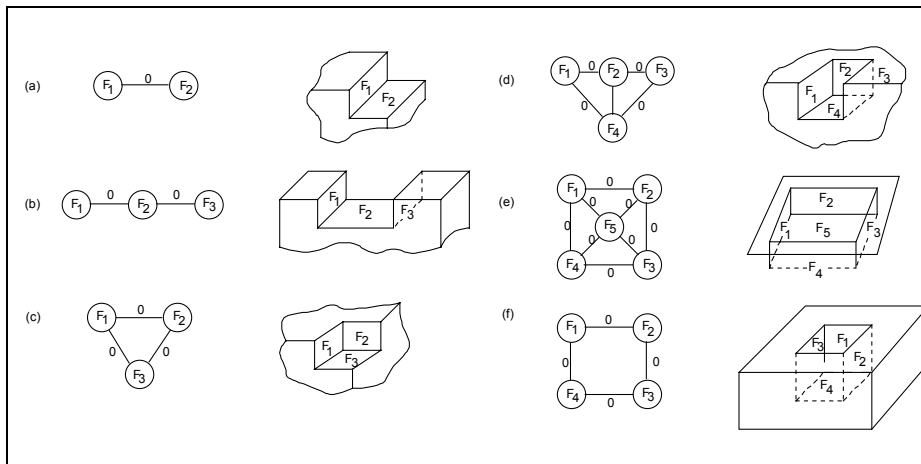
Pockets = Θύλακες
 Complex = Σύνθετοι
 Right-Angle = Ορθή γωνία
 Dovetail = Εμπλεκόμενες

Σχήμα 4.16 Ιεραρχική Οργάνωση Χαρακτηριστικών

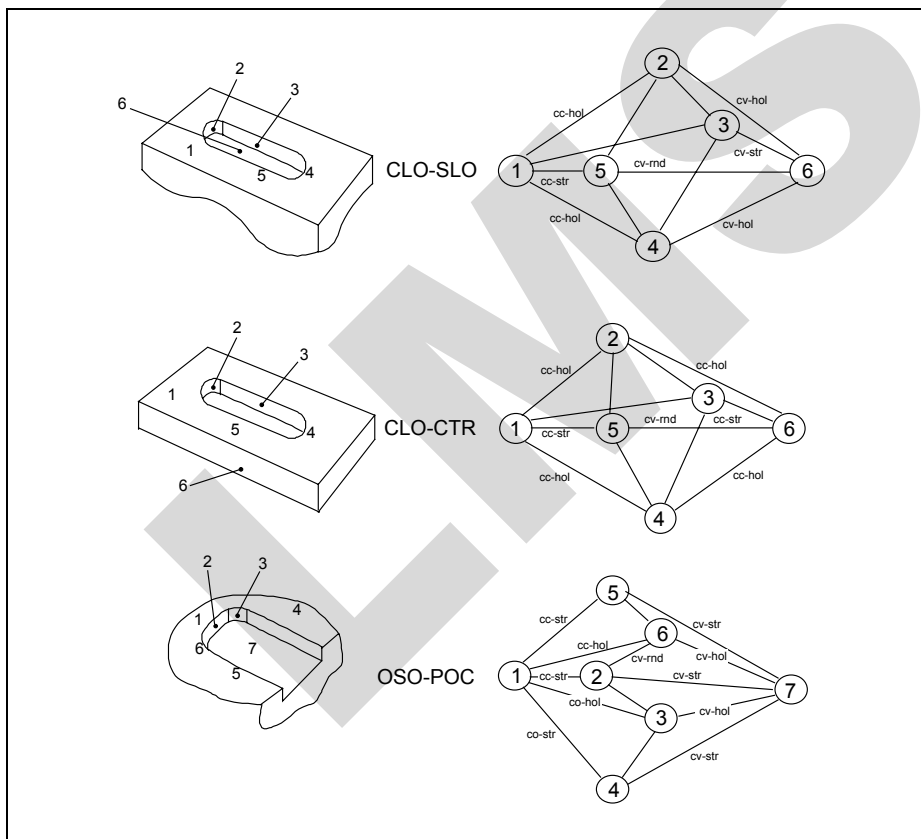
Οι κανόνες αναγνώρισης χαρακτηριστικών σε γενικό επίπεδο στηρίζονται στις ιδιότητες του Γραφήματος Γειτνίασης χαρακτηριστικών (AAG), που είναι μοναδικές για κάθε χαρακτηριστικό. Το Σχήμα 4.17 δείχνει ορισμένες ειδικές περιπτώσεις γενικών τύπων χαρακτηριστικών [4] καθώς και τα γραφήματα γειτνίασής τους (AAG).

Σαν παράδειγμα, για το πως μπορούμε να αναγνωρίσουμε χαρακτηριστικά αναφέρουμε, ότι όλες οι υποδοχές (pockets) έχουν τις παρακάτω ιδιότητες όσο αφορά το Γράφημα Γειτνίασης χαρακτηριστικών (AAG):

- Το γράφημα είναι κυκλικό.
- Υπάρχει ακριβώς μόνο ένας κόμβος n με μηδενικό αριθμό των προσκείμενων τόξων, ο οποίος ισούται, με χαρακτηριστικό αριθμό 0, με τον συνολικό αριθμό των κόμβων μείον 1.



Σχήμα 4.17 AAG για Τμήματα Γεωμετρίας



Σχήμα 4.18 Δομή Δεδομένων στον Μοντελοποιητή Στερεών Romulus Συγκριτικά με μια Δομή DEDS

- Όλοι οι άλλοι κόμβοι έχουν βαθμό ίσον με 3.
- Ο αριθμός των μηδενικών τόξων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μοναδιαίων τόξων (αφού διαγράψουμε τον κόμβο n).

Η τεχνική Γραφήματος Γεινίασης χαρακτηριστικών (AAG) μπορεί να επεκταθεί, ώστε να επιτρέπει τον σχηματισμό των χαρακτηριστικών μέσω του συνδυασμού των επιπέδων και των κυλινδρικών όψεων [7]. Επι πλέον, μια μέθοδος άμεσης κατασκευής δεδομένων (DGDS) (Κατευθυνόμενη Γραφική Δομή Δεδομένων) έχει αναπτυχθεί για να αναπαραστήσει την τοπολογία των όψεων και ακμών ενός στερεού μοντελοποιητή σε πιο συμπαγή μορφή [7]. Η δομή δεδομένων ενός συστήματος άμεσης κατασκευής δεδομένων (DGDS) συγκρίνεται με αυτή του στερεού μοντέλου στο Σχήμα 4.18. Τότε, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος διερεύνησης, που βασίζεται σε ένα εμπειρικό ευριτικό δέντρο, για να καθορίσει την σειρά των μηχανικών κατεργασιών (πρόγραμμα διεργασιών).

Μια λογική, που βασίζεται σε κανόνες, εφαρμόζεται για να δημιουργήσει μηχανολογικά δεδομένα (ταχύτητες, προώσεις), χρησιμοποιώντας ένα σύστημα μαθηματικής μοντελοποίησης και όχι ένα σύστημα ανάκτησης στοιχείων από βιβλιοθήκη.

Τροποποιημένη Τεχνική Γραφήματος Γεινίασης χαρακτηριστικών (AAG)

Για να ληφθούν υπ' όψη οι ακμές, που συνδέουν κυλινδρικές και επίπεδες όψεις, επιτρέπονται περισσότερες τιμές για τα χαρακτηριστικά των τόξων [7], χαρακτηρίζοντας έτσι την ακμή σαν ευθεία, κυλινδρική, καμπύλη ή βαθουλωτή (str, cyl, rnd, hol) και επιλέον σαν κοίλη ή κυρτή (cc, cv) (Σχ. 4.19). Για να διευκολυνθεί η δημιουργία της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου, διασφαίζεται, ότι όλα τα χαρακτηριστικά αποτελούνταν από τρεις (3) όψεις: την όψη αναφοράς (από όπου ξεκινάει η κατεργασία), την όψη του χαρακτηριστικού (συνήθως οριζόντια) και την τελική όψη (όπου η κατεργασία τελειώνει). Μερικά τέτοια στοιχεία συνδυάζονται για την δημιουργία άλλων αναγνωρίσιμων σύνθετων χαρακτηριστικών.

Αλγοριθμικό δέντρο διερεύνησης για τον καθορισμό της βέλτιστης διαδρομής του κοπτικού εργαλείου.

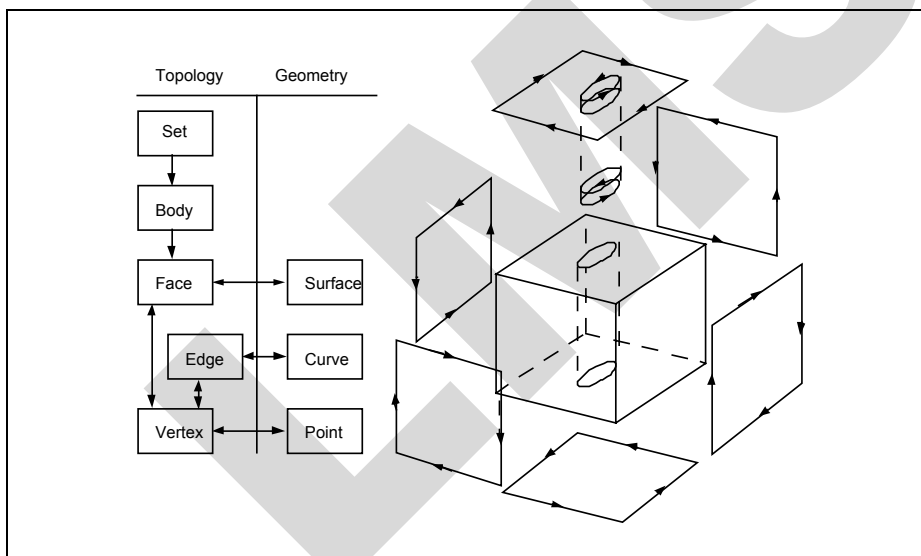
Η προτεραιότητα των μηχανουργικών κατεργασιών καθορίζεται μέσω της δημιουργίας μιας δενδρικής κατασκευής, που συσχετίζει όλες τις όψεις με ιεραρχικό τρόπο. Οι κόμβοι «γονείς» πρέπει να έχουν τελειώσει, πριν αρχίσει η κατεργασία των κόμβων «παιδιών». Μια "ευριστική τιμή", η οποία περιέχει την γνώση ενός έμπειρου σχεδιαστή, δίδεται σε κάθε τόξο (Πιν. 4.6). Η βέλτιστη διαδρομή προσδιορίζεται με την χρήση του δενδρικού αλγορίθμου έρευνας, τύπου «αναρρίχησης λόφου» (hill climbing tree search algorithm).

Is the same tool used as was used for the parent?	Is the feature face adjacent to one of the parent?	Does the process for the parent machine the reference face?	Heuristic Value
YES	YES	YES	1
YES	YES	NO	2
YES	NO	YES	3
YES	NO	NO	4
NO	YES	YES	5
NO	YES	NO	6
NO	NO	YES	7
NO	NO	NO	8

Is the same tool used as was used for the parent? = Χρησιμοποιείται το ίδιο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε με τον γονικό κόμβο;
 Is the feature face adjacent to one of the parent? = Γειτνιάζει η επιφάνεια του χαρακτηριστικού με αντίστοιχη των γονικών κόμβων;

Does the process for the parent machine the reference face? = Μπορεί να κατεργασθεί η επιφάνεια αναφοράς με την διεργασία που χρησιμοποιήθηκε για τον γονικό κόμβο;
 Heuristic Value = Εμπειρική Τιμή

Πίνακας 4.6 Ευριστική Διαδικασία Καθορισμού της Προτεραιότητας Κατεργασιών



Topology = Τοπολογία
 Geometry = Γεωμετρία
 Set = Σύνολο
 Body = Σώμα
 Face = Όψη

Surface = Επιφάνεια
 Edge = Ακμή
 Curve = Καμπύλη
 Vertex = Κορυφή
 Point = Σημείο

Σχήμα 4.19 Παράδειγμα Τροποποιημένου Γραφήματος Γειτνίασης (AAG) Αναπαράστασης Χαρακτηριστικών

4.2.4 Ημιδημιουργούμενη προσέγγιση (Semi-Generative Approach)

Τα πλήρως δημιουργούμενα συστήματα (Generative Process Planning) ΤΠΠ δεν υπάρχουν κατά την αποψη μας, με την κυριολεκτική έννοια του όρου. Ωστόσο, υπάρχει ένας αριθμός "ημιδημιουργούμενων" συστημάτων, που συνδυάζει την λογική αποφάσεων των δημιουργούμενων συστημάτων με τις λειτουργίες τροποποίησης των συστημάτων παραλλαγής των υπαρχόντων ΤΠΠ.

Characteristic	Manual	Workbook	Variant	Generative
Initial investment cost	Low	Low	High	High
Maintenance cost	Medium	Medium	High	Low
Training cost	High	Medium	Medium	Low
Experience level	High	Medium	Medium	Low
Clerical effort	High	Medium	Medium	Low
Consistency	Low	Medium	Medium	High
Speed	Low	Low	Medium	High
Integration of new capabilities	Low	Low	Medium	High
Accommodation of non-std parts	High	Low	Low	High
Documentation	Low	Medium	High	High
Paper storage	High	High	Low	Low
Ease of retrieval	Low	Low	High	High
Configuration control	Low	Low	High	High
Integration with CIM	Low	Low	Medium	High
Transportability	High	Medium	Low	Low

Characteristic = Χαρακτηριστικό
 Manual = Χειρονακτικό
 Work Book = Βιβλίο Εργασίας
 Variant = Παραλλαγή
 Generative = Δημιουργούμενο
 Low = Χαμηλό
 Medium = Μέσο
 High = Υψηλό
 Initial investment cost = Κόστος αρχικής επένδυσης
 Maintenance cost = Κόστος συντήρησης
 Training cost = Κόστος εκπαίδευσης
 Experience level = Επίπεδο εμπειρίας

Clerical effort = Προσπάθεια προσωπικού
 Consistency = Συνέπεια
 Speed = Ταχύτητα
 Integration of new capabilities = Ολοκλήρωση νέων δυνατοτήτων
 Accommodation of non-std parts = Χειρισμός μη τυποποιημένων κομματιών
 Documentation = Τεκμηρίωση
 Paper storage = Αποθήκευση χαρτιού
 Ease of retrieval = Ευκολία ανάκτησης
 Configuration control = Έλεγχος ρύθμισης
 Integration with CIM = Ολοκλήρωση με CIM
 Transportability = Ικανότητα μεταφοράς

Πίνακας 4.7 Σύγκριση Μεθόδων Τεχνολογικού Προγραμματισμού

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί σαν εξελιγμένη εφαρμογή της μεθόδου παραλλαγής των ΤΠΠ, χρησιμοποιώντας επί πλέον κάποια χαρακτη-

ριστικά ενός δημιουργικού συστήματος. Έτσι, τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα μπορούν να συνδυάσουν και χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων συστημάτων (generative characteristics) με τους παρακάτω τρόπους:

- Μέσα σε ένα σύνολο προϊόντων, τα τεχνολογικά προγράμματα για μερικά από τα προϊόντα δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μεθόδους δημιουργίας νέων ΤΠΠ, ενώ για τα τεχνολογικά προγράμματα για τα υπόλοιπα προϊόντα χρησιμοποιείται η μέθοδος παραλλαγής ΤΠΠ.

Process planning steps	Manual	Workbook	Variant	Generative
Examine part drawing	M	M	M	M
Identify "similar-to's"	M	M	A	A
If similar part identified:				
Retrieve plan	M	M	A	
Modify plan	M	M	M	
If no similar part identified:		*	*	
Select material	M			A
Select processes/sequence	M			A
Select machine	M			A
Select required tools	M			A
Identify fixtures	M			A
Determine number & depth of passes	M			A
Determine feeds & speeds	M			A
Select finishing processes	M			A

Modify plan = Μεταροπή σχεδιασμού παραγωγής

Process planning steps = Βήματα τεχνολογικού προγραμματισμού

Manual = Χειρονακτικό

Work Book = Βιβλίο Εργασίας

Variant = Παραλλαγή

Generative = Δημιουργούμενο

M = Η εργασία γίνεται χειρωνακτικά

A = Η εργασία είναι αυτοματοποιημένη

* = Η μέθοδος δεν εφαρμόζεται

Examine part drawing = Εξέταση σχεδίου κομματιού

Identify "similar-to's" = Αναγνώριση ομοιοτήτων με ήδη υπάρχοντα κομμάτια

If similar part identified = Εάν αναγνωρισθεί παρόμοιο κομμάτι

Retrieve plan = Ανάκτηση σχεδιασμού παραγωγής

If no similar part identified = Εάν δεν αναγνωρισθεί παρόμοιο κομμάτι

Select material = Επιλογή υλικού

Select processes/sequence = Επιλογή διεργασιών/αλληλουχία

Select machine = Επιλογή μηχανών

Select required tools = Επιλογή απαιτούμενων εργαλείων

Identify fixtures = Αναγνώριση στηρίξεων

Determine number & depth of passes = Καθορισμός του αριθμού και του βάθους των περασμάτων

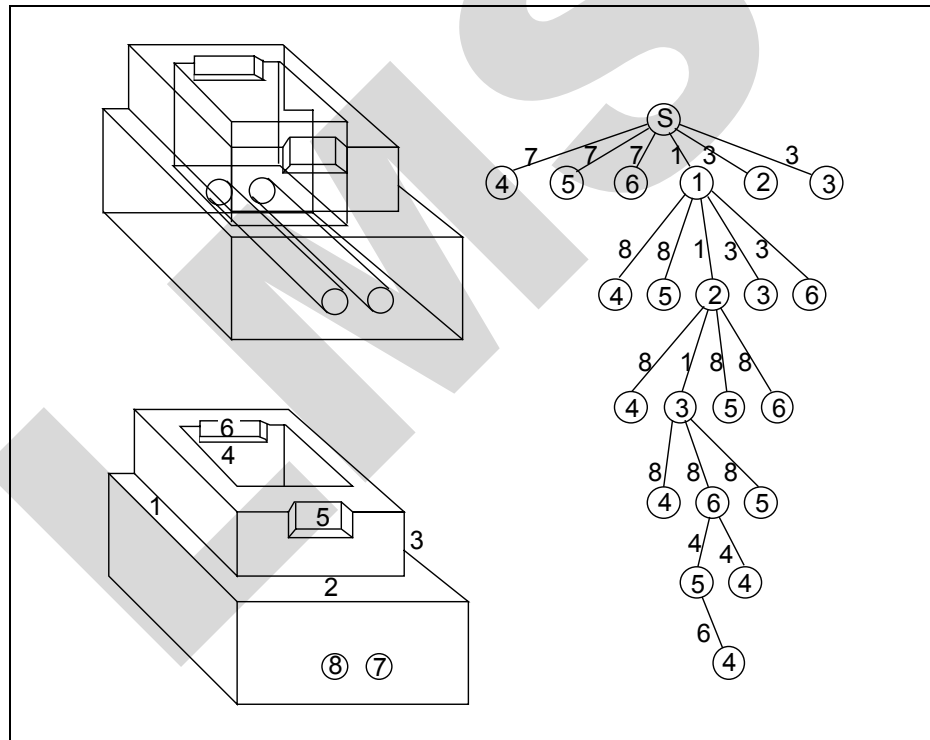
Determine feeds & speeds = Καθορισμός προώσεων και ταχυτήτων

Select finishing processes = Επιλογή διεργασιών φινιρίσματος

Πίνακας 4.8 Βήματα Τεχνολογικού Προγραμματισμού

- Η προσέγγιση παραλλαγής ΤΠΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη του τεχνολογικού προγράμματος. Κατόπιν η προσέγγιση δημιουργίας νέων ΤΠΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση του τυπικού προγράμματος παραγωγής.
- Η μέθοδος δημιουργίας νέου ΤΠΠ χρησιμοποιείται για την δημιουργία του μεγαλύτερου μέρους του τεχνολογικού προγράμματος και στην συνέχεια η μέθοδος της παραλλαγής χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει τις λεπτομέρειες.
- Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει έναν από τους πιο πάνω τρόπους δημιουργίας τεχνολογικού προγράμματος του εξαρτήματος, με σκοπό να πετύχει γρήγορο τεχνολογικό προγραμματισμό ή την αντιμετώπιση πολύπλοκων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών.

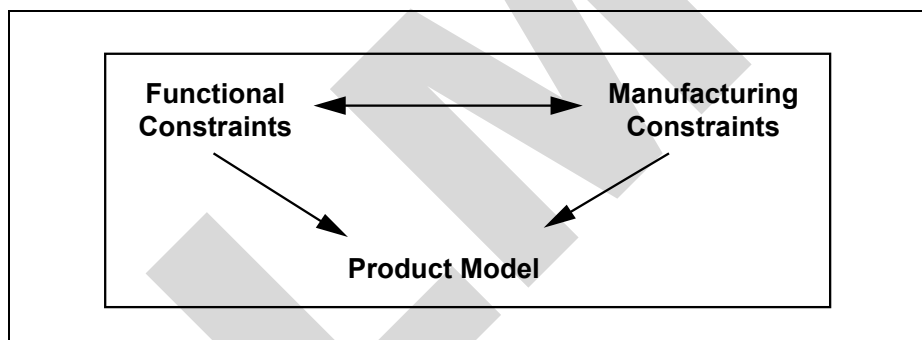
Μερικές ιδιότητες των μεθόδων, που συζητήθηκαν παραπάνω, περιγράφονται περιληπτικά στους Πίνακες 4.7 και 4.8.



Σχήμα 4.20 Ακολουθία Κατεργασιών σε Μορφή Δένδρου

4.2.5 Ο ρόλος του τεχνολογικού προγραμματισμού στην ταυτόχρονη ανάπτυξη προϊόντος (Role of Process Planning in Concurrent Engineering)

Ο στόχος της Ταυτόχρονης Ανάπτυξης Προϊόντος (ΤΑΠ) (Concurrent Engineering) είναι ο ταυτόχρονος προσδιορισμός των προδιαγραφών του προϊόντος και των διεργασιών που θα χρειασθούν για να το παράγουν. Αυτό σε αντίθεση με τον κλασικό τρόπο ανάπτυξης και σχεδιασμού, όπου πρώτα ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός και στην συνέχεια επιλέγονται οι διεργασίες παραγωγής. Προκειμένου να διασφαλισθεί η ταυτόχρονη ανάπτυξη, πρέπει οι σχεδιαστικοί και κατασκευαστικοί περιορισμοί να λαμβάνονται υπ' όψη από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Όταν οι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό και για τις κατεργασίες μπορούν να παρεμβαίνουν στο σχέδιο στην αρχική του φάση, είναι δυνατόν να αποφευχθούν πολλές δυσκολίες. Η ποιότητα, η αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος είναι δυνατόν να επιτευχθούν. Η ταυτόχρονη ανάπτυξη προϊόντος ονομάζεται έτσι, γιατί οι περιορισμοί σχεδιασμού και κατεργασιών λαμβάνονται υπ' όψη ταυτόχρονα με τις αποφάσεις κατά την σχεδίαση (Σχ. 4.21). Γι αυτό οι περιορισμοί αυτοί πρέπει να είναι γνωστοί και πλήρως καθορισμένοι, για να μπορεί να διασφαλιστεί η ταυτόχρονη ανάπτυξη. Πολλές φορές, οι μηχανικοί σχεδιασμού και παραγωγής δεν μπορούν να συνεργασθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης. Έτσι, μια λειτουργία αυτόματου τεχνολογικού προγραμματισμού είναι να μοντελοποιήσουν τη γνώση της μιας κατηγορίας ή και των δύο κατηγοριών μηχανικών.



Functional constraints = Λειτουργικοί περιορισμοί
 Manufacturing constraints = Κατασκευαστικοί περιορισμοί
 Product Model = Μοντέλο προϊόντος

Σχήμα 4.21 Ταυτόχρονη Ανάπτυξη Προϊόντος

Η ταυτόχρονη ανάπτυξη προϊόντος περιλαμβάνει τα ακόλουθα επίπεδα ανάπτυξης σε ένα σχέδιο προϊόντος:

1. *Ανάλυση κατασκευασιμότητας.* Αυτό είναι το πρώτο επίπεδο που αφορά στη σχέση μεταξύ του σχεδίου του προϊόντος και των κατα-

σκευαστικών περιορισμών. Σ' αυτή την φάση, ο υπεύθυνος του τεχνολογικού προγραμματισμού εξετάζει το σχέδιο, σε επίπεδο σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, με σκοπό να καθορίσει το πόσο είναι δυνατή η πραγματοποίησή του σε σχέση με τους περιορισμούς παραγωγής. Αυτός ο τύπος πληροφορίας επιτρέπει στον σχεδιαστή μηχανικό να παίρνει γρήγορες αποφάσεις για το σχέδιο στην αρχική φάση σχεδίασης. Η έγκαιρη και από την αρχή ανάδραση σε σχέση με τις δυνατότητες της παραγωγής επιτρέπει δραστικές αλλαγές στον σχεδιασμό νωρίς, αντί των μικρών βελτιωτικών παρεμβάσεων που συνηθίζονται στην περίπτωση της σειριακής ανάπτυξη προϊόντος. Επίσης, πληροφορίες για τους περιορισμούς που προέρχονται από το σύστημα παραγωγής μπορούν να συνυπολογίζονται κατά την διάρκεια της σχεδίασης, για να ενσωματωθούν στο τελικό σχέδιο του προϊόντος.

2. *Ανάλυση της δυνατότητας παραγωγής του προϊόντος.* Αυτή καθορίζει την ικανότητα του συστήματος να παράγει ένα ή μια σειρά εξαρτημάτων, καθώς και το κόστος. Εξαρτήματα, που θεωρήθηκαν αρχικά ότι δεν ήταν δυνατόν να παραχθούν με τους αρχικούς, συνήθεις περιορισμούς, μπορούν να εισαχθούν ξανά στο σύστημα με αλλαγές των περιορισμών, που προκύπτουν από τις απαντήσεις στο ερώτημα: "Τι θα γινόταν εάν". Ένας περιορισμός, π.χ., θα μπορούσε να αλλαχθεί ώστε να επιτρέψει την κατεργασία διαφορετικής πρώτης ύλης ή μεγέθους υλικού. Η αλλαγή αυτή στον συγκεκριμένο περιορισμό θα μπορούσε να επιτευχθεί αλλάζοντας συγχρόνως και τα χαρακτηριστικά της μηχανής, ώστε να καθορισθεί τελικά ένα συνολικά αποδεκτό σύστημα. Οι περιορισμοί, που προκύπτουν από τις απαντήσεις στο γενικό ερώτημα "Τι θα γινόταν αν", μπορούν να συμπεριληφθούν σε προδιαγραφές αγοράς, π.χ. εργαλειομηχανών, οι οποίες να επιτρέπουν την αποτελεσματική και γρήγορη διαχείριση της παραγγελίας των μηχανών, που θα επεξεργασθούν μια δεδομένη ποικιλία προϊόντων. Η ανάλυση της «παραγωγισιμότητας» (producibility) ενός προϊόντος είναι χρήσιμη για την εκτίμηση του κόστους, που προκύπτει από ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό προϊόντος. Για παράδειγμα, ακόμη και αν ένα εξάρτημα είναι δυνατόν να κατεργασθεί, μπορεί η παραγωγή του να είναι χρονοβόρος και ακριβή. Ο συνδυασμός παραμέτρων και ανταλλαγή πληροφορίας πρέπει να οδηγούν στην μείωση του κόστους, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα. Η ευαισθησία του κόστους μπορεί να καθορισθεί νωρίς με την βοήθεια της ανάλυσης αυτής. Αφού περίπου το 90% του συνολικού κόστους παραγωγής καθορίζεται κατά την φάση σχεδίασης, μικρή μείωση του μπορεί να επιτευχθεί βελτιώνοντας τις μεθόδους παραγωγής, όταν ο σχεδιασμός έχει τελειώσει. Κατά συνέπεια η ανάδραση κόστους, που επιτυγχάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο είναι σημαντική, για να πετύχει κανείς ανταγωνιστικά προϊόντα.

3. *Αλλαγές στο προϊόν.* Η ανάλυση της «παραγωγισιμότητας» γίνεται στην βάση της επίδρασης των διαφόρων χαρακτηριστικών του προϊόντος, όπως αυτά καθορίζονται κατά την διάρκεια του σχεδιασμού, στο κόστος παραγωγής. Οι περιορισμοί, που επιβάλλονται από το «εργοστασιακό περιβάλλον» (Shop Floor) και τις διεργασίες, οδηγούν σε αλλαγές στον σχεδιασμό του προϊόντος, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν προτυποποίηση των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του σε ομάδες, καθώς και την «ελάφρυνση» των ανοχών. Τα χαρακτηριστικά του προϊόντος μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα πρότυπα χαρακτηριστικά, που καθορίζονται από τις δυνατότητες των διαφόρων εργοστασιακών πόρων. Αν ένα χαρακτηριστικό προϊόντος δεν σύμφωνα με το πρότυπο, τότε το πρότυπο, που είναι πλησιέστερα στο απαιτούμενο χαρακτηριστικό, προτείνεται σαν εναλλακτική πρόταση. Ο υπεύθυνος του ΤΠΠ μπορεί να απαιτήσει μεγαλύτερες διαστασιακές ανοχές για να συμπεριλάβει τους περιορισμούς μιας συγκεκριμένης διεργασίας. Η απαίτηση για διαφορετικά πρότυπα και μεγαλύτερες ανοχές στέλνονται πίσω στον σχεδιασμό, για πιθανές αλλαγές στα χαρακτηριστικά του προϊόντος.
4. *Χαρακτηρισμός προμηθευτών.* Επιχειρήσεις που προμηθεύονται, π.χ. μηχανολογικά εξαρτήματα από διάφορους προμηθευτές, ενδιαφέρονται για την ικανότητα των προμηθευτών τους να τους προμηθεύουν υψηλής ποιότητας εξαρτήματα στις προσυμφωνημένες τιμές. Ο υπεύθυνος τεχνολογικού προγραμματισμού χρησιμοποιεί μοντέλα των ικανοτήτων των προμηθευτών, βασισμένα στους περιορισμούς που αφορούν στο εργοστασιακό καθεστώς και στις διεργασίες, για να καθορίσει ποιος από όλους τους προμηθευτές συνδυάζει την καλύτερη ποιότητα με το πιο μικρότερο κόστος. Και οι περιορισμοί όπως το μέγεθος της επιχείρησης, προηγούμενες προσφορές και η παρούσα φύση της επιχείρησης μπορούν επίσης να μοντελοποιηθούν μέσω των περιορισμών, ώστε να βοηθήσουν στον καθορισμό του καλύτερου προμηθευτή.
5. *Αλλαγή του Εργοστασιακού Περιβάλλοντος.* Η ανάλυση της «παραγωγισιμότητας» του προϊόντος έχει σαν αποτέλεσμα, να πραγματοποιούνται αλλαγές σε εργαλεία και σε ιδιοσυσκευές για την καλύτερη παραγωγή ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος. Ο τεχνολογικός προγραμματισμός προτείνει πρόσθετες ικανότητες των εργαλείων του συστήματος, με αποτέλεσμα την μείωση των περιορισμών του εργοστασιακού περιβάλλοντος και την μεγαλύτερη ικανότητα του.

Ένα πλήρως καθορισμένο μοντέλο προϊόντος, βασισμένο στα χαρακτηριστικά του, είναι η πρώτη απαίτηση στην ταυτόχρονη ανάπτυξη προϊόντος (concurrent engineering). Η δεύτερη είναι ένα πλήρες μοντέλο των ικανοτήτων και περιορισμών του εργοστασίου, το οποίο θα παρέχει την ανάδραση της παρα-

γωγής. Η γνώση των κατεργασιών και των ικανοτήτων των μηχανών μπορεί να μοντελοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο, που χρησιμοποιείται η γνώση σε ένα μοντέλο προϊόντος. Ένα μοντέλο προϊόντος μπορεί να αναλυθεί όσον αφορά τις ικανότητες του εργοστασίου, για να καθορισθεί αν είναι δυνατόν να παραχθεί με βάση τις σχεδιαστικές απαιτήσεις των χαρακτηριστικών του. Αυτή η πληροφορία ανάδρασης μας λέει, ποια τμήματα του σχεδίου είναι έξω από τα όρια του συγκεκριμένου εργοστασίου. Ο μηχανικός σχεδίασης μπορεί να χρησιμοποιήσει την πληροφορία αυτή, για να αλλάξει το σχέδιο του προϊόντος, έτσι ώστε ικανοποιούνται οι περιορισμοί του συστήματος. Ακόμη, ο μηχανικός παραγωγής μπορεί να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες, για να αναβαθμίσει τις παραγωγικές ικανότητες, ώστε να ικανοποιήσουν τις νέες σχεδιαστικές ανάγκες. Τα μοντέλα παρέχουν ζωτικές πληροφορίες για την διαδικασία λήψης αποφάσεων υποδεικνύοντας τα αντιφατικά σημεία. Ωστόσο, δεν παρέχουν κάποιο μηχανισμό επίλυσης των αντιφατικών αυτών σημείων.

4.3 Εφαρμογές (Applications)

Στο παρελθόν, η έρευνα του ΤΠΠ είχε εστιάσει στην ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων παραλλαγής των ΤΠΠ, βασισμένων σε εξελιγμένους αλγορίθμους έρευνας και τεχνικές βάσεων δεδομένων. Ωστόσο, η ακαδημαϊκή έρευνα εστιάστηκε στην συνέχεια στην ανάπτυξη μεθόδων δημιουργίας νέων ΤΠΠ, οι οποίες προσφέρουν απ' ευθείας σύνδεση με μοντέλα προϊόντων στο CAD..

Για να πετύχουν αυτή την ικανότητα, οι ερευνητές διαθέτουν εργαλεία που χρησιμοποιεί η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence/AI), ειδικά τα έμπειρα συστήματα για να προγραμματίσουν μια παραγωγική διαδικασία. Οι εξελίξεις στην τεχνητή νοημοσύνη (AI) έχουν μεταφερθεί στο περιβάλλον του τεχνολογικού προγραμματισμού. Τα έμπειρα συστήματα χρησιμοποιούν μια "έμπειρη" βάση, για να δημιουργήσουν το τεχνολογικό πρόγραμμα με μια σειρά δηλώσεων του τύπου "εάν-τότε". Από τότε που τα βιομηχανικά σχέδια έγιναν σε μεγάλο βαθμό πολύπλοκα, τα έμπειρα συστήματα, που σχεδιάζονται για βιομηχανικό τεχνολογικό προγραμματισμό, πρέπει να είναι και αυτά πολύπλοκα, θεωρώντας σαν μεταβλητές το κόστος, τα υλικά, τις ταχύτητες των μηχανών, το φινίρισμα των επιφανειών, την σειρά των επεξεργασιών και τον χρονοπρογραμματισμό μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα. Η λήψη των αποφάσεων υλοποιείται βήμα προς βήμα, λαμβάνοντας υπ' όψη το παρελθόν όσο και το μέλλον. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την μέθοδο παραλλαγής των υπαρχόντων ΤΠΠ, όπου μετά την παρουσίαση του εξαρτήματος ο υπεύθυνος του τεχνολογικού προγραμματισμού απλά βρίσκει ένα παρόμοιο εξάρτημα και τροποποιεί το ήδη υπάρχον πρόγραμμα.

Πραγματικά συστήματα τεχνολογικού προγραμματισμού που δημιουργούν νέα προγράμματα υπάρχουν μόνο στην έρευνα και δεν είναι εμπορικά διαθέσιμα. Επί πλέον, τα υπάρχοντα ερευνητικά συστήματα είναι περιορισμένα σε ειδικές εφαρμογές. Στις επόμενες παραγράφους, αναφέρονται με συντομία μερικά παραδείγματα συστημάτων ΤΠΠ.

Βιβλιογραφία

1. Chang T. C., Wysk R. A., *An Introduction to Automated Process Planning Systems*. Prentice Hall/Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
2. Niebel B., A. Draper and R. Wysk, *Modern Manufacturing Process Engineering*. McGraw-Hill, New York, 1989.
3. Suh N. P., *The Principles of Design*. Oxford University Press, Oxford, U.K., 1990.
4. Chang T. C. *Expert Process Planning for Manufacturing*. Addison-Wesley, Reading MA, 1990.
5. Iwata K., Y. Kakino, F. Oba and N. Sugimura, "Development of Non- Part Family Type Computer Aided Production Planning System CIMS/PRO. *Advanced Manufacturing Technology*. P. Blake (ed.). North Holland Pub. Co., New York, 1980, pp. 171-184.
6. Joshi. S. and T. C. Chang, "CAD Interface for Automated Process Planning". *Proceedings of the 19th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*. Penn. State Univ., June 1987, pp. 45-53.
7. Lee. Y. C. and K. S. Fu, "Machine Understanding of CSG: Extraction and Unification of Manufacturing Features". *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1987, pp. 20-32.
8. Ham. I. and C. Y. Liu, "Computer-Aided Process Planning: The Present and the Future". *Annals of the CIRP* (Vol. 37, No.2, 1988) 591-602.
9. Major. F. and W. Grottko, "Knowledge Engineering Within Integrated Process Planning Systems". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 3, No. 2, 1987), pp. 209-213.
10. Davies. B. J., "Application of Expert Systems in Process Planning". *Annals of the CIRP* (Vol. 35, No. 2, 1986), 451-453.
11. Phillips R. and V. Arunthavanathan, " An Intelligent Design and Process Planning System," *Proceedings of the 19th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*, Penn. State Univ., June 1987, pp. 17-22.
12. Descotte Y. and J. C. Latombe, "GARI: A Problem Solver That Plans How to Machine Mechanical Parts," *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, Canada, August 1981, pp. 766-772.
13. Gupta T. B., and K. Ghosh, "Survey of Expert Systems in Manufacturing and Process Planning," *Computers in Industry* (Vol. 11, No. 2, Jan 1989), pp. 195-204.
14. Berenji H. R., and B. Khoshnevis, "Use of Artificial Intelligence in Automated Process Planning," *Computers in Mechanical Engineering* (Vol. 5, No. 2, 1986), pp. 47-55.
15. Sluga A., P. Butala, N. Lavrac, and M. Gams, "Attempt to Implement Expert System Techniques in CAPP," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 4, No. 1-2, 1988), pp. 77-82.
16. Milacic V. and M. Kalajdzic, "Logical Structure of Manufacturing Process Design -Fundamentals of an Expert System for Manufacturing Process Planning," *Proceedings of the 16th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*, Tokyo, Japan, July 1984, pp. 93-101.
17. Hummel K. E., "The XCUT Process Planning Project," CAM-I Meeting Report M-87-PPP-02, March 1987, pp. 1-23.
18. Inui M., A. Kinosada, H. Suzuki, F. Kimura, and T. Sata, "Automated Process Planning for Sheet Metal Parts With Bending Simulation," *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting* (PED-25, 1987), pp. 245-258.
19. Willis D., I. A. Donaldson, J. L. Murray, and M. H. Williams, "Knowledge-Based Systems for Process Planning Based on a Solid Modeller," *Computer-Aided Engineering Journal* (Vol. 6, No. 1, Feb. 1989), pp. 21-26.
20. Alting L., "XPLAN -An Expert Process Planning System and Its Further Development," *27th International MASTADOR Conference*, UMIST, UK, (April 20-21, 1988), pp. 291-297.

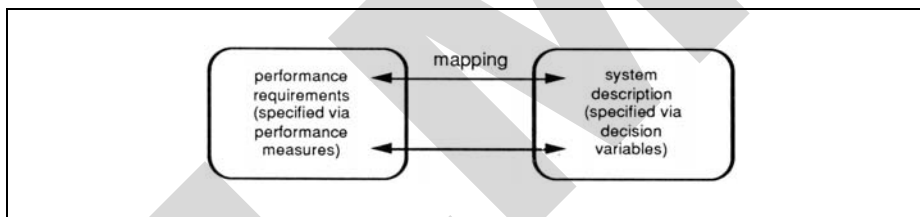
21. Glass M., "OPEX -An Expert System for CAPP," *6th International Workshop on Expert Systems and Their Applications*, Avignon, France, April 28-30, 1986, pp. 141-147.
22. Chang T. C., Wysk R. A., and Wang H. P., *Computer Aided Manufacturing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
23. Kalpakjian S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison- Wesley, Reading, MA, 1989.
24. Rembold U., C. Blume and R. Dillmann, *Computer-Integrated Manufacturing Technology and Systems*, Marcel Dekker Inc., New York, 1985.

LMS

5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή προϊόντων στην σύγχρονη βιομηχανία απαιτεί τις συνδυασμένες και συντονισμένες προσπάθειες από ανθρώπους, μηχανήματα και τον σχετικό ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Επομένως το *σύστημα παραγωγής* ορίζεται ως ο *συνδυασμός ανθρώπων, μηχανών και εξοπλισμού, που συνδέονται από μία κοινή ροή υλικού και πληροφορίας*. Τα ακατέργαστα υλικά και η ενέργεια αποτελούν την υλική είσοδο σε ένα σύστημα παραγωγής (ροή υλικού) ενώ η ζήτηση των προϊόντων μπορεί να θεωρηθεί η είσοδος στο σύστημα που αφορά την ροή πληροφορίας. Οι έξοδοι του συστήματος παραγωγής περιλαμβάνουν προϊόντα, αλλά και «απορρίματα»/scrap καθώς επίσης και πληροφορίες σχετικές με την απόδοση του συστήματος.



Performance Requirements Specified via Performance Measures = Απαιτήσεις Απόδοσης Προσδιοριζόμενες Μέσω Δεικτών Απόδοσης
Mapping=Αντιστοίχιση

System Description (specified via decision variables) = Περιγραφή Συστήματος (προσδιοριζόμενη μέσω των Μεταβλητών Απόφασης)

Σχήμα 5.1 Το Πρόβλημα Σχεδιασμού ενός Συστήματος Παραγωγής

Γενικά, ως σχεδιασμός ενός συστήματος παραγωγής θεωρείται η προσπάθεια καθορισμού του αριθμού και της διάταξης των παραγωγικών πόρων, του τρόπου λειτουργίας του συστήματος κ.λ.π., έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις απόδοσης του συστήματος. Η απόδοση αυτή εκφράζεται κατά κανόνα με την βοήθεια δεικτών απόδοσης (performance measures), οι τιμές των οποίων επηρεάζονται από τις διαφορές αποφάσεις που λαμβάνονται κατά την διάρ-

κεια του σχεδιασμού του συστήματος. Κατά συνέπεια, η διαδικασία του σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής συνίσταται ουσιαστικά στην εξεύρεση εκείνων των τιμών για τις μεταβλητές, που αποφασίζονται κατά την διάρκεια του σχεδιασμού (decision variables) και θα οδηγήσουν στις επιθυμητές τιμές των δεικτών απόδοσης του συστήματος. (Σχ. 5.1).

Ο δείκτης απόδοσης (performance measure) είναι μια μεταβλητή, της οποίας η τιμή ποσοτικοποιεί κατά κάποιο τρόπο την απόδοση ενός συστήματος παραγωγής.

Οι δείκτες απόδοσης είναι είτε *δείκτες οφέλειας (benefit measures)* –όσο αυξάνει η τιμή τους τόσο περισσότερο αποδοτική είναι η συμπεριφορά του συστήματος– και *δείκτες κόστους (cost measures)* –όσο μειώνεται η τιμή τους τόσο περισσότερο αποδοτική είναι η συμπεριφορά του συστήματος. Αυτοί οι δείκτες γενικά συσχετίζονται με τον χρόνο, την ποιότητα, το κόστος και την ευελιξία (βλέπε Κεφ.1), ενώ συγκεκριμένοι δείκτες απόδοσης αναφέρονται σε ένα δεδομένο σύστημα παραγωγής και διαφέρουν από το ένα σύστημα παραγωγής στο άλλο.

Με δεδομένες τις απαιτήσεις απόδοσης, ο σχεδιαστής του συστήματος παραγωγής πρέπει να περιγράψει έναν κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος. Ο σχεδιασμός αυτός μπορεί να περιγραφεί αριθμητικά, προσδιορίζοντας τις τιμές ενός αριθμού *μεταβλητών απόφασης (decision variables)*. Παράδειγμα μεταβλητών απόφασης είναι το είδος μηχανών που υπάρχουν σε ένα σύστημα παραγωγής και ο αριθμός τους.

Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την σχεδίαση ενός συστήματος παραγωγής –δηλαδή, κατά την αντιστοίχιση των δεικτών απόδοσης με τις μεταβλητές απόφασης– οφείλονται στους παρακάτω λόγους (Σχ. 5.1):

1. Τα συστήματα παραγωγής είναι μεγάλα και έχουν πολλά αλληλεπιδρώντα τμήματα.
2. Τα συστήματα παραγωγής είναι δυναμικά.
3. Τα συστήματα παραγωγής είναι ανοιχτά συστήματα, που επηρεάζουν και επηρεάζονται από το περιβάλλον τους.
4. Οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών απόδοσης και των μεταβλητών απόφασης δεν μπορούν, συνήθως, να εκφραστούν αναλυτικά.
5. Τα διάφορα δεδομένα είναι δύσκολο να μετρηθούν στο περιβάλλον της παραγωγικής διαδικασίας.
6. Υπάρχουν, συνήθως, πολλαπλές απαιτήσεις απόδοσης σε ένα σύστημα παραγωγής, οι οποίες είναι δυνατόν να αντικρούονται μεταξύ τους.

Υποθέτοντας ότι αυτές οι δυσκολίες μπορούν να ξεπεραστούν, το επόμενο βήμα μετά τον σχεδιασμό είναι η κατασκευή του πραγματικού συστήματος παραγωγής. Επειδή κατά κανόνα τα συστήματα παραγωγής είναι μονάδες εντάσεως κεφαλαίου, αποκτά μεγάλη σημασία η εκτίμηση των δεικτών απόδοσης του συστήματος παραγωγής, που σχετίζονται με το κόστος. Ανεξάρτητα από την εκτίμηση για την αποδοτικότητα ενός συστήματος παραγωγής με βάση

διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά, ένα σύστημα παραγωγής πρέπει κατ' αρχήν να είναι οικονομικά βιώσιμο. Οι τρεις κύριες κατηγορίες των οικονομικών δεικτών, που συνήθως χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας των συστημάτων παραγωγής είναι:

- α) *Η Απόδοση της επένδυσης (Return on Investment, ROI)*, η οποία ορίζεται ως το πηλίκο του παραγομένου από την επένδυση κέρδους προς το κόστος της ίδιας της επένδυσης. Το πηλίκο αποτυγχάνει στο να λάβει υπ' όψη το χρονικό φάσμα (time phasing) κόστους και ωφελειών και αγνοεί, τελείως, την χρονική αξία του χρήματος (time value of money) [1].
- β) *Η Απόσβεση (Payback)*, η οποία μετρά την διάρκεια ανάκαμψης από την επένδυση σε όρους χρηματικής ρευστότητας. Αγνοεί, όμως, τα προκύπτοντα οφέλη για την μετέπειτα της εξόφλησης της επένδυσης περίοδο, αποφασιστικό παράγοντα της αποτίμησης των συστημάτων παραγωγής. Για παράδειγμα, ένα σύστημα παραγωγής, με ευέλικτο εξοπλισμό αριθμητικού ελέγχου με υποστήριξη υπολογιστή (CNC), μπορεί να έχει μακρότερη περίοδο εξόφλησης της επένδυσης από ένα σύστημα, που αποτελείται από μηχανές για υλοποίηση μόνο συγκεκριμένων εργασιών. Όμως, το ευέλικτο σύστημα αφ' ενός, μπορεί και προσαρμόζεται ευκολότερα σε αλλαγές του σχεδιασμού του προϊόντος, με αποτέλεσμα την ταχύτερη απόκριση στις μεταβολές (ζήτησης) της αγοράς και αφ' ετέρου, έχει μακρότερο και χρησιμότερο κύκλο ζωής.
- γ) Τα μέτρα της *επιπτώμενης χρηματικής ρευστότητας (Discounted Cash Flow, DCF)* παρακολουθούν την χρονική ρύθμιση των προσδοκώμενων από συγκεκριμένη επένδυση χρηματικών ρευστοτήτων των προσόδων (revenues) και του κόστους (costs), ώστε με την έκπτωση των ρευστοτήτων να αντανακλάται η χρονική αξία του χρήματος. Απαιτούν συνθετότερη ανάλυση απ' ότι οι προαναφερθείσες δύο προηγούμενες κατηγορίες μέτρων, αλλά αντιπαρέρχονται, όμως, πολλές αδυναμίες των τελευταίων.

Οι δείκτες απόδοσης (performance measures), που βασίζονται στις αρχές της επιπτώμενης χρηματικής ρευστότητας, εμπεριέχουν το *εσωτερικό ποσοστό ανταπόδοσης (internal rate of return, IRR)*, καθώς και την *παρούσα καθαρή αξία (net present value, NPV)*. Το εσωτερικό ποσοστό ανταπόδοσης (IRR) αποτελεί το επιτόκιο του επιτοκίου (discount interest rate), κατά το οποίο η παρούσα αξία των χρηματικών εισροών (προσόδων, revenues), που δημιουργούνται από το σύστημα παραγωγής, ισούται με την παρούσα αξία των χρηματικών εκροών (κόστος, costs), που απαιτούνται από το σύστημα. Το εσωτερικό ποσοστό ανταπόδοσης (IRR) ορίζεται από την εξίσωση,

$$C_0^+ \sum_{p=1}^N \frac{C^+(p)}{(1 + IRR)^p} = C_0^- \sum_{p=1}^N \frac{C^-(p)}{(1 + IRR)^p}$$

όπου	N	\equiv	Αριθμός περιόδων, για τις οποίες οι χρηματικές ρευστότητες θα δημιουργούνται από την επένδυση
	C_0^-	\equiv	Αρχική χρηματική εκροή
	C_0^+	\equiv	Αρχική χρηματική εισροή
	$C^-(p)$	\equiv	Χρηματική εκροή κατά την περίοδο p
	$C^+(p)$	\equiv	Χρηματική εισροή κατά την περίοδο p

Η παρούσα καθαρή αξία (NPV) αποτελεί την διαφορά μεταξύ της παρούσης αξίας των χρηματικών εισροών –που πρόκειται να δημιουργηθούν από συγκεκριμένη επένδυση– και της παρούσης αξίας των χρηματικών εκροών της επένδυσης. Οι χρηματικές ρευστότητες εκπίπτουν με ποσοστό επιτοκίου r , ονομαζόμενο το *ευκαιριακό κόστος του κεφαλαίου (opportunity cost of capital)* και το οποίο αποτελεί το ποσοστό ανταπόδοσης, το προσφερόμενο από μια χρηματοοικονομική ασφάλεια ισοδύναμου ασφαλιστικού κινδύνου –όπως η υπό θεώρηση επένδυση. Η θετική (μεγαλύτερη του μηδενός) παρούσα καθαρή αξία (NPV) αποτελεί την συνθήκη αποδοχής για την έγκριση συγκεκριμένης επένδυσης. Δηλαδή, η παρούσα αξία της επένδυσης οφείλει να είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης χρηματοοικονομικής ασφάλειας ισοδύναμου κινδύνου. Η παρούσα καθαρή αξία (NPV) ορίζεται από την εξίσωση,

$$NPV = C_0^+ - C_0^- + \sum_{p=1}^N \frac{C^+(p) - C^-(p)}{(1+r)^p}$$

Οι μεταβλητές ορίζονται κατά τον ίδιο τρόπο, όπως και στην προηγούμενη εξίσωση για το εσωτερικό ποσοστό ανταπόδοσης.

Η χρηματική ρευστότητα με έκπτωση (DCF) αναγνωρίζεται, ευρέως, ως η σημαντικότερη λογιστική μεθοδολογία για την αποτίμηση των βιομηχανικών επενδύσεων. Η εφαρμογή της, όμως, απαιτεί την αντιμετώπιση δύο δυσκολιών: του υπολογισμού των περιπλόκων χρηματικών ρευστοτήτων, που προκύπτουν από τον προτεινόμενο σχεδιασμό του συγκεκριμένου συστήματος παραγωγής και της ποσοτικοποίησης των απροσδιορίστων οφελών του σχεδιασμού όπως, π.χ., η ευελιξία. Αυτό το τελευταίο αντιμετωπίζεται με την προσεκτική απαρίθμηση των πιθανών οφελών, που προκύπτουν από ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα παραγωγής. Δύο σημαντικά οφέλη είναι, σαφώς, η βελτιωμένη οργάνωση παραγωγής και η βελτιωμένη ευελιξία. Αναλύοντας περαιτέρω τα προαναφερθέντα οφέλη, η βελτιωμένη οργάνωση παραγωγής περιλαμβάνει:

- Μειωμένο κόστος αποθεμάτων μεταξύ των διαφόρων διεργασιών.
- Αυξημένο ρυθμό παραγωγής
- Λιγότερες διατάξεις συγκράτησης και λιγότερα εργαλεία (fixtures, jigs, and tooling).
- Βελτιωμένη ποιότητα προϊόντος.
- Μείωση του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης.

- Μειωμένο εργατικό κόστος.

Παρομοίως, τα δυνητικά οφέλη της βελτιωμένης ευελιξίας περιλαμβάνουν:

- Βελτιωμένο έλεγχο και παρακολούθηση της κατάστασης μηχανών, εργαλείων και συσκευών διαχείρισης υλικών.
- Βελτιωμένη απόκριση σε μεταβολές της ζήτησης.
- Βελτιωμένη δυνατότητα για την αποκατάσταση βλαβών των μηχανών.
- Βελτιωμένη δυνατότητα απόκρισης σε μεταβολές σχεδιασμού προϊόντος ή διεργασιών.

Η εφαρμογή των αρχών της χρηματικής ρευστότητας με έκπτωση συμπεριλαμβάνουν τον υπολογισμό των προσδοκωμένων χρηματικών ρευστοτήτων για καθ' ένα από τα προαναφερθέντα οφέλη. Τούτο αποτελεί μια επίπονη και δύσκολη εργασία. Ειδικότερα, ο υπολογισμός των αναδυόμενων από την ευελιξία χρηματικών ρευστοτήτων είναι πέραν των δυνατοτήτων της παραδοσιακής λογιστικής διαδικασίας και αποτελεί αντικείμενο συνεχούς ερεύνης [4, 5].

5.1.1 Τύποι συστημάτων παραγωγής (Types of Manufacturing Systems)

Γενικά τα συστήματα παραγωγής χωρίζονται σε δυο περιοχές:

1. Στην περιοχή όπου γίνεται η επεξεργασία των πρώτων υλών και παράγονται ξεχωριστά κομμάτια ή εξαρτήματα (processing area).
2. Και την περιοχή όπου διάφορα κομμάτια και εξαρτήματα –που έχουν παραχθεί αλλού– συναρμολογούνται σε ένα ημιέτοιμο ή τελικό προϊόν (assembly area).

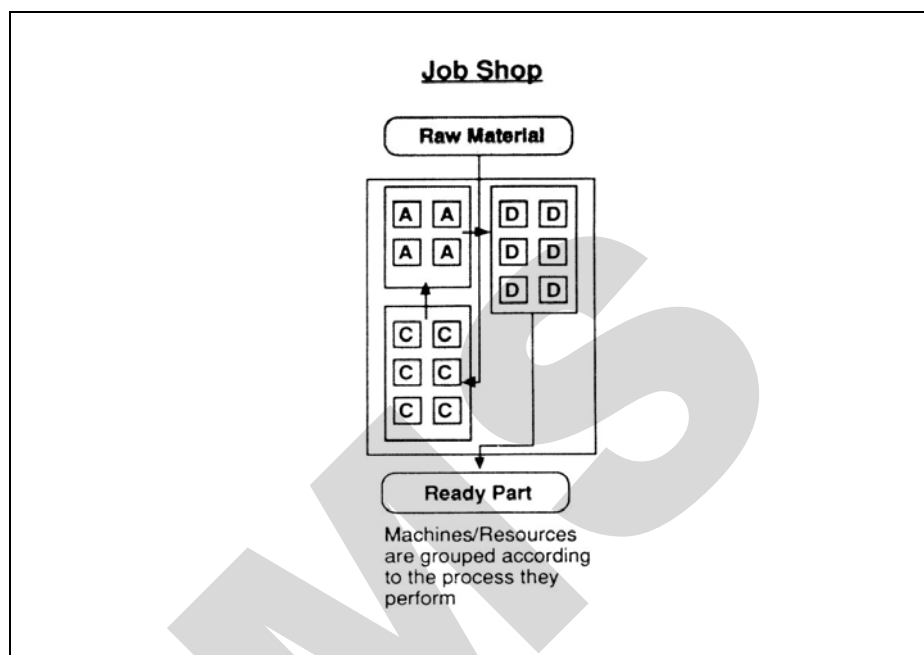
Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν οι μέθοδοι αρχικού σχεδιασμού και δόμησης τμημάτων επεξεργασίας και συναρμολόγησης.

Στην βιομηχανική πράξη υπάρχουν, γενικά, πέντε διαφορετικές δομές των τμημάτων επεξεργασίας (processing area): μηχανουργείο (job shop), project shop, κυψέλη (cellular systems), flow line και συνεχής (continuous system)

5.1.1.1 Σύστημα Παραγωγής Τύπου Μηχανουργείου (Job Shop)

Σε ένα σύστημα παραγωγής τύπου Μηχανουργείου (job shop) τοποθετούνται μαζί οι μηχανές, που έχουν τις ίδιες ή παρόμοιες δυνατότητες επεξεργασίας των πρώτων υλών. Οι τórνοι τοποθετούνται μαζί σε ένα κέντρο εργασίας (work center), οι φρέζες σχηματίζουν ένα άλλο κέντρο εργασίας, και με τον ίδιο τρόπο σχηματίζονται τα υπόλοιπα κέντρα εργασίας. Συνήθως, οι μηχανές μπορούν να επεξεργασθούν πολλούς τύπους εξαρτημάτων. Σε αυτή την δομή, το εξάρτημα ή η παρτίδα εξαρτημάτων μετακινούνται μέσα στο σύστημα από το ένα κέντρο εργασίας στο άλλο σύμφωνα με τον τεχνολογικό προγραμματι-

σμό παραγωγής του συγκεκριμένου εξαρτήματος (Σχ. 5.2). Ο χειρισμός-διακίνηση των υλικών είναι ευέλικτος, ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή πολλών διαφορετικών τύπων εξαρτημάτων, κάτι που συνήθως γίνεται με την χρήση εργαλείων, που ελέγχονται χειρονακτικά, όπως είναι τα περνοφόρα οχήματα (Clarkes). Μέσα σ' ένα κέντρο κατεργασίας (work center), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός διαφορετικών μηχανών για την ίδια κατεργασία. Αυτό παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα:



Job Shop= Σύστημα Τύπου Μηχανουργείου
Raw Material= Πρώτη Υλη
Ready Part= Έτοιμο Εξάρτημα/Προϊόν

Machines/Resources are grouped according to the process they perform = Οι μηχανές /πόροι είναι ομαδοποιημένες με βάση την διεργασία που εκτελούν

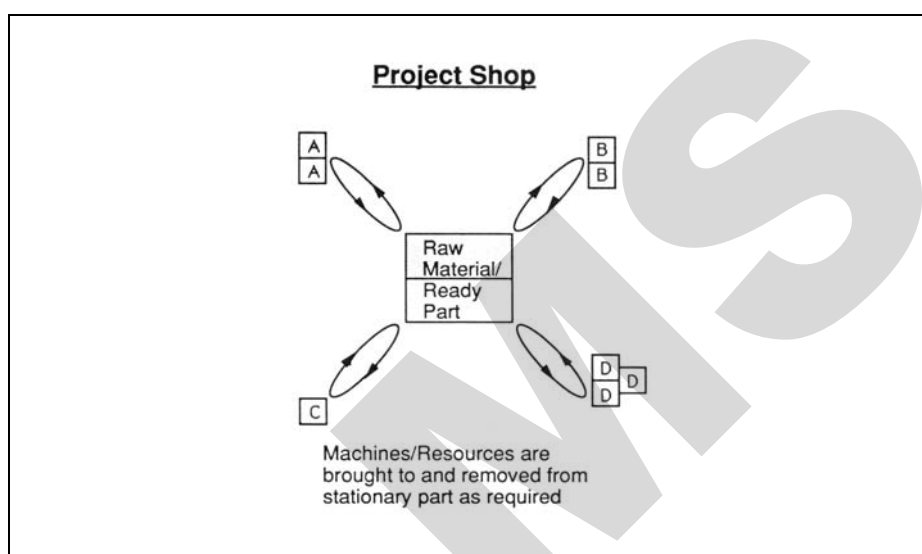
Σχήμα 5.2 Σχηματική Αναπαράσταση Ενός Συστήματος Παραγωγής Τύπου Μηχανουργείου (Job Shop)

- 1) κάθε κατεργασία ανατίθεται σε εκείνη την μηχανή, η οποία επιτυγχάνει την καλύτερη ποιότητα ή τον βέλτιστο ρυθμό παραγωγής
- 2) ο φόρτος εργασίας μπορεί να κατανεμηθεί ομοιόμορφα στις διάφορες μηχανές και
- 3) οι βλάβες (breakdowns) των μηχανών μπορούν να αντιμετωπισθούν εύκολα.

Τα πλεονεκτήματα αυτά γίνονται εμφανέστερα, όταν ο φόρτος εργασίας ενός

job shop περιλαμβάνει μια ποικιλία διαφορετικών εξαρτημάτων με διαφορετική αλληλουχία κατεργασιών. Ωστόσο, η πλήρης εκμετάλλευση της ευελιξίας ενός job shop απαιτεί την λήψη σύνθετων αποφάσεων σε σύντομο χρόνο. Για παράδειγμα, όταν μια μηχανή είναι διαθέσιμη μετά την ολοκλήρωση μιας εργασίας, ποια από τις πολλές πιθανές εργασίες που είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σ' αυτή την μηχανή θα ακολουθήσει; Επίσης η έλλειψη συνεργασίας στην λήψη αποφάσεων, μεταξύ των κέντρων εργασίας, μπορεί να εμποδίσει την ομαλή ροή των εξαρτημάτων από το ένα κέντρο εργασίας στο άλλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παραμένουν τα εξαρτήματα για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στο σύστημα παραγωγής και να δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες αποθεμάτων.

5.1.1.2 Σύστημα Παραγωγής Τύπου (Project shop)



Raw Material = Πρώτη Ύλη
Ready Part = Έτοιμο Εξάρτημα/Προτόν
Machines/Resources are brought to and removed from stationary part as required = Οι

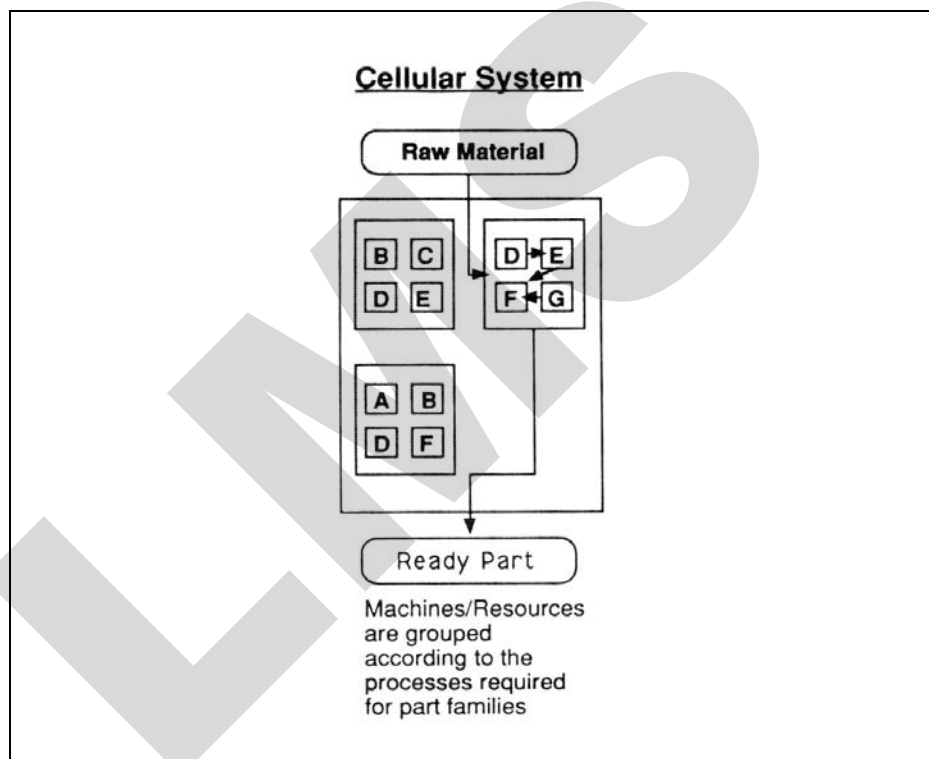
μηχανές/πόροι μεταφέρονται και απομακρύνονται από το προϊόν που παραμένει ακίνητο με βάση τις ανάγκες

Σχήμα 5.3 Σχηματική Αναπαράσταση Ενός Συστήματος Παραγωγής Τύπου Project Shop

Σε ένα σύστημα παραγωγής τύπου *project shop* (Σχ. 5.3) η θέση του υπό επεξεργασία προϊόντος παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της παραγωγής του, εξ αιτίας των διαστάσεων του ή/και του βάρους του. Οι πρώτες ύλες, οι άνθρωποι και οι μηχανές μετακινούνται μέχρι το προϊόν, όταν χρειάζεται. Παραδείγματα διαφόρων *project shops* συναντώνται στην βιομηχανία κατασκευής αεροσκαφών, στα ναυπηγεία, στην κατασκευή κτιρίων κ.α.

5.1.1.3 Συστήματα Παραγωγής Τύπου Κυψέλης (Cellular Systems)

Στα συστήματα παραγωγής, που οργανώνονται σύμφωνα με το *σύστημα κυψέλης (cellular)*, ο εξοπλισμός ή τα μηχανήματα ομαδοποιούνται σύμφωνα με τον συνδυασμό των κατεργασιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν στις διάφορες οικογένειες εξαρτημάτων (Σχ. 5.4). Η κάθε κυψέλη περιλαμβάνει μηχανές, που μπορούν να παράγουν μια συγκεκριμένη οικογένεια εξαρτημάτων. Η ροή του υλικού μέσα σε μια κυψέλη συχνά διαφέρει για τα διαφορετικά εξαρτήματα μιας οικογένειας εξαρτημάτων. Η ροή του υλικού εντός των κυψελών μπορεί να γίνεται είτε αυτόματα είτε χειρονακτικά. Περιορίζοντας, όπου και όταν είναι δυνατόν, την διαδρομή των εξαρτημάτων μόνο σε κάθε κυψέλη μέσα στο σύστημα παραγωγής, μπορεί η κάθε κυψέλη να θεωρείται ανεξάρτητη στην διαδικασία χρονικού προγραμματισμού, κάτι που απλοποιεί ιδιαίτερα την διαδικασία λήψης αποφάσεων χρονοπρογραμματισμού.



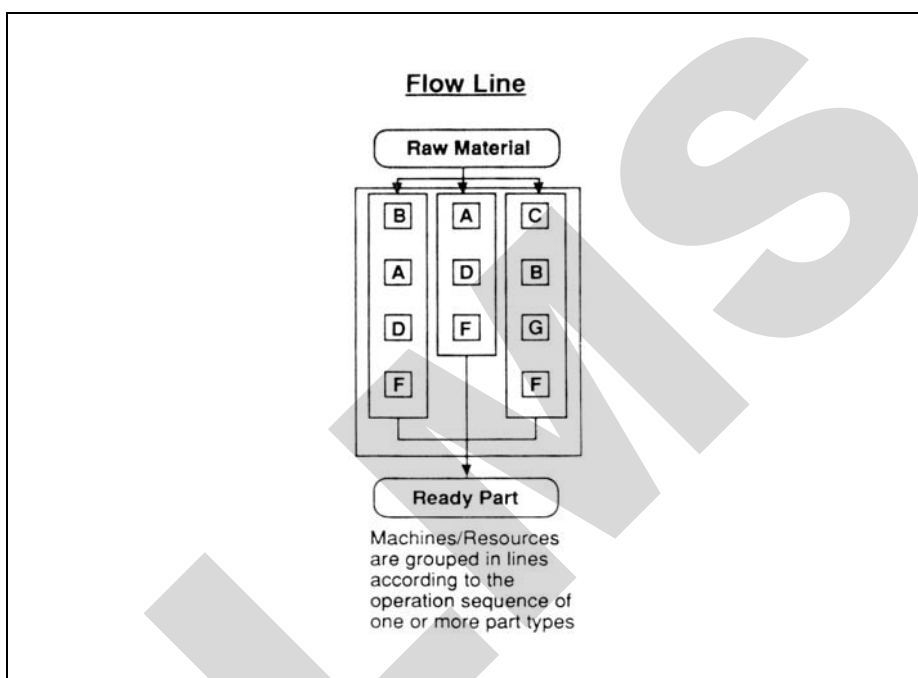
Cellular System = Κυψελικό Σύστημα
 Raw Material = Πρώτη Ύλη
 Ready Part = Τελικό εξάρτημα/Προϊόν

Machines/Resources are grouped according to the processes required for part families =
 Οι μηχανές/πόροι ομαδοποιούνται με βάση τις διεργασίες που απαιτούνται για μία οικογένεια εξαρτημάτων

Σχήμα 5.4 Σχηματική Αναπαράσταση Ενός Συστήματος Παραγωγής Τύπου Κυψέλης

5.1.1.4 Συστήματα Παραγωγής Τύπου Flowline

Ο τέταρτος τρόπος σχηματισμού της δομής ενός συστήματος παραγωγής είναι η δημιουργία μιας συνεχούς γραμμής (*flow line*), στην οποία τα μηχανήματα και οι άλλοι εξοπλισμοί δέχονται εντολές σύμφωνα με την αλληλουχία καταργασιών των εξαρτημάτων που παράγονται (Σχ.5.5). Ένα τυπικό παράδειγμα, είναι η συνεχής γραμμή παραγωγής (*transfer line*), η οποία χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες αυτοκινήτου (Σχ. 1.14). Η συνεχής γραμμή παραγωγής αποτελείται από διαδοχικές μηχανές, που έχουν επιλεγεί για την παραγωγή ενός μόνο εξαρτήματος ή στην καλύτερη περίπτωση για μερικά, ελαχιστα διαφορετικά εξαρτήματα. Ουσιαστικά μόνο ένας τύπος εξαρτήματος παράγεται. Η προετοιμασία (*set up*) των μηχανών για την παραγωγή νέου διαφορετικού τύπου εξαρτημάτων, αν τούτο είναι εφικτό, διαρκεί ώρες ή και ημέρες.



Raw Material = Πρώτη Ύλη
 Ready Part = Τελικό εξάρτημα/Προϊόν
 Machines/Resources are grouped in lines according to the operation sequence of one or more

part types = Οι μηχανές/πόροι ομαδοποιούνται σε γραμμές με βάση την αλληλουχία των διεργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή ενός ή περισσότερων τύπων εξαρτημάτων

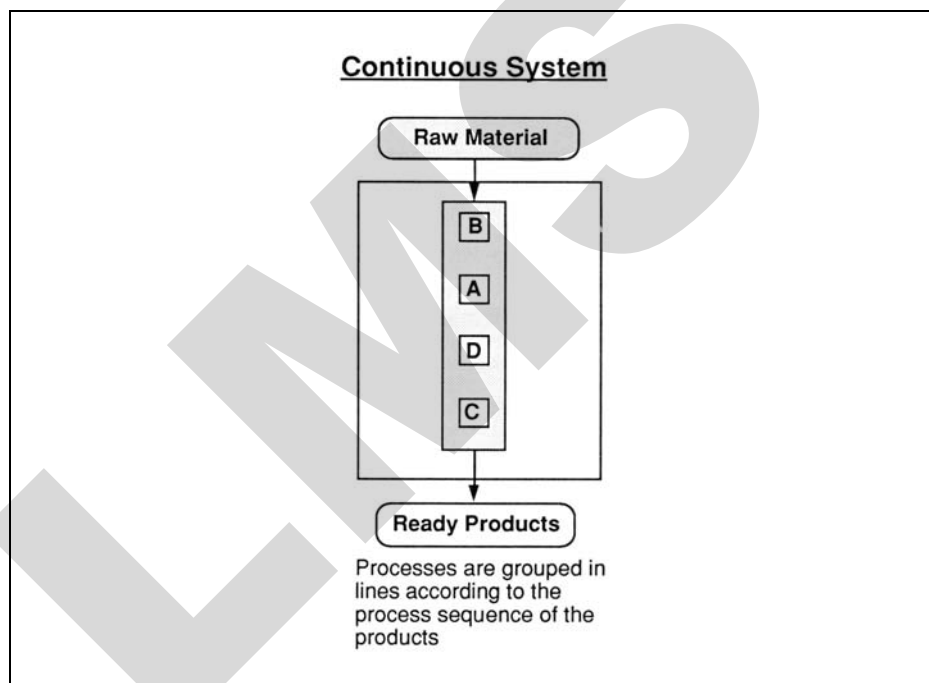
Σχήμα 5.5 Σχηματική Αναπαράσταση Ενός Παραγωγικού Συστήματος Τύπου Flowline

Οι μηχανές συνδέονται μεταξύ τους με συστήματα αυτόματου χειρισμού υλικού, όπως είναι οι μεταφορικές ταινίες (*conveyors*). Η κατασκευή μιας συνεχούς γραμμής παραγωγής προϋποθέτει, ότι οι αλληλουχίες των διεργασιών για

τα διαφορετικά εξαρτήματα είναι απόλυτα καθορισμένες και ότι ο αριθμός των υπο επεξεργασία εξαρτημάτων είναι μεγάλος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι το δυναμικό του διατεθειμένου εξοπλισμού θα χρησιμοποιηθεί πλήρως και δεν θα «σπαταληθεί» σε χρόνους προετοιμασίας των μηχανών για αλλαγές τύπου εξαρτημάτων.

5.1.1.5 Συνεχή Συστήματα Παραγωγής (Continuous Systems)

Σε αντίθεση με τους άλλους τύπους συστημάτων παραγωγής, τα οποία επεξεργάζονται εξαρτήματα, κατά κανόνα ηλεκτρομηχανολογικού χαρακτήρα, τα *συνεχή συστήματα (continuous systems)* παράγουν υγρά, αέρια ή προϊόντα σε μορφή σκόνης (Σχ. 5.6). Όπως και στην δομή Flow Line, οι διεργασίες, ταξινομούνται σύμφωνα με την αλληλουχία των διεργασιών των προϊόντων. Το σύστημα συνεχούς παραγωγής είναι αυτό που έχει την μικρότερη ευελιξία από όλους τους τύπους των συστημάτων παραγωγής.



Continuous System = Συνεχές Σύστημα
 Raw Material = Πρώτη Ύλη
 Ready Products = Έτοιμα Προϊόντα
 Processes are grouped in lines according to the

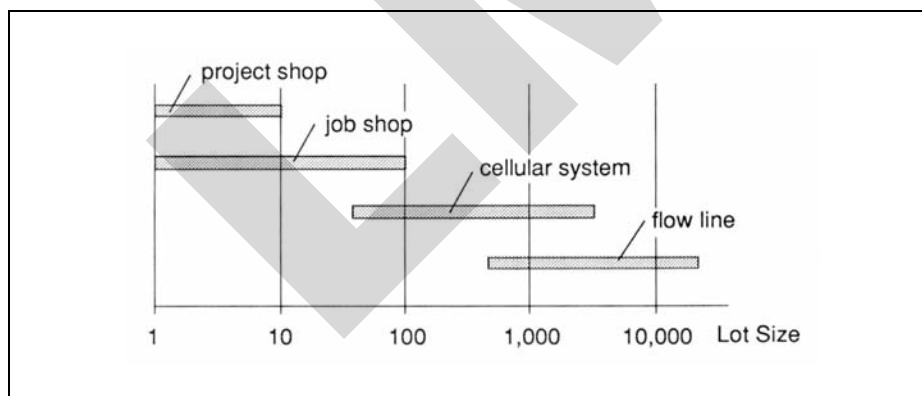
process sequence of the products = Οι διεργασίες είναι ομαδοποιημένες σε γραμμές παραγωγής σύμφωνα με την αλληλουχία των διεργασιών κατασκευής των προϊόντων

Σχήμα 5.6 Σχηματική Αναπαράσταση Ενός Συνεχούς Συστήματος Παραγωγής (Continuous System)

5.1.1.6 Οι τύποι συστημάτων παραγωγής σε σχέση με τον αριθμό των υπο επεξεργασία εξαρτημάτων

Στα πραγματικά συστήματα παραγωγής, οι δομές που παρουσιάστηκαν προηγούμενα, συνήθως εμφανίζονται σε συνδυασμούς ή με μικρές τροποποιήσεις. Η επιλογή της δομής/τύπου εξαρτάται από το σχέδιο του εξαρτήματος που πρόκειται να παραχθεί, από τον αριθμό των εξαρτημάτων αλλά και από εξωγενείς παράγοντες, όπως η απαίτηση για γρήγορη αντίδραση στις αλλαγές της αγοράς.

Γενικά, τα συστήματα παραγωγής τύπου *job shops* και *project shops* είναι καταλληλότερα για την παραγωγή μικρών παρτίδων εξαρτημάτων. Τα συστήματα παραγωγής τύπου *flow line* είναι κατάλληλα για την παραγωγή μεγάλων παρτίδων εξαρτημάτων και τα συστήματα κυψέλης είναι κατάλληλα για την παραγωγή παρτίδων εξαρτημάτων ενδιάμεσου μεγέθους (Σχ. 5.7). Τα συστήματα παραγωγής τύπου *job shop* είναι τα καταλληλότερα για μικρού όγκου παραγωγή πολλαπλών τύπων εξαρτημάτων, τα οποία είναι ανόμοια μεταξύ τους. Στα συστήματα αυτά υπάρχουν μηχανές γενικής χρήσης, ευέλικτες και με χειρωνακτικό χειρισμό του υλικού –που είναι ιδανικός για την περίπτωση αυτή. Τα συστήματα κυψέλης είναι καταλληλότερα για την παραγωγή παρτίδων μικρού έως μεσαίου μεγέθους και για τύπους εξαρτημάτων, τα οποία παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, ώστε να ομαδοποιούνται σε οικογένειες. Τα συστήματα παραγωγής τύπου *flow line* είναι καταλληλότερα για μεγάλο όγκο παραγωγής και για μεγάλες παρτίδες ενός συγκεκριμένου τύπου ή μερικών παρόμοιων τύπων εξαρτημάτων. Αυτό είναι συνέπεια των εξειδικευμένων μηχανών και του πλήρως αυτοματοποιημένου εξοπλισμού χειρισμού των υλικών (Πιν. 5.1).



Lot Size = Μέγεθος Παρτίδας

Σχήμα 5.7 Οι Τύποι Παραγωγικών Συστημάτων σε Σχέση με το Μέγεθος της Παρτίδας

	Type of System		
	Job Shop	Cellular	Flow Line
Part Type Similarity	Low	Medium	High
Production Volume	Low	Low-Medium	High

Type of System = Τύπος Συστήματος

Part Type Similarity = Ομοιότητα τύπου εξαρτημάτων

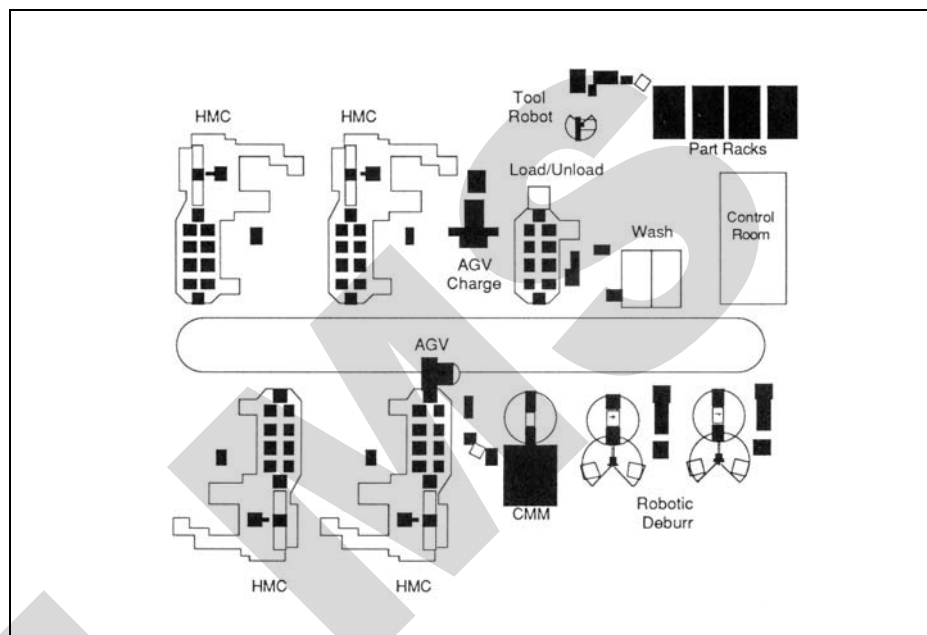
Production Volume = Όγκος (μέγεθος) Παραγωγής

Low = Χαμηλή

Medium = Μέσος, -η

High = Υψηλός, -ή

Πίνακας 5.1 Οι Βέλτιστες Συνθήκες Χρησιμοποίησης Διαφορετικών Τύπων Συστημάτων Παραγωγής



HMC (High Speed Machining Centre) = Κέντρο Κατεργασίας Υψηλής Ταχύτητας
 Tool Robot = Ρομπότ εργαλείων
 Load/Unload = Φόρτωση/Εκφόρτωση
 Part Racks = Χώροι αποθήκευσης εξαρτημάτων
 Control Room = Δωμάτιο Ελέγχου
 Wash = Πλύσιμο

AGV (Automatic Guided Vehicle) = Αυτόματα καθοδηγούμενα όχημα
 CMM (Coordinate Measurement Machine) = Μηχανή μέτρησης διαστάσεων
 Robotic Deburr = Ρομπότ για την απομάκρυνση ατελειών καταργασμένων ακμών ή επιφανειών (π.χ. μετά από κοπή, διάτρηση ή χύτευση)

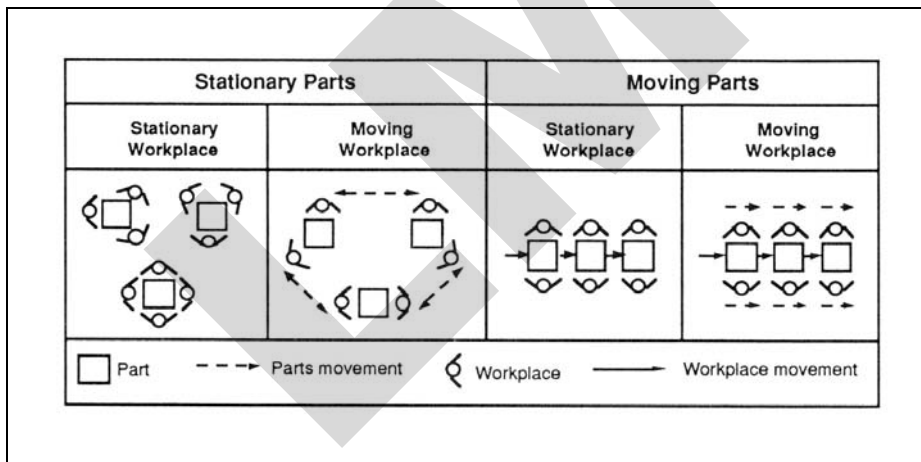
Σχήμα 5.8 Ένα Ευέλικτο Σύστημα Παραγωγής

Ένα παράδειγμα συστήματος παραγωγής, του οποίου η δομή είναι ο συνδυασμός των βασικών συστημάτων, αποτελεί το ευέλικτο σύστημα παραγωγής (Flexible Manufacturing System-FMS). Ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής (FMS) αποτελεί συνδυασμό ενός συστήματος παραγωγής τύπου *job shop* και

ενός συστήματος τύπου κυψέλης (Σχ. 5.8). Παρέχει ευελιξία ως προς τους τύπους των εξαρτημάτων που μπορεί να παραχθούν, καθώς και ως προς την αλληλουχία των διαδικασιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η ευελιξία αυτή είναι αποτέλεσμα του μεγάλου βαθμού αυτοματοποίησης του συστήματος. Η ροή των υλικών και των πληροφοριών μέσα στο σύστημα είναι ολοκληρωτικά αυτοματοποιημένη και δεν απαιτείται μεγάλη ανθρώπινη παρέμβαση.

5.1.1.7 Συστήματα Συναρμολόγησης

Ένας σημαντικός τομέας των παραγωγικών δραστηριοτήτων μιας κατασκευαστικής επιχείρησης, είναι το σύστημα συναρμολόγησης (assembly system). Τα συστήματα συναρμολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον τρόπο κίνησης μέσα στο σύστημα των εξαρτημάτων και των θέσεων εργασίας (Σχ. 5.9). Τα στατικά συστήματα (stationary part systems) χρησιμοποιούνται, συνήθως, για μεγάλες συναρμολογήσεις όπως τα αεροπλάνα, που είναι δύσκολο να μετακινηθούν. Τα συστήματα κινούμενου εξαρτήματος "moving part" χωρίζονται σε συστήματα σταθερών ή ακίνητων θέσεων εργασίας –όπου τα εξαρτήματα μεταφέρονται σε σταθερές θέσεις εργασίας– και σε συστήματα κινούμενης θέσης εργασίας –όπου οι θέσεις εργασίας μετακινούνται μαζί με τα εξαρτήματα. Τα συστήματα συναρμολόγησης με σταθερά μη κινούμενα εξαρτήματα έχουν, συνήθως, απαιτήσεις μεγάλου χώρου και τείνουν να έχουν περισσότερη εργασία σε κάθε θέση εργασίας απ' ότι τα συστήματα κινουμένων εξαρτημάτων.



Stationary Parts = Σταθερά Εξαρτήματα
 Moving Parts =Μετακινούμενα Εξαρτήματα
 Stationary Workplace = Σταθερή θέση Εργασίας
 Moving Workplace = Μετακινούμενη θέση Εργασίας
 Part = Εξάρτημα
 Parts movement = Κίνηση εξαρτημάτων
 Workplace =Θέση εργασίας
 Workplace movement =Κίνηση θέσης Εργασίας

Σχήμα 5.9 Τύποι Συστημάτων Συναρμολόγησης

	Stationary Parts		Moving parts	
	Stationary Workplace	Moving Workplace	Stationary Workplace	Moving Workplace
Area Requirement	High	High	Low	Medium
Work Content at Each Workplace	High	Medium	Low	Medium
Cost of System	Low	Medium	High	High

Stationary Parts = Σταθερά Εξαρτήματα
 Moving Parts = Μετακινούμενα Εξαρτήματα
 Stationary Workplace = Σταθερή θέση Εργασίας
 Moving Workplace = Μετακινούμενη θέση Εργασίας

Area Requirement = Απαιτήσεις Επιφανείας
 Work Content at Each Workplace = Ποσότητα Εργασίας σε κάθε θέση Εργασίας
 Cost of System = Κόστος Συστήματος

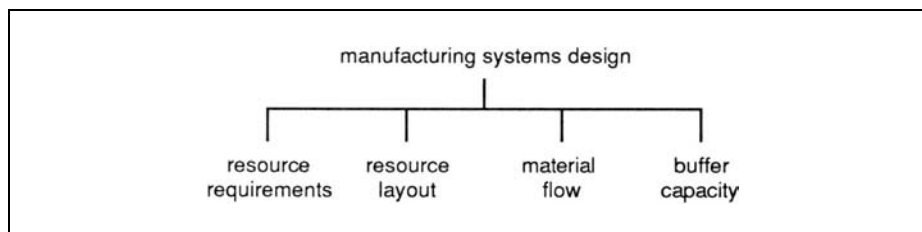
Πίνακας 5.2 Τα Χαρακτηριστικά των Διαφορετικών Συστημάτων Συναρμολόγησης

Αυτό οφείλεται, κυρίως, στο γεγονός, ότι τα εξαρτήματα, που συναρμολογούνται σε συστήματα "σταθερής θέσης εργασίας", είναι συνήθως μεγάλα. Τα συστήματα "κινούμενων εξαρτημάτων" είναι γενικά ακριβότερα, επειδή χρειάζονται πολύπλοκους μηχανισμούς χειρισμού εξαρτημάτων, οι οποίοι θα μετακινούν τα εξαρτήματα γρήγορα από θέση εργασίας σε θέση εργασίας (Πιν. 5.2). Στα συστήματα κινούμενου εξαρτήματος-σταθερής θέσης εργασίας, η διαδικασία συναρμολόγησης σε κάθε θέση εργασίας είναι, συνήθως, μικρή σε χρονική διάρκεια και επαναλαμβανόμενη σε τακτά χρονικά συστήματα. Τα συστήματα κινούμενου εξαρτήματος-κινούμενης θέσης εργασίας επιτρέπουν στους εργαζόμενους να εργάζονται σε κάθε συναρμολόγηση για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, κάνοντας την εργασία συναρμολόγησης λιγότερο επαναληπτική.

5.1.2 Ακαδημαϊκή Έρευνα και Προοπτικές στη Βιομηχανία (Academic Versus Industrial Perspectives)

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις, όσον αφορά την διαδικασία της σχεδίασης των συστημάτων παραγωγής. Στην ακαδημαϊκή έρευνα, το πρόβλημα της σχεδίασης ενός συστήματος παραγωγής, συνήθως, αναλύεται σε υπο-προβλήματα, τα οποία είναι λιγότερο πολύπλοκα και μπορούμε να τα χειριστούμε ξεχωριστά (Σχ. 5.10). Τα υπο-προβλήματα αυτά απλοποιούνται με την βοήθεια διαφόρων παραδοχών. Με την εφαρμογή διαφόρων προσεγγίσεων γίνεται προσπάθεια να βρεθούν βέλτιστες λύσεις στα προβλήματα αυτά. Ωστόσο, ακόμη και αυτά τα απλοποιημένα προβλήματα είναι συνήθως *Non-Polynomial-hard*, που σημαίνει, ότι ο απαιτούμενος χρόνος για την εύρεση της βέλτιστης λύσης αυξάνεται εκθετικά καθώς το μέγεθος του προβλήματος αυξάνεται γραμμικά.

Ένα από τα υποπροβλήματα, είναι το πρόβλημα του προσδιορισμού των απαιτούμενων πόρων (resource requirements problem). Το πρόβλημα αυτό αφορά στον προσδιορισμό του κατάλληλου αριθμού από κάθε τύπο παραγωγικών πόρων (για παράδειγμα μηχανές ή παλέτες) μέσα σε ένα σύστημα παραγωγής. Το κριτήριο βασίζεται συνήθως στο κόστος, όπως η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της επένδυσης ή βασίζεται στον χρόνο, όπως η μεγιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής.



Manufacturing systems design = Σχεδιασμός Συστημάτων Παραγωγής
 Resource requirements = Απαιτήσεις πόρων
 Resource layout = Χωροταξική τοποθέτηση πόρων

Material flow = Ροή Υλικών
 Buffer capacity = Χωρητικότητα αποθηκευτικών χώρων

Σχήμα 5.10 Τα Υπο-προβλήματα Σχεδιασμού των Συστημάτων Παραγωγής

Το πρόβλημα της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων (resource layout problem) ανάγεται στο πρόβλημα τοποθέτησης ενός συνόλου πόρων σ' έναν σταθερό και περιορισμένο χώρο του συστήματος παραγωγής. Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνδυασμού του κόστους χειρισμού των πρώτων υλών, του χρόνου των μετακινήσεων και του κόστους επανατοποθέτησης των μηχανών παραγωγής.

Στα προβλήματα ροής των υλικών (material flow problems) στόχος είναι ο προσδιορισμός ενός συστήματος χειρισμού υλικών τέτοιο, ώστε να βελτιστοποιείται συνδυασμένα η ευελιξία, το κόστος, ο ρυθμός παραγωγής και η αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής.

Το πρόβλημα της χωρητικότητας των αποθηκευτικών χώρων (buffer capacity) ενός συστήματος παραγωγής σχετίζεται με τον προσδιορισμό των εξαρτημάτων που παραμένουν για επεξεργασία στους αποθηκευτικούς χώρους (buffers) του συστήματος ή τον αριθμό των εξαρτημάτων που μπορούν να αποθηκευθούν σ' αυτούς. Υψηλός αριθμός εξαρτημάτων προς επεξεργασία μεγιστοποιεί την χρήση της μηχανής και του ρυθμού παραγωγής, αλλά παράλληλα αυξάνει το κόστος των αποθεμάτων και του χώρου του συστήματος. Σκοπός είναι να προσδιορισθεί ο βέλτιστος συνδυασμός της ωφέλειας και του κόστους, τα οποία είναι αντικρουόμενα κριτήρια.

Η πιο συχνή προσέγγιση σχεδιασμού, που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία, είναι η τεχνική *δοκιμής και λάθους* (trial and error), η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Αρχικός σχεδιασμός συστήματος παραγωγής (αρχικός προσδιορισμός των τιμών για ένα σύνολο μεταβλητών).
2. Αξιολόγηση των δεικτών απόδοσης του συστήματος. Εάν ικανοποιούν τις απαιτήσεις απόδοσης, τότε παύει η διαδικασία σχεδίασης, διαφορετικά επιστρέφουμε στο προηγούμενο βήμα.

Στην πραγματικότητα, κατά τον σχεδιασμό ενός μεγάλου και πολύπλοκου συστήματος παραγωγής μπορεί να χρειασθούν πολλές επαναλήψεις της παραπάνω διαδικασίας. Η επιτυχία της προσέγγισης *δοκιμής-λάθους* βασίζεται περισσότερο στην ικανότητα του σχεδιαστή ή στην ικανότητα αυτού που θα υλοποιήσει το βήμα 1. Η διαίσθηση και οι κανόνες, που προκύπτουν από την προηγούμενη εμπειρία, συχνά βοηθούν στον σωστό και γρήγορο σχεδιασμό του συστήματος.

Ωστόσο, υπάρχουν και γενικές οδηγίες για την διαδικασία σχεδιασμού. Το πρώτο βήμα σ' αυτές τις οδηγίες είναι ο προσδιορισμός των στόχων του συστήματος. Οι στόχοι αυτοί διαφέρουν από εταιρεία σε εταιρεία, αλλά οι σχεδιαστές στην βιομηχανία έχουν καταλήξει, ότι οι οικονομικοί στόχοι (economic objectives), όπως η απόδοση της επένδυσης (return on investment), είναι οι σημαντικότεροι, ενώ ακολουθούν η αποτελεσματική χρήση των πόρων (efficient use of resources) και η ευελιξία του συστήματος (system flexibility).

Το δεύτερο βήμα είναι η λεπτομερής ανάπτυξη των απαιτήσεων του συστήματος και των περιορισμών, ιδιαίτερα ο καθορισμός των τύπων των μηχανών, οι οποίες είναι κατάλληλες για τις κατεργασίες των συγκεκριμένων εξαρτημάτων που πρόκειται να παραχθούν. Προσδιορίζονται, ακολούθως, οι διαθέσιμοι χώροι του εργοστασίου και ο ήδη υπάρχων εξοπλισμός που μπορούν να ενσωματωθούν στο νέο σύστημα.

Με βάση τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς αναπτύσσεται ένας αριθμός εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής. Αυτά στην συνέχεια αξιολογούνται με βάση κάποια προκαθορισμένα σενάρια. Η βάση αυτών των σεναρίων είναι ένα μακροπρόθεσμο επιχειρησιακό σχέδιο (*Long-range business plan*), το οποίο περιλαμβάνει προβλέψεις της ζήτησης των προϊόντων που πρόκειται να παραχθούν από το σύστημα.

Παρ' όλο που υπάρχουν γενικά αποδεκτές οδηγίες σχεδιασμού, ένας σχεδιασμός συστήματος παραγωγής σπάνια εφαρμόζεται ολοκληρωτικά στην πράξη όπως τούτος είχε αρχικά σχεδιασθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι κάποια σενάρια μπορούν ν' αλλάξουν δραστικά τις απαιτήσεις ενός συστήματος παραγωγής, από την στιγμή που τούτο θα σχεδιασθεί έως ότου παραχθεί το πρώτο εξάρτημα:

1. Το τμήμα των νέων προϊόντων "ανακοινώνει" την παραγωγή νέου προϊόντος, καθώς και διάφορες νέες εναλλακτικές προτάσεις για τα προϊόντα που ήδη υπάρχουν.
2. Το τμήμα Πωλήσεων λαμβάνει υπ' όψη τα νέα προϊόντα και τα τελευταία στατιστικά στοιχεία και προτείνει σημαντικές τροποποιήσεις στις

προβλέψεις της παραγωγής.

3. Οι μηχανικοί παραγωγής προσδιορίζουν τις νέες διαδικασίες που απαιτούνται, όπως επίσης και τον νέο εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση των διαδικασιών αυτών.
4. Το τμήμα τεχνολογικού προγραμματισμού της παραγωγής ανακαλύπτει προγράμματα παραγωγής που χρησιμοποιούν νέα υλικά. Οι μέθοδοι επεξεργασίας θα αλλάξουν, αλλά προς το παρόν δεν είναι γνωστό το πώς ακριβώς θα πραγματοποιηθούν οι αλλαγές αυτές.
5. Το τμήμα συσκευασίας τονίζει ότι οι τεχνικές, που χρησιμοποιούνται προς το παρόν, προκαλούν ζημιές στα προϊόντα. Εισάγεται μια νέα μέθοδος συσκευασίας.

Ο σχεδιασμός του συστήματος παραγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνεχής, κυκλική δραστηριότητα, στην οποία εμπλέκονται ο προσδιορισμός των στόχων του συστήματος, η ανάπτυξη των απαιτήσεων και των περιορισμών του συστήματος και η εφαρμογή του σχεδιασμού. Γενικά, όσο περισσότερη είναι η τεχνολογία των παραγόμενων προϊόντων και χαμηλότερο το κόστος επένδυσης στο σύστημα παραγωγής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο επιβαλλόμενος ρυθμός αλλαγής του συστήματος παραγωγής.

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα για το πρόβλημα σχεδιασμού του συστήματος παραγωγής:

1. Συχνά, οι στόχοι ενός συστήματος παραγωγής είτε δεν προσδιορίζονται πολύ καλά την χρονική στιγμή που πρέπει να δημιουργηθεί το σύστημα παραγωγής ή την χρονική στιγμή που απαιτείται η προσαρμογή τούτου σε αλλαγές. Επομένως, η ευελιξία στον σχεδιασμό είναι πολύ σημαντική.
2. Τα δεδομένα, που αναφέρονται στους πόρους του συστήματος παραγωγής, όπως οι μηχανές και τα συστήματα χειρισμού των υλικών είναι ανακριβή, ειδικά, εάν οι διαδικασίες είναι νέες.

Αυτή η αοριστία των δεδομένων, που εισάγονται στην διαδικασία σχεδίασης του συστήματος παραγωγής, δυσκολεύει την βελτιστοποίηση. Η αοριστία αυτή καθιστά δύσκολη την προσπάθεια βελτιστοποίησης με την χρήση αυστηρών μαθηματικών μεθόδων.

5.2 Μέθοδοι και Εργαλεία

Η θεμελιώδης διαδικασία στον σχεδιασμό είναι η λήψη αποφάσεων: ο σχεδιασμός ενός συστήματος παραγωγής αποτελεί την διαδικασία επιλογής των τιμών των μεταβλητών αποφάσεων για τον σχεδιασμό του παραγωγικού συστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται ορισμένες μέθοδοι και εργαλεία

που είναι χρήσιμα στην λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής. Έμφαση δίδεται στην περιγραφή των μεθόδων και των τεχνικών του σχεδιασμού, ενώ συγκεκριμένες εφαρμογές του σχεδιασμού των συστημάτων παραγωγής συζητούνται στο εδάφιο 5.3.

Οι μέθοδοι και τα εργαλεία για τον σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής χωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες: *Επιχειρησιακή έρευνα (Operations Research)*, *Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)* και *Προσομοίωση (Simulation)*. Ο διαχωρισμός μεταξύ αυτών των κατηγοριών δεν είναι σαφής. Για παράδειγμα, η προσομοίωση συχνά θεωρείται ότι είναι εργαλείο της επιχειρησιακής έρευνας, ενώ τα μαθηματικά προγράμματα της επιχειρησιακής έρευνας λύνονται με την βοήθεια τεχνικών «αναζήτησης» (search) που κατά κανόνα είναι αντικείμενο της τεχνητής νοημοσύνης. Ως εκ τούτου, ο παραπάνω διαχωρισμός είναι μάλλον σχηματικός και σαν στόχο του έχει την διευκόλυνση της ταξινόμησης των μεθόδων, αφού στην πραγματικότητα οι τελευταίες αλληλοκαλύπτονται σημαντικά.

5.2.1 Επιχειρησιακή Έρευνα (Operations Research)

Μαθηματικός Προγραμματισμός (Mathematical Programming)

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός είναι μια οικογένεια τεχνικών, με στόχο την βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση) μιας αλγεβρικής αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) ως προς τις μεταβλητές των αποφάσεων (decision variables) [9]. Οι μεταβλητές των αποφάσεων μπορεί είτε να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ή να συσχετίζονται μέσω περιορισμών.

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός επιλύει προβλήματα της μορφής:

Ελαχιστοποίηση ή Μεγιστοποίηση της

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5-1)$$

Υποκείμενη στους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \diamond b_1 \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \diamond b_2 \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \diamond b_m \end{aligned}$$

όπου το σύμβολο \diamond δηλώνει μια από τις σχέσεις \leq , $=$ ή \geq (χωρίς να είναι απαραίτητο όλοι οι περιορισμοί να έχουν την ίδια σχέση). Η διατύπωση κάθε προβλήματος στην πιο πάνω μορφή ονομάζεται μαθηματικό πρόγραμμα (mathematical program). Πολλά προβλήματα σχετικά με τον σχεδιασμό και την λειτουργία των συστημάτων παραγωγής είναι δυνατόν να διατυπωθούν με

την παραπάνω μορφή, ώστε να καθίσταται δυνατή η χρήση τυποποιημένων αλγορίθμων στην επίλυση μαθηματικών προγραμμάτων.

Όταν αναφερόμεθα σε ένα μαθηματικό πρόγραμμα, ο όρος *σημείο (point)* σημαίνει ένα σύνολο τιμών για τις μεταβλητές αποφάσεων x_1, x_2, \dots, x_n του προγράμματος. Η *εφικτή περιοχή (feasible region)* είναι το σύνολο όλων των σημείων που ικανοποιούν τους περιορισμούς των προγράμματος.

Στόχον του μαθηματικού προγραμματισμού αποτελεί η εύρεση της *βέλτιστης λύσης (optimal solution)*, δηλαδή, η εύρεση του σημείου εκείνου εντός της εφικτής περιοχής, το οποίο ελαχιστοποιεί (στην περίπτωση προβλήματος ελαχιστοποίησης) ή μεγιστοποιεί (στην περίπτωση προβλήματος μεγιστοποίησης) την αντικειμενική συνάρτηση.

Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)

Ένα μαθηματικό πρόγραμμα καλείται *γραμμικό πρόγραμμα (linear program)* εάν η αντικειμενική συνάρτηση, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, καθώς και κάθε συνάρτηση περιορισμού, $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, είναι γραμμικές ως προς τα ορίσματά τους [9]. Επομένως ένα γραμμικό πρόγραμμα έχει την μορφή:

Ελαχιστοποίηση ή Μεγιστοποίηση της

$$c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (5-2)$$

Υποκείμενη στους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1n}x_n &\diamond b_1 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \alpha_{m1}x_1 + \alpha_{m2}x_2 + \dots + \alpha_{mn}x_n &\diamond b_m \end{aligned}$$

όπου και πάλι το σύμβολο \diamond δηλώνει μια από τις σχέσεις \leq , $=$ ή \geq . Κάθε μαθηματικό πρόγραμμα που δεν είναι γραμμικό πρόγραμμα καλείται *μη γραμμικό (nonlinear)*. Η διατύπωση και η επίλυση των μη γραμμικών προγραμμάτων αποτελεί αντικείμενο του *μη γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear programming)*.

Κατά την διατύπωση και επίλυση ενός γραμμικού προγράμματος [9] γίνεται ένας αριθμός υποθέσεων, όπως :

Η υπόθεση Αναλογικότητας (The proportionality Assumption). Η συμμετοχή της κάθε μεταβλητής απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση και στο αριστερό μέρος κάθε περιορισμού, είναι ανάλογη της τιμής της μεταβλητής απόφασης.

Η υπόθεση Προσθετικότητας (Additivity Assumption). Η συμμετοχή της κάθε μεταβλητής απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση και

στο αριστερό μέρος κάθε περιορισμού είναι ανεξάρτητη από τις τιμές που έχουν οι άλλες μεταβλητές αποφάσεων.

Η υπόθεση της Διαιρετότητας (The Divisibility Assumption). Οι μεταβλητές των αποφάσεων είναι δυνατόν να πάρουν κάθε πραγματική τιμή.

Η υπόθεση της Βεβαιότητας (The Certainty Assumption). Όλοι οι συντελεστές c_i και a_{ij} και όλες οι σταθερές b_i που βρίσκονται στο δεξιό μέρος των περιορισμών είναι γνωστές με βεβαιότητα.

Επίλυση Γραμμικών Προγραμμάτων

Ένα γραμμικό πρόγραμμα έχει *κανονική μορφή (standard form)*, εάν όλοι οι περιορισμοί μοντελοποιούνται ως ισότητες και όλες οι μεταβλητές των αποφάσεων να είναι μη αρνητικές. Είναι σημαντική η εξοικείωση με την κανονική μορφή, επειδή οι περισσότερες μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού απαιτούν την διατύπωση των προβλημάτων στην μορφή αυτή. Στην κανονική μορφή, κάθε μεταβλητή απόφασης (έστω η x_1), που δεν υπόκειται στον περιορισμό να είναι μη αρνητική, αντικαθίσταται από την διαφορά δύο νέων μεταβλητών (έστω των x_2, x_3) η οποία υπόκειται στον περιορισμό αυτόν.

Ένας περιορισμός της μορφής $\alpha_{i1}x_1 + \alpha_{i2}x_2 + \dots + \alpha_{ij}x_3 + \dots + \alpha_{in}x_n \leq b_i$ μπορεί να διατυπωθεί ως ισότητα προσθέτοντας μια *μεταβλητή άρσης της ανισότητας (slack variable)* στο αριστερό μέρος. Για παράδειγμα, ο περιορισμός

$$3x_1 + 5x_2 - 8x_3 \leq 100.000$$

μπορεί να διατυπωθεί ως

$$3x_1 + 5x_2 - 8x_3 + s_1 = 100.000$$

Ένας περιορισμός της μορφής $\alpha_{i1}x_1 + \alpha_{i2}x_2 + \dots + \alpha_{ij}x_3 + \dots + \alpha_{in}x_n \geq b_i$ μπορεί να διατυπωθεί ως ισότητα αφαιρώντας μια μεταβλητή (*excess variable*) (η οποία καλείται επίσης και *πλεονάζουσα μεταβλητή -surplus variable*) από το αριστερό μέρος. Για παράδειγμα, ο περιορισμός

$$8x_1 - 7x_2 + 2x_3 \geq 50.000$$

μπορεί να μετατραπεί σε

$$8x_1 - 7x_2 + 2x_3 - e_i = 50.000$$

Η επίλυση ενός γραμμικού προγράμματος απαιτεί μια αρχική, εφικτή και μη αρνητική λύση, η οποία ονομάζεται *βασική εφικτή λύση (basic feasible solution)* [10]. Η μέθοδος για την δημιουργία μιας τέτοιας λύσης απαιτεί την ύπαρξη μιας νέας μεταβλητής, που καλείται *τεχνητή μεταβλητή (artificial variable)*, η οποία θα προστεθεί στο αριστερό μέρος κάθε εξίσωσης περιορισμού που δεν περιέχει μία *μεταβλητή άρσης της ανισότητας (slack variable)*.

Επομένως, κάθε περιορισμός θα περιέχει είτε μια *μεταβλητή άρσης της ανισότητας* (*slack variable*) είτε μια *τεχνητή μεταβλητή* (*artificial variable*). Η βασική εφικτή λύση επιτυγχάνεται θέτοντας, αφ' ενός κάθε *μεταβλητή άρσης της ανισότητας* και κάθε *τεχνητή μεταβλητή* ίση με το δεξιό μέρος του περιορισμού, στον οποίο εμφανίζονται και αφ' ετέρου όλες τις άλλες μεταβλητές ίσες με το μηδέν.

Για παράδειγμα, οι περιορισμοί του γραμμικού προγράμματος

Μεγιστοποίησης της

$$6x_1 + 8x_2$$

Υποκείμενη στους περιορισμούς:

$$x_1 + 2x_2 \leq 9$$

$$3x_1 - x_2 \geq 7$$

$$x_1 + 4x_2 = 10$$

μπορεί να μετατραπεί σε κανονική μορφή προσθέτοντας μια *μεταβλητή άρσης της ανισότητας* (*slack variable*) s_3 στο αριστερό μέρος του πρώτου περιορισμού, μια *πλεονάζουσα μεταβλητή* (*excess variable*) e_4 και μια *τεχνητή μεταβλητή* (*artificial variable*) v_5 στο αριστερό μέρος του δεύτερου περιορισμού, καθώς και μια *τεχνητή μεταβλητή* (*artificial variable*) v_6 στο αριστερό μέρος του τρίτου περιορισμού:

$$x_1 + 2x_2 + s_3 = 9$$

$$3x_1 - x_2 \dots - e_4 + v_5 = 7$$

$$x_1 + 4x_2 \dots + v_6 = 10$$

Η αρχική βασική εφικτή λύση, η οποία προκύπτει, είναι η $s_3 = 9$, $v_5 = 7$, $v_6 = 10$ και $x_1 = x_2 = e_4 = 0$. Παρατηρείται ωστόσο, ότι το σημείο $x_1 = x_2 = 0$ δεν ικανοποιεί τους αρχικούς περιορισμούς, κάτι που είναι λογικό και δεν δημιουργεί πρόβλημα. Για την μετατροπή του αρχικού προβλήματος σε πρόβλημα κανονικής μορφής, προκειμένου να εφαρμοσθούν τυποποιημένες διαδικασίες επίλυσης, απαιτήθηκε η διεύρυνση του γραμμικού προγράμματος από δύο μεταβλητές (x_1, x_2) σε έξι μεταβλητές $(x_1, x_2, s_3, e_4, v_5, v_6)$.

Ενώ, οι μεταβλητές άρσης της ανισότητας (*slack variable*) και πλεονάζουσα (*excess variable*) δεν μεταβάλλουν το νόημα των αρχικών περιορισμών, αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση των τεχνητών μεταβλητών. Μια λύση του διευρυμένου προβλήματος θα ικανοποιεί τους περιορισμούς του αρχικού προβλήματος μόνο εάν οι τιμές όλων των τεχνητών μεταβλητών είναι μηδενικές. Για να εξασφαλισθεί αυτό, η αντικειμενική συνάρτηση μετατρέπεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να κάνει την αντιστοίχιση κάθε μη μηδενικής τιμής σε μια τεχνητή μεταβλητή μη βέλτιστη. Στα προβλήματα ελαχιστοποίησης, οι τεχνη-

τές μεταβλητές ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση με ένα πολύ μεγάλο θετικό συντελεστή $+M$. Στα προβλήματα μεγιστοποίησης, χρησιμοποιείται ένας πολύ μεγάλος αρνητικός συντελεστής $-M$. Για παράδειγμα, η αντικειμενική συνάρτηση του παραπάνω παραδείγματος θα μπορούσε να γίνει:

$$6x_1 + 8x_2 - Mv_5 - Mv_6$$

Εάν η v_5 ή η v_6 έπρεπε να είναι μη μηδενικές, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα έπρεπε να μειωθεί σημαντικά από τους όρους που έχουν συντελεστή $-M$.

Με την βοήθεια μητρών [10], η κανονική μορφή του γραμμικού προγράμματος είναι

Βελτιστοποίηση της

$$\mathbf{z} = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (5-3)$$

Υποκείμενη στους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\ \text{με } \mathbf{x} &\geq 0 \end{aligned}$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα άγνωστων μεταβλητών, αποτελούμενο από όλες τις αρχικές μεταβλητές αποφάσεων x_1, x_2, \dots, x_n , όλες τις μεταβλητές s_1 , όλες τις μεταβλητές e_i , καθώς και όλες τις τεχνητές μεταβλητές v_i . Το διάνυσμα \mathbf{c} περιέχει όλους τους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο πίνακας \mathbf{A} περιλαμβάνει τους συντελεστές των περιορισμών και το διάνυσμα \mathbf{b} περιλαμβάνει τις τιμές που βρίσκονται στο δεξιό μέρος των περιορισμών. Ορίζουμε επιπλέον, να είναι το \mathbf{x}_0 ένα διάνυσμα με αγνώστους τις μεταβλητές άρσης της ανισότητας και τις τεχνητές μεταβλητές –με την σειρά που εμφανίζονται στους περιορισμούς– και \mathbf{c}_0 να είναι ένα διάνυσμα που να περιλαμβάνει τους συντελεστές των μεταβλητών της αντικειμενικής συνάρτησης στο σημείο \mathbf{x}_0 . Η αρχική βασική εφικτή λύση, που απαιτείται για την λύση του γραμμικού προγράμματος, δίδεται από την σχέση $\mathbf{x}_0 = \mathbf{b}$, όπου φυσικά όλες οι μεταβλητές που δεν βρίσκονται στο \mathbf{x}_0 –δηλαδή, οι αρχικές μεταβλητές των αποφάσεων και οι πλεονάζουσες μεταβλητές– τίθενται ίσες με μηδέν.

Η μέθοδος, που εφαρμόζεται ευρέως για την επίλυση των γραμμικών προγραμμάτων, είναι η μέθοδος *simplex*, με την οποία επιλύονται τα γραμμικά προγράμματα με κανονική μορφή (Εξ. 5-3) για τα οποία είναι γνωστή μια βασική εφικτή λύση [10]. Ξεκινώντας από την λύση αυτή, η μέθοδος εντοπίζει διαδοχικά άλλες βασικές εφικτές λύσεις, οι οποίες δίδουν καλύτερες τιμές για την αντικειμενική συνάρτηση, έως ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Η μέθοδος *simplex* είναι πιο εύκολο να περιγραφεί με την βοήθεια ενός πίνακα που περιέχει τις μεταβλητές, τις τιμές των μεταβλητών και τους συντελεστές. Ο πίνακας αυτός καλείται πίνακας *simplex* (Σχ. 5.11). Όπως φαίνεται παρακάτω, ο πίνακας εφαρμόζεται μόνο σε προβλήματα μεγιστοποίησης. Για

τα προβλήματα ελαχιστοποίησης, ο πίνακας γράφεται με τα πρόσημα της τελευταίας γραμμής αντεστραμμένα. Επομένως οι όροι της τελευταίας γραμμής θα είναι $(\mathbf{c}^T - \mathbf{c}_0^T \mathbf{A})$ και $-\mathbf{c}_0^T \mathbf{b}$, αντίστοιχα.

	\mathbf{x}^T	
\mathbf{x}_0	\mathbf{A}	\mathbf{b}
	$\mathbf{c}_0^T \mathbf{A} - \mathbf{c}^T$	$\mathbf{c}_0^T \mathbf{b}$

Σχήμα 5.11 Ο Πίνακας Simplex (Simplex Tableau) για Προβλήματα Μεγιστοποίησης

Ακολουθεί η περιγραφή βημάτων επίλυσης με την μέθοδο simplex. Θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα από ένα πραγματικό πρόβλημα για την παρουσίαση του κάθε βήματος της μεθόδου. Το πρόβλημα, που θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα, είναι το ακόλουθο [10]:

Ελαχιστοποίηση της

$$z = x_1 + 9x_2 + x_3$$

Υποκείμενη στους περιορισμούς:

$$x_1 + 2x_2 + 3x_3 \leq 9$$

$$3x_1 + 2x_2 + 3x_3 \leq 15,$$

όπου όλες οι μεταβλητές είναι μη αρνητικές.

Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να διατυπωθεί σε κανονική μορφή εισάγοντας τις μεταβλητές άρσης της ανισότητας s_1 και s_2 (slack variables) στην πρώτη και δεύτερη ανισότητα, αντίστοιχα. Τότε οι περιορισμοί γίνονται:

$$x_1 + 2x_2 + 3x_3 + s_1 = 9$$

$$3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + s_2 = 15$$

Μπορούμε να ορίσουμε:

$$\mathbf{x} \equiv [x_1, x_2, x_3, s_1, s_2]^T, \quad \mathbf{c} \equiv [1, 9, 1, 0, 0]^T$$

$$\mathbf{A} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} \equiv \begin{bmatrix} 9 \\ 15 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_0 \equiv \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_0 \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Οπότε, ο αρχικός πίνακας Simplex (Σχ. 5.11) γίνεται

	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	
s_1	1	2	3	1	0	9
s_2	3	2	2	0	1	15
	-1	-9	-1	0	0	0

Ας αριθμήσουμε τις σειρές του πίνακα από 1,..., 4 από πάνω προς τα κάτω. Ας αριθμήσουμε τις στήλες του πίνακα από 1,...,7, από αριστερά προς τα δεξιά. Τα βήματα της μεθόδου simplex είναι, τότε, τα ακόλουθα:

Βήμα 1 Εντοπίστε τον μεγαλύτερο αρνητικό αριθμό στην τελευταία σειρά του πίνακα simplex, εκτός της τελευταίας στήλης και ονομάστε την στήλη, στην οποία εμφανίζεται ο αριθμός αυτός, *στήλη εργασίας (work column)*. Εάν υπάρχουν περισσότεροι του ενός υποψήφιοι αρνητικοί αριθμοί, επιλέξτε έναν.

Στο παράδειγμα, ο μεγαλύτερος αρνητικός αριθμός είναι ο -9 (που σημειώνεται με κύκλο παρακάτω) και η στήλη 3, στην οποία βρίσκεται ο αριθμός αυτός, είναι η στήλη εργασίας.

	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	
s_1	1	2	3	1	0	9
s_2	3	2	2	0	1	15
	-1	-9	-1	0	0	0

Στήλη Εργασίας

Βήμα 2 Σχηματίστε τους λόγους διαιρώντας τους θετικούς αριθμούς της στήλης εργασίας με τους αντίστοιχους αριθμούς που βρίσκονται στην ίδια σειρά και στην τελευταία στήλη, εκτός της τελευταίας σειράς. Επιλέξτε, ως *οδηγό στοιχείο (pivot element)* του πίνακα, το στοιχείο της στήλης εργασίας που έχει τον *μικρότερο* λόγο. Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα τέτοια στοιχεία με τον ίδιο λόγο, επιλέξτε ένα. Εάν κανένα στοιχείο της στήλης εργασίας δεν είναι θετικό, το πρόβλημα δεν έχει λύση.

Στο παράδειγμα, οι λόγοι που δημιουργούνται είναι $9/2 = 4,5$ και $15/2 = 7,5$.

Αφού το 4.5 είναι ο μικρότερος λόγος, ο αριθμός 2 στην γραμμή 2 της στήλης 3 (που σημειώνεται με κύκλο) ορίζεται ως το οδηγό στοιχείο.

	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	
s_1	1	2	3	1	0	9
s_2	3	2	2	0	1	15
	-1	-9	-1	0	0	0

Οδηγό Στοιχείο

Βήμα 3 Με την εφαρμογή απλών αλγεβρικών πράξεων τροποποιείτε το οδηγό στοιχείο σε 1 και στην συνέχεια ελαττώστε όλα τα άλλα στοιχεία της στήλης εργασίας σε 0. (Μια απλή αλγεβρική πράξη μπορεί να είναι είτε ο πολλαπλασιασμός μιας γραμμής με μια σταθερά ή η πρόσθεση δυο γραμμών).

Για να μετατραπεί το οδηγό στοιχείο σε 1, χρησιμοποιούμε την πράξη *σειρά 2'* = $1/2 \times \text{σειρά } 2$. Όπου προκύπτει *σειρά 2'* = $[1/2 \dots 1 \dots 3/2 \dots 1/2 \dots 0 \dots | \dots 9/2]$. Για την μετατροπή των άλλων στοιχείων της στήλης εργασίας σε 0, χρησιμοποιούμε την πράξη *σειρά 3'* = *σειρά 3* - *σειρά 2*, η οποία δίνει *σειρά 3'* = $[2 \dots 0 \dots -1 \dots -1 \dots 1 \dots | \dots 6]$, και την πράξη *σειρά 4'* = *σειρά 4* + $9/2 \times \text{σειρά } 1$, η οποία δίνει *σειρά 4'* = $[7/2 \dots 0 \dots 25/2 \dots 9/2 \dots 0 \dots | \dots 81/2]$.

	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	
s_1	1/2	1	3/2	1/2	0	9/2
s_2	3	0	-1	-1	1	6
	7/2	0	25/2	9/2	0	81/2

Οδηγό Στοιχείο

Βήμα 4 Αντικαταστήστε την μεταβλητή της σειράς οδηγού και της πρώτης στήλης, με την μεταβλητή της πρώτης σειράς και της στήλης οδηγού. Αυτή η νέα πρώτη στήλη αποτελεί το νέο σύνολο των βασικών μεταβλητών.

Στο παράδειγμα, η μεταβλητή της σειράς οδηγού (σειρά 2) και της πρώτης

στήλης είναι η s_1 . Η μεταβλητή της πρώτης σειράς και της στήλης οδηγού (στήλη 3) είναι η x_2 . Επομένως, αντικαταστήστε την s_1 με την x_2 .

	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	
x_2	1/2	1	3/2	1/2	0	9/2
s_2	2	0	-1	-1	1	6
	7/2	0	25/2	9/2	0	81/2

Νέες Βασικές Μεταβλητές

Βήμα 5 Επαναλάβετε τα βήματα από 1 μέχρι 4 έως ότου δεν υπάρχουν αρνητικοί αριθμοί στην τελευταία σειρά, εκτός της τελευταίας στήλης.

Στο παράδειγμα, δεν υπάρχουν άλλοι αρνητικοί αριθμοί στην τελευταία σειράς, επομένως τα βήματα από 1 μέχρι 4 δεν χρειάζεται να επαναληφθούν.

Βήμα 6 Η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται, θέτοντας στην κάθε μεταβλητή της πρώτης στήλης τις αντίστοιχες τιμές που βρίσκονται στην ίδια σειρά της τελευταίας στήλης. Όλες οι άλλες μεταβλητές παίρνουν μηδενική τιμή. Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία συμβολίζεται με z^* , είναι ο αριθμός που βρίσκεται στην τελευταία σειρά και στήλη για ένα πρόγραμμα μεγιστοποίησης, ενώ ο αντίστοιχος του αρνητικός για ένα πρόγραμμα ελαχιστοποίησης.

Η τελική βασική εφικτή λύση έχει πλέον βρεθεί. Οι μεταβλητές στην πρώτη στήλη είναι οι x_2 και s_2 . Από την τελευταία στήλη προκύπτει ότι οι βέλτιστες τιμές αυτών των μεταβλητών είναι οι $x_2^* = 9/2$ και $s_2^* = 6$. Για τις υπόλοιπες μεταβλητές, οι βέλτιστες τιμές είναι $x_1^* = x_3^* = s_1^* = 0$. Άρα, η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα του παραδείγματος, χωρίς τις επί πλέον μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν, είναι $x_1^* = 0$, $x_2^* = 9/2$ και $x_3^* = 0$. Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι $81/2$ και βρίσκεται στην κάτω δεξιά γωνία του πίνακα. Η βέλτιστη τιμή υπολογίζεται αντικαθιστώντας τις τιμές των μεταβλητών της βέλτιστης λύσης στην αντικειμενική συνάρτηση.

Όταν ένα γραμμικό πρόβλημα περιλαμβάνει περιορισμούς της μορφής $=$ ή \geq , απαιτείται για την επίλυση του η εισαγωγή τεχνητών μεταβλητών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή στον πίνακα simplex ορισμένων πολύ μεγάλων αριθμών, οι οποίοι προκύπτουν από τους συντελεστές $-M$ και $+M$ των τεχνητών μεταβλητών της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή της μεθόδου simplex ως έχει, θα είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση λαθών από στρογγυλοποιήσεις, εξ αιτίας της ύπαρξης πολύ μεγάλων και πολύ μικρών αριθμών στις μαθηματικές πράξεις, που πραγματοποιούνται

μεταξύ των σειρών πίνακα. Η βασική μέθοδος simplex μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να ξεπερασθεί αυτό το πρόβλημα. Ο αλγόριθμος, ο οποίος προκύπτει, καλείται *μεθοδος των δύο φάσεων (two-phase method)*. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την μέθοδο αυτή, ανατρέξτε στην αντίστοιχη βιβλιογραφία [9, 10].

Προγραμματισμός Στόχων (Goal Programming)

Ο Προγραμματισμός Στόχων αποτελεί μια ειδική εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού στην διαδικασία λήψης αποφάσεων, η οποία λαμβάνει υπ' όψη τους συνδυασμούς πολλαπλών στόχων [9]. Οι στόχοι μοντελοποιούνται ως περιορισμοί στο γραμμικό πρόγραμμα.

Το ακόλουθο παράδειγμα δείχνει πώς μπορεί ένα Πρόγραμμα Στόχων να διαμορφωθεί, ώστε να επιλύσει ένα πρακτικό πρόβλημα. Ας υποθέσουμε ότι μια εταιρία θέλει να προσδιορίσει πόσα κέντρα εργασίας (Machining Centers) θα προμηθευθεί από κάθε τύπο, μεταξύ δυο διαθέσιμων τύπων κέντρων εργασίας. Τα κέντρα αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή τριών διαφορετικών τύπων κομματιών. Ο ρυθμός παραγωγής (σε κομμάτια/ώρα) κάθε κέντρου εργασίας για κάθε τύπο κομματιού δίδεται στον παρακάτω πίνακα:

	Κομμάτι A	Κομμάτι B	Κομμάτι C
κέντρο εργασίας 1	10	7	73
κέντρο εργασίας 2	5	5	8

Οι στόχοι του ρυθμού παραγωγής για κάθε κομμάτι έχουν προσδιορισθεί με βάση την προβλεπόμενη ζήτηση:

- Στόχος 1. Ο ρυθμός παραγωγής για το κομμάτι A πρέπει να είναι τουλάχιστον 90 κομμάτια/ώρα.
- Στόχος 2. Ο ρυθμός παραγωγής για το κομμάτι B πρέπει να είναι τουλάχιστον 80 κομμάτια/ώρα.
- Στόχος 3. Ο ρυθμός παραγωγής για το κομμάτι C πρέπει να είναι τουλάχιστον 75 κομμάτια/ώρα.

Αν Υποθεθεί, ότι για κάθε κομμάτι/ώρα λιγότερο από τον στοχευόμενο ρυθμό παραγωγής, το αναμενόμενο ετήσιο κόστος από την απώλεια πωλήσεων για την εταιρεία είναι:

- \$1,000,000 για το A κομμάτι
- \$500,000 για το B κομμάτι
- \$300,000 για το C κομμάτι

Έστω:

x_1 = ο αριθμός των μονάδων του Κέντρου Εργασίας 1 που πρέπει να αγορασθούν

x_2 = ο αριθμός των μονάδων του Κέντρου Εργασίας 2 που πρέπει να αγορασθούν

Η απόφαση που πρέπει να ληφθεί είναι να προσδιορισθούν οι τιμές των x_1 και x_2 . Κάθε μονάδα του Κέντρου Εργασίας 1 κοστίζει \$400,000, ενώ κάθε μονάδα του Κέντρου Εργασίας 2 κοστίζει \$250,000. Ο συνολικός προϋπολογισμός της αγοράς των κέντρων εργασίας είναι \$2,000,000.

Προκειμένου να διατυπωθεί το παραπάνω πρόβλημα με την μορφή ενός Προγράμματος Στόχων, ορίζουμε τις ακόλουθες μεταβλητές απόκλισης (*deviational variables*):

d_i^+ = ποσότητα που αριθμητικά ικανοποιεί (υπερβαίνει) τον στόχο i^{th}

d_i^- = ποσότητα που αριθμητικά δεν ικανοποιεί τον στόχο i^{th}

Για κάθε στόχο, μόνο μια από τις δύο μεταβλητές απόκλισης μπορεί να είναι μη μηδενική.

Το κατάλληλο Πρόγραμμα Στόχων για το πρόβλημα αυτό είναι:

Ελαχιστοποίηση της:

$$1,000d_1^- + 500d_2^- + 300d_3^-$$

(Κόστος λόγω απωλειών των πωλήσεων σε [\$1,000])

με τους εξής περιορισμούς:

$$10x_1 + 5x_2 + d_1^+ - d_1^- = 90 \quad (\text{ο στόχος του ρυθμού παραγωγής για το κομμάτι A})$$

$$7x_1 + 5x_2 + d_2^+ - d_2^- = 80 \quad (\text{ο στόχος του ρυθμού παραγωγής για το κομμάτι B})$$

$$3x_1 + 8x_2 + d_3^+ - d_3^- = 75 \quad (\text{ο στόχος του ρυθμού παραγωγής για το κομμάτι C})$$

$$400x_1 + 250x_2 \leq 2,000 \quad (\text{οι περιορισμοί του συνολικού προϋπολογισμού σε [$1,000]})$$

$$x_1, x_2, d_1^+, d_1^-, d_2^+, d_2^-, d_3^+, d_3^- \geq 0$$

Με βάση αυτή την διατύπωση σημειώνουμε τα κύρια χαρακτηριστικά [9] του Προγραμματισμού Στόχων:

- Κάθε στόχος δηλώνεται ως περιορισμός ισότητας μέσω της εισαγωγής δύο μεταβλητών απόκλισης. Αν και ο περιορισμός θα πρέπει να ικανοποιείται από την λύση, η ίδια η λύση δεν είναι απαραίτητα αληθής και για τον στόχο. Αυτό είναι πιθανό, επειδή στην τελική λύση, μια από τις μεταβλητές απόκλισης μπορεί να είναι μη μηδενική. Επομένως, είναι δυνατόν να ικανοποιούνται μόνο μερικοί από τους στόχους ενώ κάποιοι άλλοι όχι, όπως επίσης είναι πιθανό να μην ικανοποιείται κανένας στόχος. Αυτό συμβαίνει συνήθως στην περίπτωση που οι στόχοι είναι αντικρουόμενοι. Η λύση θα πλησιάζει να ικανοποιεί τους πιο σημαντικούς στόχους και να μην ικανοποιεί ή να υπερικανοποιεί τους λιγότερο σημαντικούς στόχους.
- Η αντικειμενική συνάρτηση είναι συνάρτηση των μεταβλητών απόκλισης, η οποία εκφράζει το κόστος απόκλισης από τους επιθυμητούς στόχους.
- Οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης εκφράζουν την σχετική σημασία κάθε στόχου. Όσο μεγαλύτεροι είναι οι συντελεστές των μεταβλητών απόκλισης ενός στόχου, τόσο μικρότερες θα είναι αυτές οι μεταβλητές απόκλισης στην λύση (ώστε να αποφευχθεί μεγάλο κόστος λόγω απόκλισης) και τόσο περισσότερο θα ικανοποιείται ο στόχος.

Σε πολλές περιπτώσεις, η ακριβής σχετική σημασία των στόχων δεν είναι γνωστή, αλλά η διαβάθμιση των στόχων από τον λιγότερο σημαντικό στον περισσότερο σημαντικό είναι γνωστή. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι δυνατόν να ορισθούν με τέτοιο τρόπο οι συντελεστές ώστε ο συντελεστής του περισσότερο σημαντικού στόχου να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον συντελεστή του δεύτερου περισσότερο σημαντικού στόχου, και ο συντελεστής του δεύτερου σημαντικότερου στόχου είναι πολύ μεγαλύτερος από τον συντελεστή του αμέσως επόμενου σημαντικού στόχου κ.ο.κ. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως *pre-emptive goal programming*.

Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming)

Ένα ακέραιο πρόγραμμα, είναι ένα γραμμικό πρόγραμμα το οποίο έχει τον επιπλέον περιορισμό ότι οι μεταβλητές απόφασης x_1, x_2, \dots, x_n πρέπει να είναι ακέραιες. Συνήθως, οι συντελεστές c_i της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και οι συντελεστές a_{ij} και οι σταθερές b_i των περιορισμών υπόκεινται στον περιορισμό ότι πρέπει να είναι επίσης ακέραιοι.

Επίλυση των Ακέραιων Προγραμμάτων (Solving Integer Programming)

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, μια λογικά ικανοποιητική λύση ενός ακεραίου προγράμματος προκύπτει λύνοντας το αντίστοιχο γραμμικό πρόγραμμα, αγνοώντας τον περιορισμό περί ακεραίων συντελεστών. Η λύση, που προκύ-

πει, καλείται *πρώτη προσέγγιση (first approximation)* στην επίλυση του αρχικού ακέραιου προγράμματος. Αν η πρώτη προσέγγιση συμβαίνει να είναι ακέραια, τότε η λύση αυτή είναι η βέλτιστη λύση στο αρχικό ακέραιο πρόγραμμα. Η *δεύτερη προσέγγιση (second approximation)* προκύπτει από την στρογγυλοποίηση των συντελεστών της πρώτης προσέγγισης στους πλησιέστερους δυνατούς ακέραιους. Αυτή η λύση είναι πιο ικανοποιητική, όταν η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει μεγάλους αριθμούς, αλλά μπορεί να μην είναι ακριβής, όταν οι αριθμοί είναι μικροί. Για παράδειγμα, εάν η βέλτιστη λύση ενός γραμμικού προγράμματος προτείνει την παραγωγή 5,000,000.5 εδράνων κύλισης ανά έτος, τότε η παραγωγή 5,000,000 εδράνων κύλισης ανά έτος είναι αποδεκτή. Από την άλλη, εάν ένα γραμμικό πρόγραμμα προτείνει την αγορά 1.4 γραμμών παραγωγής με κόστος \$20 εκατ. ανά γραμμή παραγωγής, τότε η στρογγυλοποίηση του αριθμού σε 1 γραμμή παραγωγής θα παίξει μεγάλο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η εφαρμογή αλγορίθμων που παρέχουν ακέραιες λύσεις.

Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος κλάδου και φραγμού (*branch and bound algorithm*), η εφαρμογή του οποίου παρουσιάζεται παρακάτω με την βοήθεια ενός παραδείγματος [10]. Το πρόβλημα, που πρέπει να λυθεί, είναι:

$$\begin{aligned} \text{Μεγιστοποίηση της:} & \quad z = 10x_1 + x_2 & (5-4) \\ \text{με τον περιορισμό:} & \quad 2x_1 + 5x_2 \leq 11 \\ \text{όπου:} & \quad x_1 \text{ και } x_2 \text{ μη αρνητικοί και ακέραιοι} \end{aligned}$$

Αν η πρώτη προσέγγιση σε αυτό το ακέραιο πρόγραμμα περιέχει μια μη ακέραιη μεταβλητή έστω x_j^* , τότε $i_1 < x_j^* < i_2$ όπου i_1 και i_2 είναι διαδοχικοί μη αρνητικοί ακέραιοι. Επομένως, δημιουργούνται δυο νέα ακέραια προγράμματα, επεκτείνοντας το αρχικό ακέραιο πρόγραμμα είτε με τον περιορισμό $x_j \leq i_1$ ή με τον περιορισμό $x_j \geq i_2$. Αυτή η μέθοδος επίλυσης ονομάζεται *επίλυση κλάδου (branching)* και περιορίζει την περιοχή των εφικτών λύσεων με ένα τρόπο, ο οποίος αποκλείει τις μη ακέραιες λύσεις για το x_j και διατηρώντας μόνο όλες τις πιθανές ακέραιες λύσεις του αρχικού προβλήματος [10].

Για το Πρόγραμμα (5-4), θεωρείστε το σχετικό γραμμικό πρόγραμμα που προκύπτει διαγράφοντας την απαίτηση της ακεραιότητας. Σχεδιάζοντας γραφικά την εφικτή περιοχή, η οποία προσδιορίζεται από τους περιορισμούς $2x_1 + 5x_2 \leq 11$ και $x_1, x_2 \geq 0$ και στην συνέχεια τοποθετώντας στο σχήμα διάφορες τιμές της σταθεράς z , η πρώτη προσέγγιση (Σχήμα 5.12) βρέθηκε να είναι η $x_1^* = 5,5, x_2^* = 0$ με $z^* = 55$. Εναλλακτικά, η μέθοδος simplex μπορεί να εφαρμοσθεί για την εύρεση της ίδιας λύσης. Ωστόσο, για ένα πρόβλημα δυο μεταβλητών, η γραφική μέθοδος είναι περισσότερο ικανοποιητική.

Αφού $5 < x_1^* < 6$, η χρήση της μεθόδου των κλάδων δημιουργεί δυο νέα ακέραια προγράμματα:

μεγιστοποίηση της: $z = 10x_1 + x_2$ (5-5)

με τους περιορισμούς: $2x_1 + 5x_2 \leq 11$

$x_1 \leq 5$

όπου: x_1 και x_2 μη αρνητικοί και ακέραιοι

και

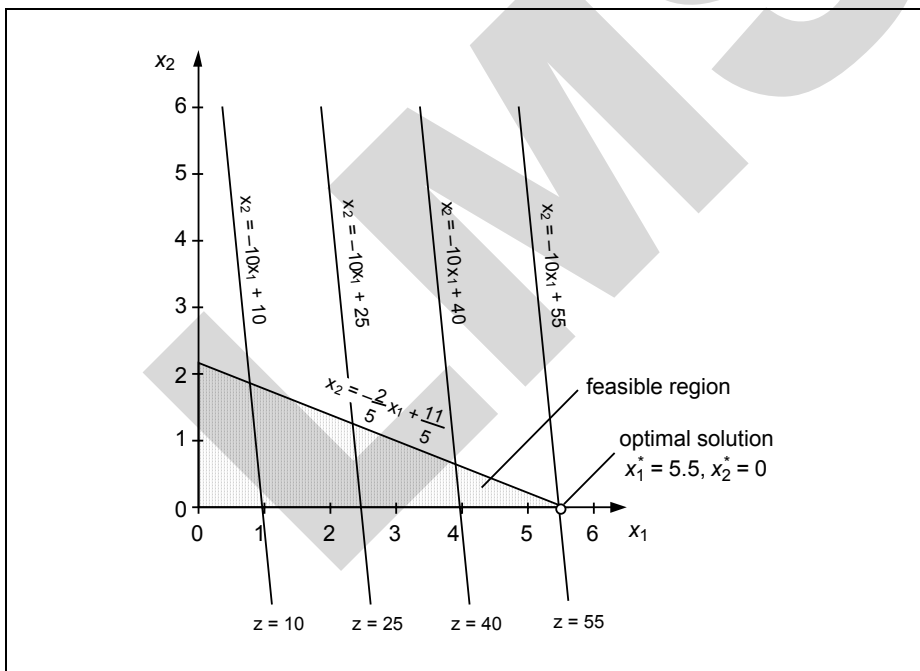
μεγιστοποίηση της: $z = 10x_1 + x_2$ (5-6)

με τους περιορισμούς: $2x_1 + 5x_2 \leq 11$

$x_1 \geq 6$

όπου: x_1 και x_2 μη αρνητικοί και ακέραιοι

Για τα δυο ακέραια προγράμματα που δημιουργήθηκαν με την μέθοδο των κλάδων, οι πρώτες προσεγγίσεις προκύπτουν χωρίς να ληφθεί υπ' όψη ο περιορισμός της ακεραιότητας και επιλύοντας τα γραμμικά προγράμματα που προέκυψαν. Εάν η πρώτη προσέγγιση είναι και τώρα μη ακέραια, τότε στο ακέραιο πρόγραμμα, από το οποίο δημιουργήθηκε η πρώτη προσέγγιση, εφαρμόζεται και πάλι η μέθοδος των κλάδων.



Feasible region = Περιοχή Εφικτών Λύσεων

Optimal solution = βέλτιστη λύση

Σχήμα 5.12 Η Γραφική Μέθοδος Επίλυσης για την Δημιουργία της Πρώτης Προσέγγισης του Προγράμματος 5-4

Χρησιμοποιώντας γραφικές μεθόδους, βρίσκουμε, ότι το πρόγραμμα 5-5 έχει ως πρώτη προσέγγιση: $x_1^* = 5, x_2^* = 0,2$ με $z^* = 50,2$, ενώ το πρόγραμμα 5-6 δεν έχει καμμία εφικτή λύση. Οπότε στο πρόγραμμα 5-5 εφαρμόζεται περαιτέρω η μέθοδος των κλάδων (branching). Αφού $0 < x_2^* < 1$, το πρόγραμμα 5-5 επεκτείνεται είτε με $x_2 \leq 0$ ή με $x_2 \geq 1$, και δημιουργούνται δυο νέα ακέραια προγράμματα:

$$\begin{aligned} \text{μεγιστοποίηση της:} & z = 10x_1 + x_2 & (5-7) \\ \text{με τους περιορισμούς:} & 2x_1 + 5x_2 \leq 11 \\ & x_1 \leq 5 \\ & x_2 \leq 0 \\ \text{όπου:} & x_1 \text{ και } x_2 \text{ μη αρνητικοί και ακέραιοι} \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} \text{μεγιστοποίηση της:} & z = 10x_1 + x_2 & (5-8) \\ \text{με τους περιορισμούς:} & 2x_1 + 5x_2 \leq 11 \\ & x_1 \leq 5 \\ & x_2 \geq 1 \\ \text{όπου:} & x_1 \text{ και } x_2 \text{ μη αρνητικοί και ακέραιοι} \end{aligned}$$

Αγνοώντας τους περιορισμούς ακεραιότητας, η λύση στο πρόγραμμα 5-7 είναι $x_1^* = 5, x_2^* = 0$, με $z^* = 50$, ενώ η λύση στο πρόγραμμα 5-8 είναι $x_1^* = 3, x_2^* = 1$, με $z^* = 31$. Αφού και οι δυο αυτές πρώτες προσεγγίσεις είναι ακέραιες, δεν απαιτείται περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου των κλάδων (branching).

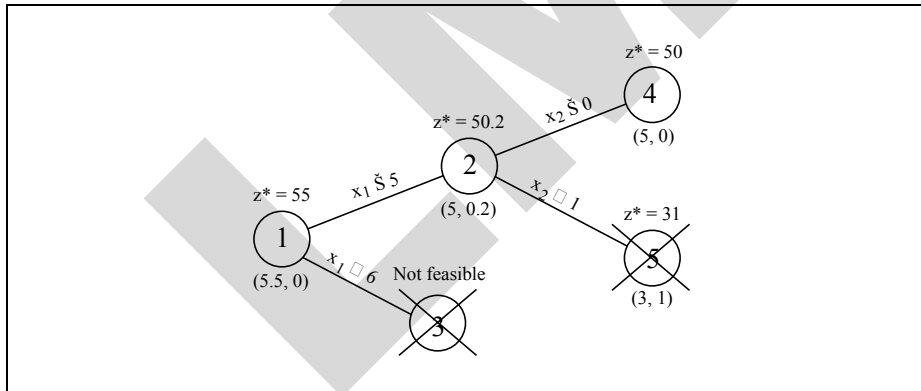
Τώρα μπορεί να συζητηθεί το θέμα του Φραγμού (bounding) στον αλγόριθμο Κλάδου και Φραγμού (Branch and Bounding). Ας υποθέσουμε την περίπτωση όπου επιθυμούμε την μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος των κλάδων (branching) εφαρμόζεται έως ότου προκύψει μια ακέραιη πρώτη προσέγγιση (όπου είναι και η ακέραιη λύση). Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αυτήν την πρώτη ακέραιη λύση ορίζεται ως το κατώτερο όριο του προβλήματος. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αυτή την πρώτη ακέραιη λύση θεωρείται ο κάτω φραγμός του προβλήματος, και όλα τα προγράμματα, που οι πρώτες προσεγγίσεις τους ακέραιες ή όχι καταλήγουν σε τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης μικρότερες από τον κάτω φραγμό, απορρίπτονται.

Στο παράδειγμα, το πρόγραμμα 5-7 έχει μια ακέραιη λύση με $z^* = 50$, επομένως το 50 γίνεται ο κάτω φραγμός για το πρόβλημα. Το πρόγραμμα 5-8, έχει μία λύση με $z^* = 31$. Εφ' όσον το 31 είναι μικρότερο από τον κάτω φραγμό 50, το πρόγραμμα 5-8 απορρίπτεται. Αυτό θα γινόταν ακόμα και αν η πρώτη προσέγγιση ήταν μη ακέραιη.

Η εφαρμογή της μεθόδου των κλάδων συνεχίζεται στα προγράμματα αυτά που έχουν μη ακέραιες πρώτες προσεγγίσεις, οι οποίες δίδουν τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση μεγαλύτερες από τον κάτω φραγμό. Εάν κατά την διάρκεια της διαδικασίας, βρεθεί μια νέα ακέραιη λύση, η οποία δίδει στην αντικειμενική συνάρτηση τιμή μεγαλύτερη από τον τρέχοντα κάτω φραγμό, τότε αυτή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται ο νέος κάτω φραγμός. Το πρόγραμμα που έδωσε τον παλαιό κάτω φραγμό δεν λαμβάνεται πλέον υπ' όψη, καθώς επίσης και όλα τα προγράμματα που οι πρώτες προσεγγίσεις τους δίδουν τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση μικρότερες από τον νέο κάτω φραγμό. Η εφαρμογή της μεθόδου των κλάδων (*branching*) συνεχίζεται, έως ότου δεν υπάρχουν πλέον προγράμματα με μη ακέραιες πρώτες προσεγγίσεις. Στο σημείο αυτό, η υπάρχουσα λύση του κάτω φραγμού αποτελεί την βέλτιστη λύση στο αρχικό ακέραιο πρόγραμμα.

Εάν ζητείται η *ελαχιστοποίηση* της αντικειμενικής συνάρτησης, η διαδικασία παραμένει η ίδια εκτός από το ότι χρησιμοποιείται ο άνω φραγμός (*upper bound*). Επομένως, η τιμή της πρώτης ακέραιης λύσης θεωρείται ως ένας άνω φραγμός για το πρόβλημα, και τα προγράμματα απαλείφονται, όταν οι πρώτες προσεγγίσεις των z -τιμών είναι μεγαλύτερες από τον τρέχοντα άνω φραγμό.

Η μέθοδος των κλάδων εφαρμόζεται στο πρόγραμμα εκείνο που φαίνεται ως το πιο κοντινό στην βέλτιστη λύση. Όταν υπάρχει ένας αριθμός υποψηφίων προγραμμάτων, στα οποία πρόκειται να εφαρμοσθεί η μέθοδος των κλάδων, επιλέγεται το πρόγραμμα που έχει την μεγαλύτερη τιμή z , εάν ζητείται η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, ή το πρόγραμμα που έχει την μικρότερη τιμή z , εάν η αντικειμενική συνάρτηση πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί.



not feasible = μη εφικτή

Σχήμα 5.13 Η Εφαρμογή του αλγορίθμου κλάδου και φραγμού (*branch and bound*) στο Πρόγραμμα 5-4

Κάθε τόσο είναι δυνατόν να προστεθεί και ένας νέος περιορισμός. Εάν η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει περισσότερες από μια μη ακέραιες μεταβλητές, οι

νέοι περιορισμοί εφαρμόζονται σε εκείνη την μεταβλητή που παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόκλιση από το να γίνει ακέραιη, δηλαδή, την μεταβλητή εκείνη, της οποίας το κλασματικό μέρος είναι πιο κοντά στο 0,5. Στην περίπτωση, που έχουμε περισσότερες από μια μεταβλητές με την ίδια τιμή, επιλέγουμε αυθαίρετα μια από αυτές.

Τέλος, είναι πιθανό ένα ακέραιο πρόγραμμα ή το αντίστοιχο γραμμικό πρόγραμμα να έχει περισσότερες από μια βέλτιστες λύσεις (δηλαδή, διαφορετικά σύνολα τιμών των μεταβλητών απόφασης, που δίδουν την ίδια βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης). Στις περιπτώσεις αυτές, μια από τις λύσεις ορίζεται αυθαίρετα ως η βέλτιστη λύση και απορρίπτονται οι υπόλοιπες. Η εφαρμογή του αλγορίθμου κλάδου και φραγμού (branch and bound) στο πρόβλημα που χρησιμοποιείται ως παράδειγμα [10] μπορεί να σχεδιασθεί ως ένα σχηματικό διάγραμμα ή δέντρο (Σχ. 5.13):

Το αρχικό ακέραιο πρόγραμμα, στην συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα 5-4, βρίσκεται μέσα στον κύκλο με τον αριθμό 1. Όλα τα άλλα προγράμματα που σχηματίστηκαν με την μέθοδο των κλάδων, σημειώνονται με κύκλο με αύξοντα ακέραιο αριθμό, που αντιστοιχεί στην σειρά δημιουργίας τους. Επομένως, τα προγράμματα 5-5 έως 5-8 προσδιορίζονται με τους αριθμούς 2 έως 5 αντίστοιχα. Η πρώτη προσεγγιστική λύση κάθε προγράμματος γράφεται δίπλα στον κάθε κύκλο του αντίστοιχου προγράμματος. Κάθε κύκλος (πρόγραμμα) συνδέεται με μια γραμμή με τον κύκλο (πρόγραμμα) που δημιούργησε μέσω της μεθόδου των κλάδων. Κάθε νέος περιορισμός, που δημιουργήθηκε μέσω της μεθόδου των κλάδων, γράφεται αντίστοιχα πάνω από κάθε γραμμή. Τέλος, ένας κύκλος σημειώνεται με διαγραφή εάν το αντίστοιχο πρόγραμμα έχει απαλειφθεί. Έτσι, ο κλάδος 3 έχει απαλειφθεί, επειδή η λύση δεν ήταν εφικτή. Ο κλάδος 5 απαλείφεται μέσω της μεθόδου των φραγμών. Εφ' όσον δεν έχουν απομείνει μη ακέραιοι κλάδοι για περαιτέρω ανάλυση, το δέντρο δείχνει ότι το πρόγραμμα 5-4 έχει λύσεις τις $x_1^* = 5$, $x_2^* = 0$ και $z^* = 50$.

Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)

Ο δυναμικός προγραμματισμός είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως *διαδικασίες λήψης αποφάσεων πολλαπλών επιπέδων (multistage decision processes)*. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων πολλαπλών επιπέδων είναι μια διαδικασία που μπορεί να χωρισθεί σε έναν αριθμό διαδοχικών βημάτων, ή επιπέδων που μπορούν να ολοκληρωθούν με έναν ή περισσότερους τρόπους. Οι επιλογές για την ολοκλήρωση των διαδικασιών σε κάθε επίπεδο καλούνται *αποφάσεις (decisions)*. Η *πολιτική (policy)* είναι μία ακολουθία αποφάσεων, για κάθε επίπεδο της διαδικασίας. Η συνθήκη της διαδικασίας σε ένα δεδομένο επίπεδο καλείται *κατάσταση (state)* σ' αυτό το επίπεδο. Κάθε απόφαση έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά από την τρέχουσα κατάσταση στην κατάσταση του επόμενου επιπέδου. Πολλές διαδικασίες λήψης αποφάσεων πολλαπλών επιπέδων έχουν ως αποτέλεσμα κόστος ή κέρδος, σε σχέση με την κάθε απόφαση. Τα αποτελέσματα μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με το επίπεδο και την κατάσταση της διαδι-

κασίας. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτών των διαδικασιών, είναι να προσδιορισθεί μία βέλτιστη πολιτική, που θα δίδει την καλύτερη συνολικό αποτέλεσμα [10].

Για να εξηγήσουμε με ένα παράδειγμα τα παραπάνω, ας θεωρήσουμε έναν επενδυτή, ο οποίος αρχίζει την ημέρα με κάποιο χρηματικό ποσό (D δολάρια) και με αρκετό χρόνο ώστε να κάνει n επενδύσεις έως το τέλος της ημέρας. Το αναμενόμενο χρηματικό κέρδος για κάθε επένδυση (που θα αποδοθεί σε μια δεδομένη ημέρα στο μέλλον) είναι συνάρτηση του ποσού των χρημάτων που επενδύθηκαν. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσόν, τόσο μεγαλύτερο είναι το αναμενόμενο κέρδος. Ο σκοπός είναι να επιτύχουμε το μεγαλύτερο αναμενόμενο συνολικό χρηματικό αποτέλεσμα που αντιστοιχεί στις n επενδύσεις, χωρίς να επενδύσουμε περισσότερα από D δολάρια.

Ας υποθέσουμε ότι ο επενδυτής διαθέτει προς επένδυση το ποσό των $D = \$4,000$ και έχει $n = 3$ δυνατότητες επένδυσης. Κάθε δυνατότητα απαιτεί επένδυση ποσού της τάξης των $\$1,000$. Ο επενδυτής μπορεί να διαθέσει όλο το χρηματικό ποσό σε μια μόνο επιλογή ή να το διαθέσει και στις τρεις επιλογές. Τα αναμενόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα [10].

	Χρήματα που Επενδύθηκαν				
	0	1,000	2,000	3,000	4,000
Αποτέλεσμα από Επένδυση 1	0	2,000	5,000	6,000	7,000
Αποτέλεσμα από Επένδυση 2	0	1,000	3,000	6,000	7,000
Αποτέλεσμα από Επένδυση 3	0	1,000	4,000	5,000	8,000

Έστω η $f_i(x)$ ($i = 1,2,3$) δηλώνει το αποτέλεσμα (σε μονάδες των χιλίων δολαρίων) από την επιλογή επένδυσης i , όταν επενδύονται σε αυτήν x χρηματικές μονάδες. Τότε ο πίνακας των οικονομικών αποτελεσμάτων αναδιατυπώνεται ως εξής (Πιν. 5.3).

Ορίζοντας x_i ($i = 1,2,3$) ως τον αριθμό των χρηματικών μονάδων που επενδύθηκαν στην επιλογή i , διατυπώνουμε την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση:

$$\text{μεγιστοποίηση της: } z = f_1(x_1) + f_2(x_2) + f_3(x_3)$$

Αφού ο επενδυτής διαθέτει μόνο 4 χρηματικές μονάδες για να επενδύσει, έχουμε:

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 4$$

Στο πρόβλημα αυτό, η διαδικασία προσδιορισμού του ποσού επένδυσης σε κάθε επιλογή, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα είναι μια διαδικασία λήψης αποφάσεων τριών επιπέδων. Η θεώρηση της επιλογής i αποτελεί τα Επίπεδο i ($i = 1,2,3$). Η κατάσταση της διαδικασίας

στο επίπεδο i είναι το χρηματικό ποσό που είναι ακόμα διαθέσιμο για επένδυση στο επίπεδο i . Στο Επίπεδο 1, στην αρχή της διαδικασίας, υπάρχουν διαθέσιμες 4 χρηματικές μονάδες, επομένως η κατάσταση είναι 4. Για τα Επίπεδα 2 και 3, οι καταστάσεις μπορεί να είναι 0, 1, 2, 3, και 4, ανάλογα με τις τοποθετήσεις (αποφάσεις) στα προηγούμενα επίπεδα. Η απόφαση στο επίπεδο i παριστάνεται από την μεταβλητή x_i , ενώ οι πιθανές τιμές του x_i είναι οι ακέραιοι από το 0 ως και την κατάσταση του Επιπέδου i συμπεριλαμβανομένης.

	Ποσά που Επενδύθηκαν				
	0	1	2	3	4
$f_1(x)$	0	2	5	6	7
$f_2(x)$	0	1	3	6	7
$f_3(x)$	0	1	4	5	8

Πίνακας 5.3 Πίνακας Οικονομικών Αποτελεσμάτων για το Πρόβλημα Επένδυσης

Ο Δυναμικός Προγραμματισμός, η μέθοδος με την οποία διαδικασίες λήψης αποφάσεων πολλαπλών επιπέδων βελτιστοποιούνται, βασίζεται στην αρχή βελτιστοποίησης του Bellman. Η αρχή βελτιστοποίησης του Bellman αναφέρει ότι μια βέλτιστη πολιτική έχει την ιδιότητα ότι, ανεξάρτητα από τις αποφάσεις που λήφθηκαν για να εισαχθεί μια συγκεκριμένη κατάσταση σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, οι αποφάσεις που απομένουν πρέπει να συνιστούν μια βέλτιστη πολιτική για την αποχώρηση από αυτή την παρούσα κατάσταση.

Για να εφαρμόσουμε αυτήν την αρχή, αρχίζουμε από το τελευταίο επίπεδο μιας διαδικασίας n επιπέδων και προσδιορίζουμε για κάθε κατάσταση την καλύτερη πολιτική για να αποχωρήσουμε από αυτήν την κατάσταση και να ολοκληρώσουμε την διαδικασία, υποθέτοντας ότι όλα τα προηγούμενα επίπεδα έχουν ολοκληρωθεί. Έπειτα συνεχίζουμε την διαδικασία προς τα πίσω, από επίπεδο σε επίπεδο. Σε κάθε επίπεδο προσδιορίζουμε την καλύτερη πολιτική αποχώρησης από αυτό και ολοκλήρωσης της διαδικασίας, υποθέτοντας ότι όλα τα προηγούμενα επίπεδα έχουν ολοκληρωθεί και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν για το επόμενο επίπεδο που ακολουθεί. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία, θα πρέπει να υπολογισθούν τα στοιχεία του Πίνακα 5.4 [10], όπου:

- u \equiv η μεταβλητή κατάσταση, οι τιμές της οποίας προσδιορίζουν τις καταστάσεις
- $m_i(u)$ \equiv το βέλτιστο αποτέλεσμα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ξεκινώντας από το Επίπεδο j στην κατάσταση u
- $d_j(u)$ \equiv η απόφαση που πάρθηκε στο Επίπεδο j και που αποφέρει $m_i(u)$

Οι τιμές που αντιστοιχούν στο τελευταίο επίπεδο της διαδικασίας, $m_n(u)$ και $d_n(u)$, συνήθως υπολογίζονται απευθείας. Οι τιμές που απομένουν προσδιορίζονται επαναληπτικά. Δηλαδή, οι τιμές για το j^{th} επίπεδο ($j = 1, 2, \dots, n-1$) προσδιορίζονται ως συναρτήσεις των τιμών για το $(j+1)^{st}$ επίπεδο. Ο επαναληπτικός τύπος είναι εξαρτώμενος από το πρόβλημα και πρέπει να δημιουργείται νέος για κάθε διαφορετικό τύπο διαδικασιών λήψης αποφάσεων με πολλαπλά επίπεδα.

Προκειμένου να καθορίσουμε μια βέλτιστη πολιτική για τον επενδυτή, αρχίζουμε από το τελευταίο επίπεδο της διεργασίας, το Επίπεδο 3, υποθέτοντας ότι όλα τα προηγούμενα επίπεδα, Επίπεδο 1 και 2, έχουν ολοκληρωθεί. Δηλαδή, οι επενδύσεις στο επίπεδο 1 και 2 έχουν γίνει (παρόλο που σε αυτήν την χρονική στιγμή δεν γνωρίζουμε ποιες είναι αυτές) και πρόκειται να ολοκληρώσουμε την διαδικασία διαθέτοντας χρηματικές μονάδες στην επένδυση 3. Εφ' όσον δεν γνωρίζουμε πόσες χρηματικές μονάδες επενδύθηκαν στις δυο πρώτες επενδύσεις, δεν γνωρίζουμε πόσες μονάδες είναι διαθέσιμες για την επένδυση 3. Επομένως, πρέπει να εξετάσουμε όλες τις πιθανότητες. Οι διαθέσιμες μονάδες θα είναι είτε 0, 1, 2, 3 ή 4.

Ανεξάρτητα από το πόσες χρηματικές μονάδες είναι διαθέσιμες στο Επίπεδο 3, είναι φανερό από τον ορισμό $f_3(x)$ (Πιν. 5.3), ότι ο καλύτερος τρόπος να ολοκληρώσουμε μια διαδικασία είναι να τοποθετήσουμε όλες τις διαθέσιμες μονάδες στην επένδυση 3. Αυτό μπορεί να επαληθευθεί με έναν τυπικό υπολογισμό:

		u					
		0	1	2	3	...	
$m_n(u)$							} Last stage
$d_n(u)$							
$m_{n-1}(u)$							} Next-to-last stage
$d_{n-1}(u)$							
...		
$m_1(u)$							} First stage
$d_1(u)$							

Last stage = Τελευταίο επίπεδο
 First stage = Πρώτο επίπεδο

Next-to-last stage = Επόμενο του τελευταίου επίπεδο

Πίνακας 5.4 Ένας Πίνακας Δυναμικού Προγραμματισμού

$$\begin{aligned}
m_3(4) &= \max\{f_3(0), f_3(1), f_3(2), f_3(3), f_3(4)\} \\
&= \max\{0, 1, 4, 5, 8\} = 8 && \text{με } d_3(4) = 4 \\
m_3(3) &= \max\{f_3(0), f_3(1), f_3(2), f_3(3)\} \\
&= \max\{0, 1, 4, 5\} = 5 && \text{με } d_3(3) = 3 \\
m_3(2) &= \max\{f_3(0), f_3(1), f_3(2)\} = \max\{0, 1, 4\} = 4 && \text{με } d_3(2) = 2 \\
m_3(1) &= \max\{f_3(0), f_3(1)\} = \max\{0, 1\} = 1 && \text{με } d_3(1) = 1 \\
m_3(0) &= \max\{f_3(0)\} = \max\{0\} = 0 && \text{με } d_3(0) = 0
\end{aligned}$$

Τα αποτελέσματα αυτά μας δίδουν τις δυο πρώτες γραμμές στον πίνακα λύσεων:

	u				
	0	1	2	3	4
$m_3(u)$	0	1	4	5	8
$d_3(u)$	0	1	2	3	4

Έχοντας ολοκληρώσει το Στάδιο 3, εξετάζουμε το Στάδιο 2 κάνοντας την υπόθεση ότι το Στάδιο 1 έχει ολοκληρωθεί (αν και, σε αυτήν την χρονική στιγμή, δεν γνωρίζουμε πώς). Εφ' όσον δεν γνωρίζουμε πόσες μονάδες επενδύθηκαν στην επένδυση 1, δεν γνωρίζουμε πόσες μονάδες είναι διαθέσιμες για την επένδυση 2. Επομένως, πρέπει να εξετάσουμε όλες τις περιπτώσεις.

Μια περίπτωση είναι ότι και οι 4 μονάδες είναι διαθέσιμες στο Επίπεδο 2, κάτι που προϋποθέτει ότι δεν έχουν επενδυθεί χρηματικές μονάδες στις επένδυση 1. Τώρα, όλες ή μερικές από αυτές τις 4 μονάδες μπορούν να επενδυθούν στην επένδυση 2, και όσες απομένουν να είναι διαθέσιμες για το Επίπεδο 3. Εάν x από αυτές τις 4 μονάδες επενδύθηκαν στην Επένδυση 2, η απόδοση είναι $f_2(x)$, και οι υπόλοιπες $4 - x$ είναι διαθέσιμες για το Επίπεδο 3. Έχουμε όμως ήδη υπολογίσει, ότι η καλύτερη λύση για να συνεχίσουμε από το Επίπεδο 3 όταν έχουμε διαθέσιμες $4 - x$ μονάδες, είναι $m_3(4 - x)$. Επομένως, η συνολική απόδοση είναι $f_2(x) + m_3(4 - x)$ και η τιμή του $x(x = 0, 1, 2, 3, 4)$ όπου μεγιστοποιεί αυτή την συνολική απόδοση αντιπροσωπεύει την βέλτιστη απόφαση για το επίπεδο 2, όταν 4 μονάδες είναι διαθέσιμες. Αυτό μπορεί να διατυπωθεί και με την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned}
m_2(4) &= \max\{f_2(0) + m_3(4 - 0), f_2(1) + m_3(4 - 1), f_2(2) + m_3(4 - 2), \\
&\quad f_2(3) + m_3(4 - 3), f_2(4) + m_3(4 - 4)\} \\
&= \max\{0+8, 1+5, 3+4, 6+1, 7+0\} = 8 && \text{με } d_2(4) = 0
\end{aligned}$$

Εξετάζοντας παρόμοια και τις άλλες περιπτώσεις για το Επίπεδο 2, έχουμε:

$$\begin{aligned}
 m_2(3) &= \max\{f_2(0) + m_3(3-0), f_2(1) + m_3(3-1), f_2(2) + m_3(3-2), \\
 &\quad f_2(3) + m_3(3-3)\} \\
 &= \max\{0+5, 1+4, 3+1, 6+0\} = 6 \quad \text{με } d_2(3) = 3 \\
 m_2(2) &= \max\{f_2(0) + m_3(2-0), f_2(1) + m_3(2-1), f_2(2) + m_3(2-2)\} \\
 &= \max\{0+4, 1+1, 3+0\} = 4 \quad \text{με } d_2(2) = 0 \\
 m_2(1) &= \max\{f_2(0) + m_3(1-0), f_2(1) + m_3(1-1)\} \\
 &= \max\{0+1, 1+0\} = 1 \quad \text{με } d_2(1) = 1 \text{ (Με τυχαία επιλογή)} \\
 m_2(0) &= \max\{f_2(0) + m_3(0-0)\} \\
 &= \max\{0+0\} = 0 \quad \text{με } d_2(0) = 0
 \end{aligned}$$

Συγκεντρώνοντας τους υπολογισμούς για το επίπεδο 2, σχηματίζουμε την τρίτη και τέταρτη σειρά του πίνακα λύσεων:

	<i>u</i>				
	0	1	2	3	4
$m_3(u)$	0	1	4	5	8
$d_3(u)$	0	1	2	3	4
$m_2(u)$	0	1	4	6	8
$d_2(u)$	0	1	0	3	0

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει το Επίπεδο 2 προχωράμε στο Επίπεδο 1. Υπάρχει μόνο μια κατάσταση που σχετίζεται με αυτό το επίπεδο, $u = 4$.

$$\begin{aligned}
 m_1(4) &= \max\{f_1(0) + m_2(4-0), f_1(1) + m_2(4-1), f_1(2) + m_2(4-2), \\
 &\quad f_1(3) + m_2(4-3), f_1(4) + m_2(4-4)\} \\
 &= \max\{0+8, 2+6, 5+4, 6+1, 7+0\} = 9 \quad \text{με } d_1(4) = 2
 \end{aligned}$$

Με αυτά τα δεδομένα ολοκληρώνουμε τον πίνακα λύσεων:

	<i>u</i>				
	0	1	2	3	4
$m_3(u)$	0	1	4	5	8
$d_3(u)$	0	1	2	3	4
$m_2(u)$	0	1	4	6	8
$d_2(u)$	0	1	0	3	0
$m_1(u)$	9

Η μέγιστη απόδοση, που μπορεί να επιτευχθεί από αυτό το πρόγραμμα επένδυσης τριών επιπέδων που ξεκίνησε με 4 μονάδες, είναι $m_1(4) = 9$ μονάδες. Για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση, επενδύθηκαν $d_1(4) = 2$ μονάδες στην Επένδυση 1, αφήνοντας $4-2=2$ μονάδες για το Επίπεδο 2. Όμως $d_2(2) = 0$, κάτι που δείχνει ότι δεν θα πρέπει να επενδυθούν χρηματικές μονάδες σε αυτό το επίπεδο εάν είναι μόνο 2 διαθέσιμες. Επομένως απομένουν 2 μονάδες για το επίπεδο 3. Αφού $d_3(2) = 2$, και οι δυο μονάδες θα έπρεπε να επενδυθούν στην Επένδυση 3. Επομένως η βέλτιστη πολιτική είναι να επενδύσουμε 2 μονάδες στην Επένδυση 1, 0 μονάδες στην επένδυση 2 και 2 μονάδες στην επένδυση 3.

Το παραπάνω παράδειγμα δείχνει ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά του δυναμικού προγραμματισμού:

- Ο Δυναμικός προγραμματισμός είναι περισσότερο κατάλληλος για διαδικασίες λήψης αποφάσεων πολλαπλών επιπέδων, στις οποίες κάθε απόφαση αποδίδει ξεχωριστά, ανεξάρτητα από τις προηγούμενες αποφάσεις. Στο παραπάνω παράδειγμα, η αναμενόμενη επιστροφή της κάθε επένδυσης i εξαρτάται μόνο από το ποσό x_i που επενδύθηκε σε αυτήν. Δεν εξαρτάται από τα ποσά που επενδύθηκαν στις άλλες επενδύσεις.
- Ο Δυναμικός Προγραμματισμός έχει κατεύθυνση αντίστροφη, από το n^{th} επίπεδο στο πρώτο επίπεδο. Για να γίνει αυτό, πρέπει να μπορούν να εκφραστούν οι βέλτιστες αποδόσεις κάθε επιπέδου j ως προς τις βέλτιστες αποδόσεις του επόμενου επιπέδου $j+1$. Ειδικότερα, $m_j(u)$, η οποία είναι η βέλτιστη απόδοση που προκύπτει από την ολοκλήρωση της διαδικασίας ξεκινώντας από το Επίπεδο j με την κατάσταση u (Πιν. 5.4), πρέπει να έχει έναν επαναληπτικό προσδιορισμό της μορφής:

$$m_j(u) = f(m_{j+1}(v_1), m_{j+1}(v_2), \dots, m_{j+1}(v_s))$$

όπου v_1, v_2, \dots, v_s είναι οι πιθανές καταστάσεις στο Επίπεδο $j+1$, δεδομένου ότι η κατάσταση στο Επίπεδο j είναι u .

Θεωρία Αναμονής (Queueing Theory)

Μια διαδικασία αναμονής (*queueing process*) αποτελείται από πελάτες, που φθάνουν σε έναν σταθμό εξυπηρέτησης και που περιμένουν στην σειρά (*αναμονή*), εάν όλοι οι σταθμοί εξυπηρέτησης είναι απασχολημένοι. Στην συνέχεια εξυπηρετούνται και τελικά αποχωρούν από τον σταθμό εξυπηρέτησης [10, 11]. Ένα σύστημα αναμονής (*queueing system*) [10] αποτελείται από ένα σύνολο πελατών, ένα σύνολο σταθμών εξυπηρέτησης και μια σειρά, σύμφωνα, με την οποία οι πελάτες φθάνουν και εξυπηρετούνται από το σύστημα. Η κατάσταση (*state*) του συστήματος είναι ο αριθμός των πελατών που περιμένει.

Η Θεωρία Αναμονής (*Queueing Theory*) είναι η μελέτη της συμπεριφοράς

των συστημάτων αναμονής μέσω της διατύπωσης αναλυτικών μοντέλων.

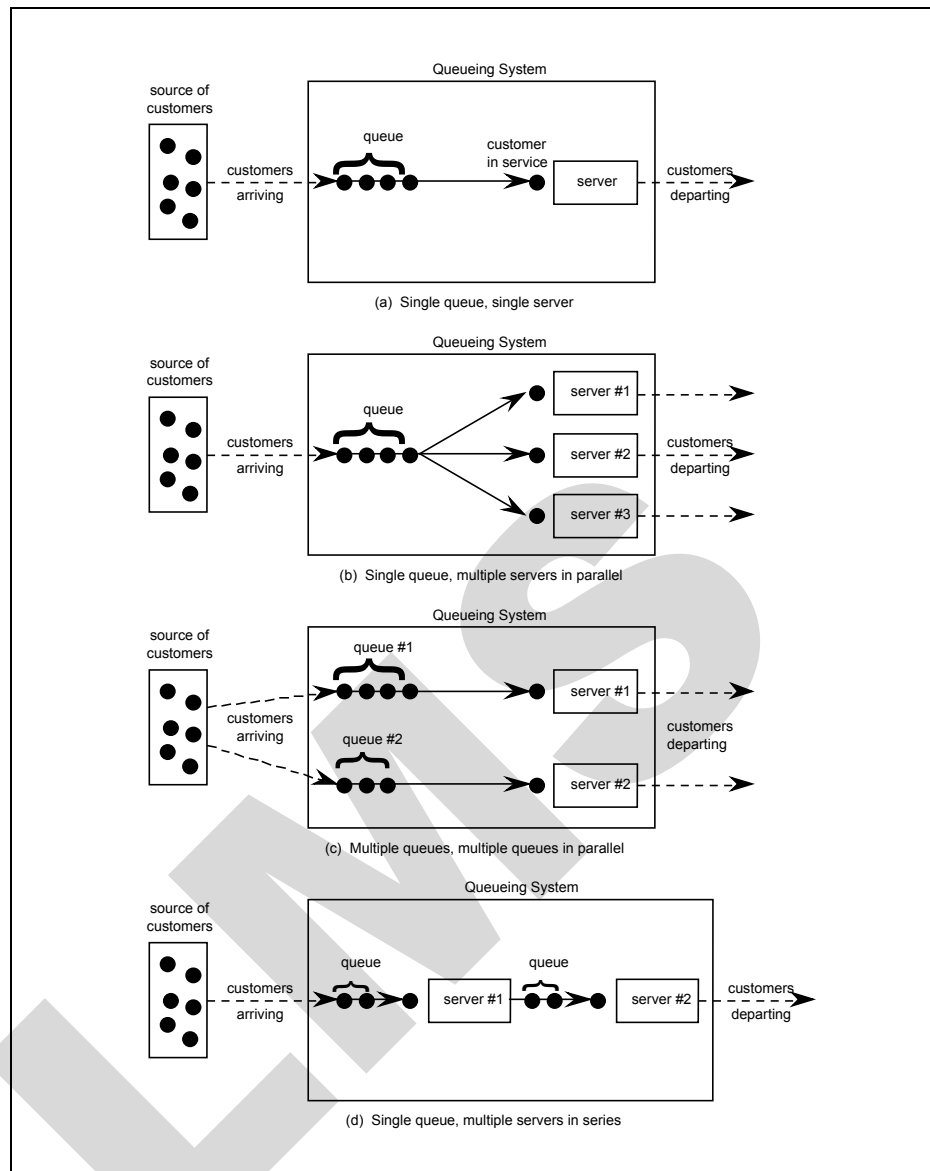
Υπάρχουν δυο τρόποι σύμφωνα με τους οποίους ένα σύστημα αναμονής μπορεί να αναπαριστά ένα σύστημα παραγωγής. Ο ένας τρόπος είναι να θεωρήσουμε τους σταθμούς εξυπηρέτησης ως παραγωγικούς πόρους (π.χ. μηχανές) και τους πελάτες ως τα κομμάτια, που πρέπει να επεξεργασθούν από τους παραγωγικούς πόρους. Ο δεύτερος τρόπος είναι να θεωρήσουμε τους πελάτες ως παραγωγικούς πόρους και τους σταθμούς εξυπηρέτησης ως καθορισμένο αριθμό κομματιών στο σύστημα παραγωγής. Η τελευταία αυτή αντιστοιχία είναι κατάλληλη για συγκεκριμένα ευέλικτα συστήματα παραγωγής, στα οποία τα κομμάτια μετακινούνται στο σύστημα με ένα σταθερό αριθμό παλετών –παλέτα είναι ένα κινητό εξάρτημα.

Τα συστήματα αναμονής προσδιορίζονται από τα ακόλουθα πέντε χαρακτηριστικά: το μοντέλο άφιξης των πελατών, τον μοντέλο εξυπηρέτησης, τον αριθμό των σταθμών εξυπηρέτησης, την χωρητικότητα του σταθμού σε πελάτες και την σειρά, με την οποία εξυπηρετούνται οι πελάτες.

Το μοντέλο *άφιξης* (*arrival pattern*) των πελατών προσδιορίζεται, συνήθως, από τον *χρόνο μεταξύ των αφίξεων* (*interarrival time*), δηλαδή τον χρόνο μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων των πελατών στον σταθμό εξυπηρέτησης. Ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι καθορισμένος (π.χ. να είναι γνωστός με ακρίβεια) ή μπορεί να είναι μια τυχαία μεταβλητή, της οποίας η κατανομή πιθανότητας θεωρείται γνωστή εκ των προτέρων. Είναι δυνατόν να εξαρτάται από τον αριθμό των πελατών, που βρίσκονται ήδη στο σύστημα, ή να είναι ανεξάρτητος από την κατάσταση του συστήματος. Εξαρτάται, επίσης, από το εάν οι πελάτες φθάνουν μόνοι τους ή κατά ομάδες και εάν επιτρέπονται *αρνήσεις εισόδου στην αναμονή* (*balking*) ή *εγκατάλειψη* (*Reneging*). Οι *αρνήσεις εισόδου* παρατηρούνται όταν ένας πελάτης, που φθάνει στο σύστημα, αρνείται να μπει στον σταθμό εξυπηρέτησης, επειδή η αναμονή είναι πολύ μεγάλη. Η *εγκατάλειψη* συμβαίνει όταν ένας πελάτης, που βρίσκεται ήδη στην αναμονή, φεύγει από αυτήν και από τον σταθμό εξυπηρέτησης, επειδή ο χρόνος αναμονής είναι πολύ μεγάλος. Η βασική παραδοχή, εκτός και αν δηλώνεται διαφορετικά, είναι ότι όλοι οι πελάτες φθάνουν μόνοι τους και δεν παρατηρούνται αρνήσεις εισόδου ή εγκατάλειψη αναμονής.

Το μοντέλο *εξυπηρέτησης* (*service pattern*) συνήθως καθορίζεται από τον *χρόνο εξυπηρέτησης*, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εξυπηρέτηση ενός πελάτη από έναν σταθμό. Ο χρόνος εξυπηρέτησης μπορεί να είναι καθορισμένος (ντετερμινιστικός) ή μπορεί να είναι μια τυχαία μεταβλητή, της οποίας η κατανομή πιθανότητας υποτίθεται ότι είναι γνωστή. Είναι, επίσης, δυνατόν να εξαρτάται από τον αριθμό των πελατών, που βρίσκονται ήδη στον σταθμό εξυπηρέτησης, ή να είναι ανεξάρτητος της κατάστασης του συστήματος. Έχει, επίσης, σημασία εάν ένας πελάτης εξυπηρετείται αποκλειστικά από ένα σταθμό εξυπηρέτησης ή απαιτούνται περισσότεροι.

Η *χωρητικότητα του συστήματος* (*system capacity*) είναι ο μέγιστος αριθμός των πελατών, τόσο αυτών που εξυπηρετούνται όσο και αυτών που βρίσκονται σε αναμονή στον σταθμό εξυπηρέτησης ταυτόχρονα. Κάθε φορά, που ένας πελάτης φθάνει σε σταθμό εξυπηρέτησης ο οποίος είναι πλήρης, δεν επι-



Source of customers = Πηγή πελατών
 Customers arriving = Άφιξη πελατών
 Customer in service = Πελάτης σε εξυπηρέτηση
 Customer departing = Αναχώρηση πελάτη
 Queueing System = Σύστημα Αναμονής
 Queue = Αναμονή
 Server = Σταθμός εξυπηρέτησης
 Single queue, single server = Μια αναμονή, Ένας σταθμός εξυπηρέτησης

Single queue, multiple servers in parallel = Μια αναμονή, Πολλοί παράλληλοι σταθμοί εξυπηρέτησης
 Multiple queues, multiple servers in parallel = Πολλές αναμονές, Πολλοί παράλληλοι σταθμοί εξυπηρέτησης
 Single queue, multiple servers in series = Μια αναμονή, Πολλοί σταθμοί εξυπηρέτησης στην σειρά

Σχήμα 5.14 Παραδείγματα Συστημάτων Αναμονής

τρέπεται η είσοδος του στο σύστημα. Ο πελάτης αυτός δεν επιτρέπεται να περιμένει έξω από τον σταθμό εξυπηρέτησης (εφ' όσον αυτό στην πραγματικότητα αυξάνει την χωρητικότητα), αλλά αναγκάζεται να φύγει χωρίς να εξυπηρετηθεί. Ένα σύστημα, το οποίο δεν έχει όριο ως προς τον αριθμό των πελατών που επιτρέπεται να βρίσκονται μέσα στον σταθμό εξυπηρέτησης, έχει απεριόριστη χωρητικότητα ή δυναμικό (*infinite capacity*), ενώ ένα σύστημα με όριο έχει πεπερασμένη χωρητικότητα ή δυναμικό (*finite capacity*).

Ως κανόνα εξυπηρέτησης της αναμονής (*queue discipline*) ορίζουμε την σειρά, με την οποία εξυπηρετούνται οι πελάτες. Η εξυπηρέτηση των πελατών μπορεί να γίνεται σύμφωνα με την σειρά άφιξης τους. Για παράδειγμα, ο πελάτης που εισέρχεται πρώτος να φεύγει και πρώτος (First-In First-Out, FIFO), ή ο πελάτης που εισέρχεται τελευταίος να φεύγει πρώτος (Last-In First-Out, LIFO). Επίσης, η εξυπηρέτηση μπορεί να γίνεται με τυχαία σειρά ή με σειρά προτεραιότητας.

Ο συμβολισμός του Kendall (*Kendall's notation*) για τον ορισμό των χαρακτηριστικών των αναμονών είναι $v/w/x/y/z$, όπου v είναι το μοντέλο άφιξης, w το μοντέλο εξυπηρέτησης, x ο αριθμός των διαθέσιμων σταθμών εξυπηρέτησης, y η χωρητικότητα του συστήματος και z ο κανόνας εξυπηρέτησης. Διάφοροι συμβολισμοί [10] χρησιμοποιούνται για τα v , w , και z (Πιν. 5.5). Εάν το y (η χωρητικότητα του συστήματος) ή το z (κανόνας εξυπηρέτησης) δεν προσδιορίζονται ακριβώς, τότε δεχόμαστε ότι είναι ∞ ή FIFO, αντίστοιχα.

Queue Characteristics	Symbol	Meaning
Interarrival time (v) or Service time (w)	D	Deterministic
	M	Exponentially distributed
	E_k	Erlang-type- k ($k = 1, 2, \dots$) distributed
	G	Any other distribution
Queue discipline (z)	FIFO	First in, first out
	LIFO	Last in, first out
	SIRO	Service in random order
	PRI	Priority ordering
	GD	Any other specialized ordering

Queue Characteristics = Χαρακτηριστικά της αναμονής

Interarrival time (v) = Χρόνος μεταξύ των αφίξεων

Service time (w) = Χρόνος εξυπηρέτησης

Queue discipline (z) = κανόνας εξυπηρέτησης

Exponentially Distributed = εκθετικά κατανομημένος, -η

Any other distribution = οποιοσδήποτε άλλη κατανομή

Last in, first out = τελευταίο εισέρχεται και πρώτο αναχωρεί

Priority ordering = σειρά προτεραιότητας

Symbol = Σύμβολο

Meaning = Ερμηνεία

Or = ή

Deterministic = προσδιορισμένος (ντετερμινιστικός)

Erlang-type- k ($k = 1, 2, \dots$) distributed = κατανομή τύπου Erlang

First in, First out = πρώτο εισέρχεται, πρώτο αναχωρεί

Last in, First out = τελευταίο εισέρχεται, πρώτο αναχωρεί

Service in random order = η εξυπηρέτηση γίνεται με τυχαία σειρά

Any other specialized ordering = ο οποιοσδήποτε άλλος εξειδικευμένος τρόπος εξυπηρέτησης

Πίνακας 5.5 Συμβολισμός του Μοντέλου Αναμονής

Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα M/D/2/5/LIFO ο χρόνος μεταξύ των αφίξεων έχει εκθετική κατανομή, οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι καθορισμένοι, έχει δυο σταθμούς εξυπηρέτησης, επιτρέπονται μέχρι πέντε (5) πελάτες κάθε χρονική στιγμή μέσα στον σταθμό και ο τελευταίος πελάτης, που φθάνει κάθε φορά, είναι ο επόμενος που εξυπηρετείται. Ένα σύστημα D/D/1 έχει καθορισμένους χρόνους μεταξύ των αφίξεων, καθώς και χρόνους εξυπηρέτησης και μόνο 1 σταθμό εξυπηρέτησης. Αφού η χωρητικότητα του συστήματος και ο κανόνας εξυπηρέτησης δεν είναι καθορισμένοι, τότε θεωρούμε, ότι η χωρητικότητα είναι απεριόριστη και ο κανόνας εξυπηρέτησης είναι FIFO.

Συστήματα M/M/1 (M/M/1 Systems)

Ένα σύστημα M/M/1 είναι ένα σύστημα αναμονής, στο οποίο οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων είναι εκθετικά κατανομημένοι, με παράμετρο λ . Οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι, επίσης, εκθετικά κατανομημένοι με παράμετρο μ . Διαθέτει έναν σταθμό εξυπηρέτησης, έχει απεριόριστη χωρητικότητα και ο κανόνας εξυπηρέτησης ορίζει να εξυπηρετείται πρώτη, η πρώτη άφιξη. Η σταθερά λ , είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης των πελατών, ενώ η σταθερά μ είναι ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης των πελατών. Και οι δύο εκφράζονται σε μονάδες πελατών ανά μονάδα χρόνου. Ο αναμενόμενος χρόνος μεταξύ των αφίξεων και ο αναμενόμενος χρόνος εξυπηρέτησης ανά πελάτη είναι $1/\lambda$ και $1/\mu$, αντίστοιχα.

Αφού οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων είναι εκθετικά κατανομημένοι με μέση τιμή $1/\lambda$ για ένα χρονικό διάστημα τ , δηλαδή ακολουθούν μία κατανομή Poisson με μέση τιμή $\lambda\tau$, τα συστήματα M/M/1 αναφέρονται, συχνά, ως συστήματα αναμονής ενός σταθμού εξυπηρέτησης, απεριόριστης χωρητικότητας, στα οποία οι αφίξεις και ο χρόνος εξυπηρέτησης ακολουθούν κατανομή Poisson.

Οι πιθανότητες της σταθερής κατάστασης (*steady-state probabilities*) για ένα σύστημα αναμονής είναι:

$$p_n \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} p_n(t) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

εάν υπάρχουν τα όρια, όπου $p_n(t)$ είναι η πιθανότητα το σύστημα να έχει ακριβώς n πελάτες την χρονική στιγμή t . Για ένα σύστημα M/M/1, ορίζουμε τον *συντελεστή εκμετάλλευσης (utilization factor ή traffic intensity)* ως

$$\rho \equiv \frac{\lambda}{\mu}$$

δηλαδή, ρ είναι ο αναμενόμενος αριθμός αφίξεων προς τον μέσο χρόνο εξυπηρέτησης. Εάν $\rho < 1$, τότε υπάρχουν οι πιθανότητες της σταθερής κατάστασης, που δίδονται από την σχέση

$$p_n = \rho^n (1 - \rho)$$

Εάν $\rho > 1$, οι αφίξεις γίνονται με ταχύτερο ρυθμό από αυτόν που ο σταθμός

μπορεί να εξυπηρετήσει. Το αναμενόμενο μήκος της αναμονής αυξάνεται χωρίς όριο και επομένως δεν είναι δυνατόν να προκύψει σταθερή κατάσταση στο σύστημα. Μια παρόμοια κατάσταση προκύπτει όταν $\rho = 1$.

Για ένα σύστημα αναμονής σε σταθερή κατάσταση, οι δείκτες, που παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον, είναι:

$L \equiv$ Ο μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα

$L_q \equiv$ Το μέσο μήκος της αναμονής

$W \equiv$ Ο μέσος χρόνος που παραμένει ένας πελάτης στο σύστημα

$W_q \equiv$ Ο μέσος χρόνος που ένας πελάτης παραμένει στην αναμονή

$W(t) \equiv$ Η πιθανότητα ένας πελάτης να παραμένει περισσότερες από t μονάδες χρόνου στο σύστημα

$W_q(t) \equiv$ Η πιθανότητα ένας πελάτης να παραμένει περισσότερες από t μονάδες χρόνου στην αναμονή

Οι τέσσερις πρώτοι δείκτες σχετίζονται σε πολλά συστήματα αναμονής μέσω της σχέσης

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (5-9)$$

και μέσω των τύπων του Little (*Little's Formulas*)

$$L = \bar{\lambda} W \quad (5-10)$$

$$L_q = \bar{\lambda} W_q \quad (5-11)$$

Η εξίσωση, που δίνει τον χρόνο αναμονής (Εξ. 5-9), ισχύει, όταν ο αναμενόμενος χρόνος εξυπηρέτησης είναι συγκεκριμένος, $1/\mu$, για όλους τους πελάτες (όπως στο σύστημα M/M/1). Οι τύποι του Little ισχύουν για συστήματα, στα οποία το $\bar{\lambda}$ συμβολίζει τον μέσο ρυθμό άφιξης πελατών στον σταθμό εξυπηρέτησης.

Για ένα σύστημα M/M/1, όπου $\bar{\lambda} = \lambda$, οι έξι δείκτες είναι αντίστοιχα:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

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

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

$$W_q = \frac{\rho}{\mu - \lambda}$$

$$W(t) = e^{-t/W} \quad (t \geq 0)$$

$$W_q(t) = \rho e^{-t/W} \quad (t \geq 0)$$

Για την αναμονή M/M/1, οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων καθώς και οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένοι. Μια τυχαία μεταβλητή με εκθετική κατανομή έχει την ιδιότητα, ότι οι περισσότερες από τις τιμές που παίρνει να είναι μικρότερες από την μέση τιμή. Εάν η T ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο β , η μέση τιμή του T είναι $1/\beta$. Τότε,

$$P(T \leq 1/\beta) = 1 - e^{-1} \approx 0,632$$

$$P(T \leq 1/2\beta) = 1 - e^{-1/2} \approx 0,393$$

όπου $P(T \leq 1/\beta)$ είναι η πιθανότητα το T να είναι μικρότερο ή ίσο από το $1/\beta$ και $P(T \leq 1/2\beta)$ είναι η πιθανότητα το T να είναι μικρότερο ή ίσο από το $1/2\beta$. Επομένως, συνεπάγεται, ότι το 63% των τιμών είναι μικρότερο από την μέση τιμή και από αυτές τις τιμές το 63% είναι μικρότερο από το ήμισυ της μέσης τιμής.

Από την παραπάνω παρατήρηση συμπεραίνουμε, ότι, σε ένα σύστημα M/M/1 οι περισσότεροι από τους χρόνους μεταξύ των αφίξεων είναι μικρότεροι από την μέση τιμή, ενώ λίγοι είναι πολύ μεγάλοι. Το τελικό αποτέλεσμα είναι, ότι ένας αριθμός πελατών φθάνει σε μια μικρή χρονική περίοδο, οπότε δημιουργείται αναμονή. Ακολουθεί ένα μεγάλο διάστημα κατά το οποίο δε φθάνει κανένας νέος πελάτης, οπότε ο σταθμός εξυπηρέτησης μπορεί να μειώσει το μέγεθος της αναμονής. Επίσης, οι εκθετικά κατανομημένοι χρόνοι εξυπηρέτησης ενός συστήματος M/M/1 το κάνουν να είναι κατάλληλο μοντέλο για σταθμούς εξυπηρέτησης, στους οποίους υπερσχύουν χρόνοι εξυπηρέτησης, οι οποίοι είναι μικρότεροι από την μέση τιμή, σε συνδυασμό με μερικούς, οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι από την μέση τιμή. Μια τέτοια κατάσταση παρουσιάζεται για παράδειγμα στις τράπεζες, όπου η πλειοψηφία των πελατών κάνει απλές καταθέσεις, οι οποίες απαιτούν μικρό χρόνο εξυπηρέτησης από τους ταμίες, ενώ μερικοί πελάτες κάνουν πολύπλοκες συναλλαγές, οι οποίες απαιτούν περισσότερο χρόνο.

Οι εκθετικές κατανομές κατέχουν επίσης την Μαρκοβιανή (Markovian) ιδιότητα:

$$P(T \leq a + b | T > a) = P(T \leq b)$$

Για την αναμονή $M/M/1$, οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων καθώς και οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένοι. Μια τυχαία μεταβλητή με εκθετική κατανομή έχει την ιδιότητα, ότι οι περισσότερες από τις τιμές που παίρνει να είναι μικρότερες από την μέση τιμή. Εάν η T ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο β , η μέση τιμή του T είναι $1/\beta$. Τότε,

$$P(T \leq 1/\beta) = 1 - e^{-1} \approx 0,632$$

$$P(T \leq 1/2\beta) = 1 - e^{-1/2} \approx 0,393$$

όπου $P(T \leq 1/\beta)$ είναι η πιθανότητα το T να είναι μικρότερο ή ίσο από το $1/\beta$ και $P(T \leq 1/2\beta)$ είναι η πιθανότητα το T να είναι μικρότερο ή ίσο από το $1/2\beta$. Επομένως, συνεπάγεται, ότι το 63% των τιμών είναι μικρότερο από την μέση τιμή και από αυτές τις τιμές το 63% είναι μικρότερο από το ήμισυ της μέσης τιμής.

Από την παραπάνω παρατήρηση συμπεραίνουμε, ότι, σε ένα σύστημα $M/M/1$ οι περισσότεροι από τους χρόνους μεταξύ των αφίξεων είναι μικρότεροι από την μέση τιμή, ενώ λίγοι είναι πολύ μεγάλοι. Το τελικό αποτέλεσμα είναι, ότι ένας αριθμός πελατών φθάνει σε μια μικρή χρονική περίοδο, οπότε δημιουργείται αναμονή. Ακολουθεί ένα μεγάλο διάστημα κατά το οποίο δε φθάνει κανένας νέος πελάτης, οπότε ο σταθμός εξυπηρέτησης μπορεί να μειώσει το μέγεθος της αναμονής. Επίσης, οι εκθετικά κατανομημένοι χρόνοι εξυπηρέτησης ενός συστήματος $M/M/1$ το κάνουν να είναι κατάλληλο μοντέλο για σταθμούς εξυπηρέτησης, στους οποίους υπερисχύουν χρόνοι εξυπηρέτησης, οι οποίοι είναι μικρότεροι από την μέση τιμή, σε συνδυασμό με μερικούς, οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι από την μέση τιμή. Μια τέτοια κατάσταση παρουσιάζεται για παράδειγμα στις τράπεζες, όπου η πλειοψηφία των πελατών κάνει απλές καταθέσεις, οι οποίες απαιτούν μικρό χρόνο εξυπηρέτησης από τους ταμίες, ενώ μερικοί πελάτες κάνουν πολύπλοκες συναλλαγές, οι οποίες απαιτούν περισσότερο χρόνο.

Οι εκθετικές κατανομές κατέχουν επίσης την Μαρκοβιανή (Markovian) ιδιότητα:

$$P(T \leq a + b | T > a) = P(T \leq b)$$

Όπου a και b είναι αυθαίρετες σταθερές, $P(T \leq a + b | T > a)$ είναι η πιθανότητα το T να είναι μικρότερο ή ίσο με το $a + b$, έχοντας ως δεδομένο, ότι το T είναι μεγαλύτερο από το a και $P(T \leq b)$ είναι η πιθανότητα το T να είναι μικρότερο ή ίσο του b . Όταν το T μετράει χρόνους μεταξύ των αφίξεων, η πιο πάνω ιδιότητα δείχνει, ότι ο χρόνος μέχρι την επόμενη άφιξη είναι ανεξάρτητος από τον χρόνο της τελευταίας άφιξης. Για τους χρόνους εξυπηρέτησης, η πιο πάνω ιδιότητα δείχνει, ότι ο χρόνος, που απαιτείται για την εξυπηρέτηση ενός πελάτη, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί εάν γνωρίζουμε τον χρόνο που

ήδη εξυπηρετείται ένας πελάτης (δηλαδή, είναι ανεξάρτητος από τον χρόνο εξυπηρέτησης).

Εξαρτημένα Συστήματα Αναμονής (State-Dependent Systems)

Σε αντίθεση με ένα σύστημα M/M/1, σε πολλά συστήματα αναμονής ο ρυθμός άφιξης των πελατών δεν ακολουθεί αυστηρώς κατανομή Poisson με σταθερή παράμετρο λ . Αντίθετα, φαίνεται, ότι ακολουθεί κατανομή παρόμοια με την Poisson, όπου το λ μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό των πελατών στο σύστημα. Επίσης υπάρχει η περίπτωση, οι αναχωρήσεις από το σύστημα να μην ακολουθούν ένα σταθερό μέσο ρυθμό μ , όπως συμβαίνει σε ένα σύστημα M/M/1. Η κατανομή του μ μπορεί επίσης να μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό των πελατών στο σύστημα (κατάσταση του συστήματος). Σε τέτοιες διαδικασίες αναμονής, $\lambda_n \Delta t$ και $\mu_n \Delta t$, είναι αντίστοιχα οι αναμενόμενοι αριθμοί αφίξεων και αναχωρήσεων μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα Δt , εάν το σύστημα είναι στην κατάσταση n στην αρχή του χρονικού διαστήματος. Οι πιθανότητες σταθεράς κατάστασης για αυτές τις διαδικασίες ικανοποιούν τις εξισώσεις:

$$p_n = \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n} p_{n-1} \quad \text{ή} \quad p_n = \frac{\lambda_{n-1} \lambda_{n-2} \dots \lambda_0}{\mu_n \mu_{n-1} \dots \mu_1} p_0 \quad (5-12)$$

στις οποίες το p_0 καθορίζεται από την συνθήκη, ότι το άθροισμα όλων των πιθανοτήτων ισούται με την μονάδα. Αυτό το άθροισμα συγκλίνει με δεδομένο, ότι τα λ δεν είναι πολύ μεγάλα σε σχέση με τα μ . Ειδικότερα, η ύπαρξη μιας σταθερής κατάστασης μπορεί να υποτεθεί εάν:

$$\frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n} < 1$$

για όλα τα μεγάλα n .

Ο τύπος του Little (Εξ. 5-10 και 5-11) ισχύει για εξαρτημένα συστήματα αναμονής εάν:

$$\bar{\lambda} = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n p_n$$

είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης των πελατών στον σταθμό εξυπηρέτησης.

Σε κάθε σύστημα αναμονής, ο αναμενόμενος αριθμός των πελατών στο σύστημα είναι:

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n \quad (5-13)$$

και ο αναμενόμενος αριθμός των πελατών στην αναμονή είναι:

$$L_q = \sum_{n=0}^{\infty} [\max\{n - s_n, 0\}] p_n \quad (5-14)$$

όπου S_n είναι ο αριθμός των σταθμών εξυπηρέτησης, που είναι διαθέσιμοι στην κατάσταση n . Εάν είναι δυνατόν να εκτιμήσουμε το L και το L_q , τότε, γνωρίζοντας το $\bar{\lambda}$, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το W (δηλαδή, τον μέσο χρόνο, που δαπανά ένας πελάτης στο σύστημα) και το W_q (τον μέσο χρόνο, που ένας πελάτης δαπανά στην αναμονή) με την χρήση της εξίσωσης του Little (Εξ. 5-10 και 5-11).

Συστήματα M/M/s

Ένα σύστημα M/M/s είναι μια διαδικασία αναμονής, στην οποία οι αφίξεις ακολουθούν μία κατανομή Poisson. Οι σταθμοί εξυπηρέτησης είναι s , όπου το s είναι ανεξάρτητο, οι χρόνοι εξυπηρέτησης ακολουθούν την ίδια κατανομή και είναι εκθετικοί (δεν εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος). Επίσης, το σύστημα έχει απεριόριστη χωρητικότητα και ο κανόνας εξυπηρέτησης είναι FIFO. Ο ρυθμός των αφίξεων είναι ανεξάρτητος από την κατάσταση του συστήματος, επομένως $\lambda_n = \lambda$ για όλα τα n . Οι χρόνοι εξυπηρέτησης σε κάθε σταθμό είναι επίσης ανεξάρτητοι της κατάστασης του συστήματος, αλλά επειδή ο αριθμός των σταθμών εξυπηρέτησης, οι οποίοι πραγματικά εξυπηρετούν τους πελάτες (δεν είναι ανενεργοί), εξαρτάται από τον αριθμό των πελατών στο σύστημα, ο χρόνος, που χρειάζεται για την εξυπηρέτηση των πελατών, εξαρτάται από την κατάσταση του συστήματος. Συγκεκριμένα, εάν $1/\mu$ είναι ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης, που χρειάζεται ένας σταθμός για την εξυπηρέτηση ενός πελάτη, τότε ο μέσος ρυθμός ολοκλήρωσης της εξυπηρέτησης, όταν υπάρχουν n πελάτες, στο σύστημα είναι:

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & (n = 0, 1, \dots, s) \\ s\mu & (n = s + 1, s + 2, \dots) \end{cases}$$

Συνθήκες σταθερής κατάστασης επικρατούν όταν:

$$\rho \equiv \frac{\lambda}{s\mu} < 1$$

Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης δίνονται από την Εξίσωση (5-12), ως:

$$p_0 = \left[\frac{s^s \rho^{s+1}}{s!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^s \frac{(s\rho)^n}{n!} \right]^{-1}$$

και

$$p_n = \begin{cases} \frac{(s\rho)^n}{n!} p_0 & (n = 0, 1, \dots, s) \\ \frac{s^s \rho^n}{s!} p_0 & (n = s + 1, s + 2, \dots) \end{cases}$$

Με δεδομένο το p_0 (την πιθανότητα, δηλαδή, να μην υπάρχουν καθόλου πελάτες στο σύστημα στην σταθερή κατάσταση), το μέσο μήκος της αναμονής μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$L_q = \frac{s^s \rho^{s+1} p_0}{s!(1-\rho)^2}$$

Αφού προσδιορισθεί το L_q , τα W_q (ο μέσος χρόνος παραμονής του πελάτη στην αναμονή), W (ο μέσος χρόνος, που δαπανά ένας πελάτης στο σύστημα) και L (ο μέσος αριθμός των πελατών στο σύστημα) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (5-11), (5-9) και (5-10), αντίστοιχα, με $\bar{\lambda} = \lambda$. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η εξίσωση (5-9), επειδή ανεξάρτητα από την κατάσταση του συστήματος, ο αναμενόμενος χρόνος εξυπηρέτησης για κάθε πελάτη έχει συγκεκριμένη τιμή ίση με $1/\mu$. Επίσης:

$$W(t) = e^{-\mu t} \left\{ 1 + \frac{(s\rho)^s p_0 [1 - e^{-\mu(s-1-s\rho)}]}{s!(1-\rho)(s-1-s\rho)} \right\} \quad (t \geq 0)$$

$$W_q(t) = \frac{(s\rho)^s p_0}{s!(1-\rho)} e^{-s\mu(1-\rho)t} \quad (t \geq 0)$$

Συστήματα M/M/1/K

Ένα σύστημα M/M/1/K μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι K πελάτες την ίδια χρονική στιγμή. Οι πελάτες, που φθάνουν στον σταθμό όταν αυτός είναι γεμάτος, δεν τους επιτρέπεται να εισέλθουν, ούτε να περιμένουν έξω από τον σταθμό για να εισέλθουν αργότερα. Εάν το λ είναι ο μέσος ρυθμός άφιξης των πελατών στον σταθμό εξυπηρέτησης, τότε ο μέσος ρυθμός αφίξεων στον σταθμό, όταν αυτός είναι σε κατάσταση n , είναι:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & (n = 0, 1, \dots, K-1) \\ 0 & (n = K, K+1, \dots) \end{cases}$$

Πάντα επιτυγχάνεται μια σταθερή κατάσταση του συστήματος, ανεξάρτητα από την τιμή του $\rho \equiv \lambda/\mu$. Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης δίδονται από $p_n = 0$, όταν το n είναι μεγαλύτερο από K και για $n = 0, 1, \dots, K$,

$$p_n = \begin{cases} \frac{\rho^n (1-\rho)}{1-\rho^{K+1}}, & (\rho \neq 1) \\ \frac{1}{K+1}, & (\rho = 1) \end{cases}$$

Οι δείκτες αποτελεσματικότητας υπολογίζονται αρχίζοντας από τον μέσο αριθμό πελατών στο σύστημα,

$$L = \begin{cases} \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(K+1)\rho^{K+1}}{1-\rho^{K+1}}, & (\rho \neq 1) \\ \frac{K}{2}, & (\rho = 1) \end{cases}$$

όπου το W (ο μέσος χρόνος, που ένας πελάτης δαπανά στο σύστημα), το W_q (ο μέσος χρόνος αναμονής ενός πελάτη σε μία αναμονή) και το L_q (το μέσο μήκος της αναμονής) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (5-10), (5-9), και (5-11), αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό αυτών των δεικτών

$$\bar{\lambda} = \lambda(1-p_K) \quad (5-15)$$

Συστήματα $M/M/s/K$

Ένα σύστημα $M/M/s/K$ είναι σύστημα πεπερασμένης χωρητικότητας. Οι σταθμοί εξυπηρέτησης είναι s , με ανεξάρτητους ομοιόμορφα κατανομημένους εκθετικούς χρόνους εξυπηρέτησης, οι οποίοι δεν εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος. Αφού η χωρητικότητα του συστήματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τον αριθμό των σταθμών εξυπηρέτησης, $s \leq K$, για ένα τέτοιο σύστημα,

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & (n = 0, 1, \dots, K-1) \\ 0 & (n = K, K+1, \dots) \end{cases} \quad \mu_n = \begin{cases} n\mu & (n = 0, 1, \dots, s) \\ s\mu & (n = s+1, s+2, \dots) \end{cases}$$

Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης υπάρχουν για όλες τις τιμές της $\rho \equiv \lambda/\mu$, και δίδονται από την Εξίσωση (5-12) ως

$$p_0 = \begin{cases} \left[\frac{s^s \rho^{s+1} (1 - \rho^{K-s})}{s!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^s \frac{(s\rho)^n}{n!} \right]^{-1}, & (\rho \neq 1) \\ \left[\frac{s^s}{s!} (K-s) + \sum_{n=0}^s \frac{s^n}{n!} \right]^{-1}, & (\rho = 1) \end{cases}$$

και

$$p_n = \begin{cases} \frac{(s\rho)^n}{n!} p_0 & (n = 0, 1, \dots, s) \\ \frac{s^s \rho^n}{s!} p_0 & (n = s+1, \dots, K) \\ 0 & (n = K+1, K+2, \dots) \end{cases}$$

Οι δείκτες αποτελεσματικότητας μπορούν να υπολογισθούν, αρχίζοντας με το μέσο μήκος κάθε αναμονής:

$$L_q = \frac{s^s \rho^{s+1}}{s!(1-\rho)^2} [1 - \rho^{K-s} - (1-\rho)(K-s)\rho^{K-s}] p_0$$

Το W_q (ο μέσος χρόνος, που ένας πελάτης περιμένει στην αναμονή), το W (ο μέσος χρόνος, που ένας πελάτης δαπανά στο σύστημα), και το L (ο μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (5-11), (5-9) και (5-10), αντίστοιχα. Το $\bar{\lambda}$ δίδεται πάλι από την εξίσωση (5-15). Ένα σύστημα $M/M/1/K$ είναι ένα $M/M/s/k$ σύστημα με $s = 1$.

Προκειμένου να εξετάσουμε τον τύπο της ανάλυσης, που είναι πιθανός στην θεωρία αναμονών, θεωρούμε μια μηχανή μέσα σε ένα εργοστάσιο, η οποία παρακολουθείται από έναν χειριστή, ο οποίος ενεργεί και σαν υπεύθυνος προετοιμασίας των εργασιών, όταν η μηχανή δεν είναι πολύ απασχολημένη [10]. Τα κομμάτια φθάνουν στην μηχανή, σύμφωνα με μια κατανομή Poisson, με μέσο ρυθμό 30 κομμάτια την ώρα. Ο απαιτούμενος χρόνος για τον χειριστή, για να προετοιμάσει την μηχανή και να επεξεργασθεί το κομμάτι, είναι εκθετικά κατανομημένος, με μέση τιμή 2 min. Όταν υπάρχουν τρία ή περισσότερα κομμάτια, που περιμένουν για την μηχανή (μαζί με το κομμάτι που η μηχανή επεξεργάζεται), ένας δεύτερος χειριστής στο εργοστάσιο παίρνει εντολή να βοηθήσει τον πρώτο χειριστή στην προετοιμασία των εργασιών. Όταν οι χειριστές εργάζονται μαζί, ο χρόνος εξυπηρέτησης για ένα κομμάτι (συμπεριλαμβανομένου του χρόνου προετοιμασίας και επεξεργασίας) παραμένει εκθετικά κατανομημένος, αλλά με μέση τιμή 1 min. Να προσδιορισθεί (α) ο μέσος αριθμός των κομματιών, που βρίσκονται στην μηχανή την ίδια χρονική στιγμή, (β) ο αναμενόμενος χρόνος παραμονής ενός κομματιού στην μηχανή,

(γ) ο αναμενόμενος χρόνος παραμονής ενός κομματιού στην αναμονή πριν την επεξεργασία.

Σε όλη την διαδικασία, ο ρυθμός άφιξης παραμένει ανεξάρτητος της κατάστασης και είναι $\lambda_n = \lambda = 30 \text{ h}^{-1}$. Οι χρόνοι εξυπηρέτησης, ωστόσο, εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος. Όταν υπάρχουν λιγότερα από τρία κομμάτια προς επεξεργασία στην μηχανή, ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης είναι 2 min, οπότε ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης είναι 30 h^{-1} . Όταν υπάρχουν τρία ή περισσότερα κομμάτια στην μηχανή, ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης είναι 1 min, οπότε ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης αυξάνει σε 60 h^{-1} . Επομένως

$$\mu_n = \begin{cases} 30 \text{ h}^{-1} & (n = 1, 2) \\ 60 \text{ h}^{-1} & (n = 3, 4, \dots) \end{cases}$$

Ας σημειωθεί ότι, όταν μια νέα άφιξη αλλάζει την κατάσταση του συστήματος από 2 σε 3, το κομμάτι που βρίσκεται προς επεξεργασία υπόκειται σε μία νέα εκθετική κατανομή (memoryless property).

Από την εξίσωση (5-12) προκύπτει ότι

$$p_1 = \frac{\lambda_0}{\mu_1} p_0 = \frac{30}{30} p_0 = p_0 \quad p_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_2} p_1 = \frac{30}{30} (p_0) = p_0$$

$$p_3 = \frac{\lambda_2}{\mu_3} p_2 = \frac{30}{60} (p_0) = \frac{1}{2} p_0 \quad p_4 = \frac{\lambda_3}{\mu_4} p_3 = \frac{30}{60} \left(\frac{1}{2} p_0\right) = \left(\frac{1}{2}\right)^2 p_0$$

και γενικότερα,

$$p_n = \left(\frac{1}{2}\right)^{n-2} p_0 \quad (n \geq 2)$$

Προκειμένου να βρούμε το p_0 , λαμβάνουμε υπ' όψη ότι το άθροισμα των πιθανοτήτων σταθερής κατάστασης πρέπει να είναι 1,

$$1 = \sum_{n=0}^{\infty} p_n = p_0 + p_1 + \sum_{n=2}^{\infty} p_n = 2p_0 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^{n-2} p_0$$

$$= 2p_0 + \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^j p_0 = 2p_0 + 2p_0 = 4p_0$$

από όπου προκύπτει, ότι το $p_0 = 1/4$. Οπότε,

$$p_n = \begin{cases} \left(\frac{1}{4}\right) & (n = 0,1) \\ \left(\frac{1}{2}\right)^n & (n = 2,3,\dots) \end{cases}$$

(α) Από την Εξίσωση (5-13),

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} np_n = 0 \cdot \frac{1}{4} + 1 \cdot \frac{1}{4} + S, \quad \text{όπου } S = \sum_{n=2}^{\infty} n \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

Για να υπολογίσουμε το S , σημειώστε ότι

$$\sum_{n=2}^{\infty} x^n = \frac{x^2}{1-x}, \quad |x| < 1 \quad (\text{άθροισμα γεωμετρικών σειρών})$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} x^{n+1} = \frac{x^3}{1-x}, \quad |x| < 1 \quad (\text{άθροισμα γεωμετρικών σειρών})$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} nx^n &= \sum_{n=2}^{\infty} (n+1)x^n - \sum_{n=2}^{\infty} x^n = \frac{d}{dx} \left(\sum_{n=2}^{\infty} x^{n+1} \right) - \sum_{n=2}^{\infty} x^n \\ &= \frac{d}{dx} \left(\frac{x^3}{1-x} \right) - \frac{x^2}{1-x} = \frac{-x^3 + 2x^2}{(1-x)^2}, \quad |x| < 1 \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας με $x = 1/2$ στην πιο πάνω εξίσωση, προκύπτει $S = 1,50$. Τελικά, $L = 0,25 + S = 1,75$ κομμάτια κατά μέσο όρο βρίσκονται στην μηχανή στην ίδια χρονική στιγμή

(β) Αφού $\bar{\lambda} = \lambda = 30 \text{ h}^{-1}$, προκύπτει από τον τύπο του Little (Εξισ. 5-10)

$$W = \frac{L}{\lambda} = \frac{1,75}{30} = 0,05833 \text{ ώρες} = 3,5 \text{ λεπτά}$$

(γ) Επειδή οι δυο χειριστές εργάζονται μαζί, ο αριθμός των σταθμών εξυπηρέτησης είναι ανεξάρτητος της κατάστασης του συστήματος στην $s_n = 1$. Τότε από την Εξίσωση (5-14),

$$L_q = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)p_n$$

Από την Εξίσωση (5-13),

$$L = \sum_{n=1}^{\infty} np_n$$

Οπότε

$$L - L_q = \sum_{n=1}^{\infty} p_n = 1 - p_0 \quad \text{ή}$$

$$L_q = L - (1 - p_0) = 1,75 - 0,75 = 1,00 \text{ κομμάτι}$$

και από τον τύπο του Little (Εξ. 5-11),

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{1,00}{30} = 0,0333 \text{ ώρες} = 2 \text{ λεπτά}$$

Παρατηρείστε, ότι ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης ανά κομμάτι είναι

$$W - W_q = 1.5 \text{ λεπτά}$$

5.2.2 Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)

Το πεδίο έρευνας της Τεχνητής Νοημοσύνης αφορά στην μελέτη των ιδεών, που επιτρέπουν στους υπολογιστές να είναι ευφυείς [12]. Οι κύριοι στόχοι είναι αφ' ενός να καταστήσουν τους υπολογιστές χρησιμότερους και αφ' ετέρου να διευκολύνουν στην κατανόηση των αρχών, που καθιστούν δυνατή την ύπαρξη νοημοσύνης. Αφού, ο πρώτος από τους στόχους αυτούς είναι ο πιο σχετικός με τον σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής, δυο εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης, που κάνουν τους υπολογιστές χρησιμότερους, θα περιγραφούν στις επόμενες παραγράφους. Τα εργαλεία αυτά ονομάζονται *αναζήτηση (Search)* και *έμπειρα συστήματα (Rule-based systems)*.

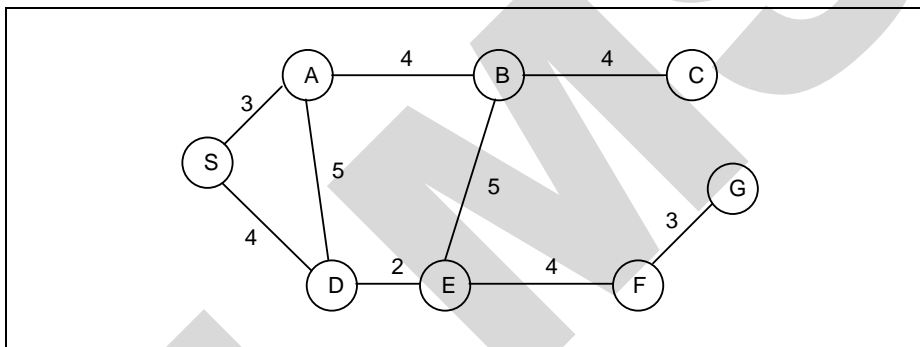
Αναζήτηση (Search)

Εάν θεωρήσουμε τον σχεδιασμό ενός συστήματος παραγωγής ως ένα σύνολο τιμών, έστω n μεταβλητές απόφασης, τότε κάθε εφικτός σχεδιασμός μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σημείο σε ένα χώρο n διαστάσεων. Μια λογική διαδικασία σχεδιασμού πρέπει να αρχίζει από ένα αρχικό σημείο σχεδιασμού. Από αυτό το σημείο, ο υπεύθυνος σχεδιασμού αρχίζει να ερευνά τον χώρο των λύσεων σχεδιασμού, μετακινούμενος από σημείο σε σημείο (δηλαδή, από σχεδιασμό σε σχεδιασμό), αξιολογώντας το κάθε σημείο που προκύπτει. Ένας πεπειραμένος σχεδιαστής χρησιμοποιεί την πληροφορία από προηγούμενες αξιολογήσεις (π.χ., τους δείκτες απόδοσης από προηγούμενους σχεδιασμούς) για να

καθορίσει την διαδρομή των μελλοντικών κινήσεων μέσα στον σχεδιαστικό χώρο. Τελικά, ο σχεδιαστής, έχοντας διαγράψει μία διαδρομή μέσα στον σχεδιαστικό χώρο, θα φθάσει στο τελικό σημείο σχεδιασμού είτε επειδή το βέλτιστο σημείο σχεδιασμού (σύμφωνα με ορισμένους δείκτες απόδοσης) θα έχει ήδη επιτευχθεί ή επειδή οι διαθέσιμες υπολογιστικές δυνατότητες θα έχουν ξεπερασθεί. Και στις δυο περιπτώσεις, αναμένεται ότι το τελικό σημείο σχεδιασμού θα είναι καλύτερο από το αρχικό σημείο εκκίνησης και ότι θα περιγράφει ένα σύστημα παραγωγής, το οποίο θα ικανοποιεί τις διατυπωμένες απαιτήσεις απόδοσης.

Ο κυρίως κορμός των *εμπειρικών (heuristics)* ή "*λογικών*" κανόνων, που ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει, για να καθορίσει μία διαδρομή (πιθανώς σύντομη) μέσα στον σχεδιαστικό χώρο, καλείται *αναζήτηση (search)*. Γενικότερα, οι μέθοδοι αναζήτησης (*search*) βρίσκουν λύσεις διερευνώντας διαδρομές. Αυτό που διαχωρίζει την μια μέθοδο αναζήτησης από την άλλη είναι οι εμπειρικοί ή λογικοί κανόνες, οι οποίοι αποφασίζουν τον τρόπο της διερεύνησης.

Ας υποθέσουμε, ότι θέλουμε να προσδιορίσουμε ένα μονοπάτι μέσα σε ένα δίκτυο πόλεων [12], οι οποίες συνδέονται με δρόμους ταχείας κυκλοφορίας (Σχ. 5.15). Η διαδρομή αρχίζει από την πόλη S, το σημείο εκκίνησης, και τελειώνει στην πόλη G, τον τελικό προορισμό.



Σχήμα 5.15 Ένα Βασικό Πρόβλημα Αναζήτησης. Να προσδιορισθεί η διαδρομή από τον Κόμβο εκκίνησης S, έως τον Κόμβο Προορισμού G.

Η εύρεση κάποιας διαδρομής περιλαμβάνει δύο είδη προσπαθειών:

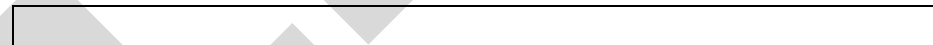
- Πρώτον, την προσπάθεια εύρεσης κάποιας διαδρομής ή την συντομότερη διαδρομή.
- Δεύτερον, την προσπάθεια του να διατρέξουμε (*traversing*) πραγματικά την διαδρομή.

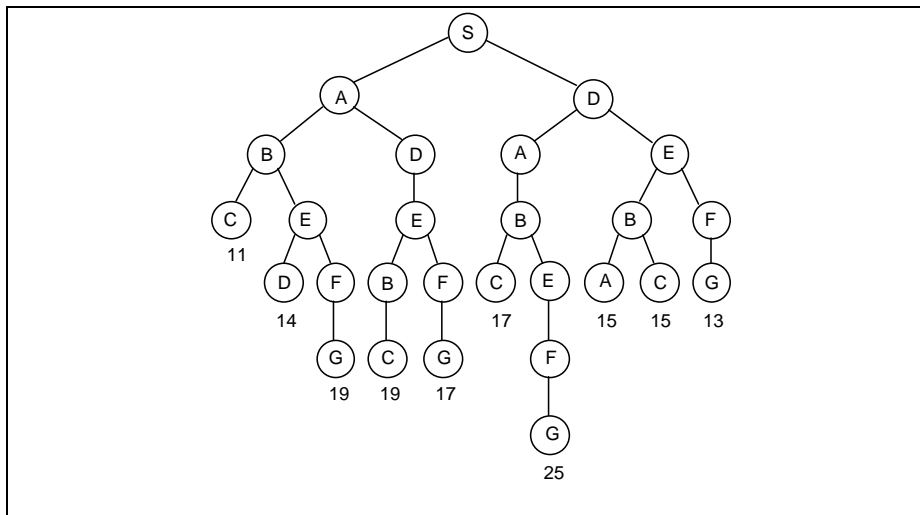
Εάν είναι απαραίτητο να πηγαίνουμε συχνά από τον κόμβο S στον κόμβο G, τότε αξίζει να ευρεθεί μια πραγματικά καλή διαδρομή. Στην περίπτωση, όμως,

ενός και μόνου ταξιδιού και όταν είναι δύσκολο να καθορισθεί μία διαδρομή μέσα από το δίκτυο, τότε είναι προτιμότερο να αρκεσθούμε στην εύρεση μιας οποιασδήποτε διαδρομής, ακόμα και αν μπορούσαμε να βρούμε καλύτερη, με μεγαλύτερη προσπάθεια. Προς το παρόν, θα ασχοληθούμε με το πρόβλημα εύρεσης μιας οποιασδήποτε διαδρομής.

Τον συνηθέστερο τρόπο εύρεσης μιας λύσης αποτελεί ο σχεδιασμός ενός λογιστικού διαγράμματος, το οποίο επιτρέπει την ταξινομημένη διερεύνηση όλων των πιθανών διαδρομών. Να σημειωθεί, ότι στο λογιστικό σχήμα δεν πρέπει να επιτρέπεται η επανάληψη διαδρομής στο δίκτυο. Δεν θα είχε νόημα να ακολουθείται η σειρά S-A-D-S-A-D-..., συνεχώς. Έχοντας αποκλείσει όλες τις επαναλαμβανόμενες διαδρομές, τα δίκτυα είναι ισοδύναμα με δένδρδένδρα. Το δένδρδένδρο του Σχήματος 5.16 [12] δημιουργήθηκε από το δίκτυο του Σχήματος 5.15, ακολουθώντας κάθε πιθανή διαδρομή με κατεύθυνση προς τα έξω, από το σημείο εκκίνησης του δικτύου, μέχρι την άφιξη σε ήδη επισκεφθείσα θέση .

Στα δίκτυα, οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων καλούνται *σύνδεσμοι (links)*, ενώ στα δένδρδένδρα, οι συνδέσεις καλούνται κλάδοι (*branches*). Οι κλάδοι συνδέουν απ' ευθείας τους *γονείς (parents)* με τα *παιδιά (children)*. Ο κόμβος, ο οποίος ευρίσκεται στην κορυφή του δένδρδένδρου, είναι ο μόνος ο οποίος δεν έχει γονέα (*parent*) και καλείται *αρχικός κόμβος (root node)*, π.χ. ο κόμβος S στο Σχήμα 5.16. Οι κόμβοι, οι οποίοι ευρίσκονται στο κάτω μέρος, δηλαδή αυτοί που δεν έχουν παιδιά, καλούνται *τερματικοί κόμβοι (terminal nodes)*. Στο Σχήμα 5.16, φαίνονται οι υπολογισμοί των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων αυτών. Ένας κόμβος είναι *πρόγονος (ancestor)* ενός άλλου, ο οποίος είναι ο *απόγονος (descendant)*, εάν υπάρχει μια αλυσίδα κλάδων μεταξύ αυτών των δύο κόμβων. Εάν ο αριθμός των παιδιών είναι πάντα ο ίδιος για κάθε κόμβο, ο οποίος έχει παιδιά, τότε ο αριθμός αυτός καλείται *συντελεστής διακλάδωσης (branching factor)*. Η σχεδίαση των παιδιών ενός κόμβου, καλείται *επέκταση του κόμβου*. Οι κόμβοι θεωρούνται ανοικτοί μέχρι να επεκταθούν, οπότε μετατρέπονται σε *κλειστούς*.





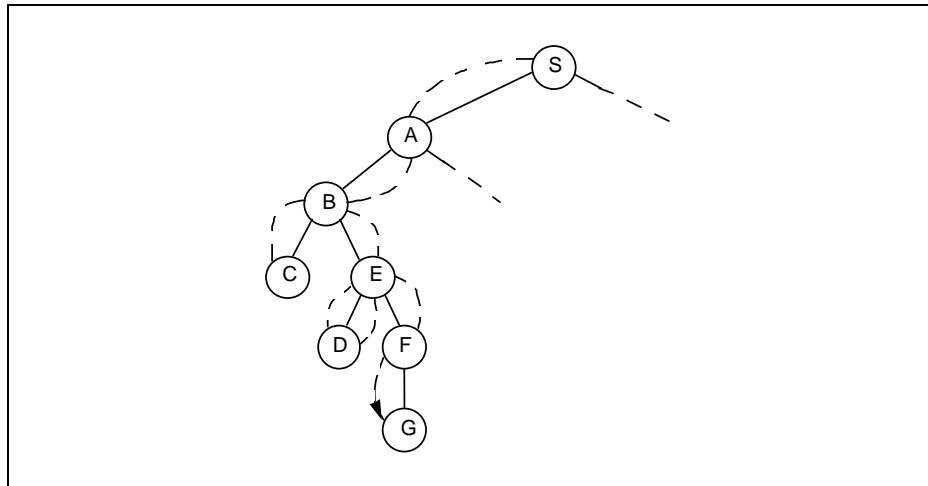
Σχήμα 5.16 Ένα ΔένδρΔένδρο που προέκυψε από ένα Δίκτυο

Εάν σε ένα δίκτυο ένας κόμβος δεν πρόκειται να δεχτεί επίσκεψη δυο φορές, τότε δεν μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από n επίπεδα στο αντίστοιχο δένδρο, όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων –οκτώ στο σχέδιο του παραδείγματος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο στόχος επιτυγχάνεται στο τέλος τεσσάρων ξεχωριστών διαδρομών, όπου το συνολικό μήκος κάθε μίας εξ' αυτών προκύπτει από το άθροισμα συγκεκριμένων αποστάσεων.

Μέθοδος Αναζήτησης ως προς το Βάθος (Depth-First)

Με δεδομένο, ότι μια διαδρομή είναι τόσο καλή όσο οποιοδήποτε άλλη, μια σκέψη είναι να επιλέγουμε σε κάθε κόμβο, που βρισκόμαστε, μια εναλλακτική λύση, με την οποία πηγαίνουμε προς τα εμπρός. Οι άλλες εναλλακτικές λύσεις στο ίδιο επίπεδο αγνοούνται τελείως, όσο υπάρχει η πιθανότητα, ότι θα φθάσουμε στον προορισμό χρησιμοποιώντας την αρχική μας επιλογή. Αυτή είναι η λογική της μεθόδου αναζήτησης ως προς το βάθος (*depth-first*). Κάνοντας την παραδοχή, ότι οι εναλλακτικές λύσεις δοκιμάζονται με σειρά από αριστερά προς τα δεξιά, η πρώτη κίνηση, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.17, είναι μια διακεκομμένη γραμμή από πάνω προς τα κάτω κατά μήκος των πιο αριστερών κλάδων του δένδρου.

Αλλά αφού, η διακεκομμένη αυτή γραμμή οδηγεί στον τερματικό κόμβο C, χωρίς να συναντά τον κόμβο G, το επόμενο βήμα είναι να πάμε προς τα πίσω στον πιο κοντινό πρόγονο κόμβο, στον οποίο υπάρχει μια μη διερευνημένη εναλλακτική λύση. Ο πιο κοντινός τέτοιος κόμβος είναι ο B. Η εναλλακτική λύση, που απομένει στον B, είναι καλύτερη, αφού επιτυγχάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα μέσω του κόμβου E, παρ' όλο που υπάρχει ένα ακόμα αδιέξοδο στον κόμβο D. Το Σχήμα 5.17 [12] δείχνει τους κόμβους, που αναφέρθηκαν στο παραπάνω παράδειγμα.



Σχήμα 5.17 Μέθοδος Αναζήτησης ως προς το Βάθος (Depth-First)

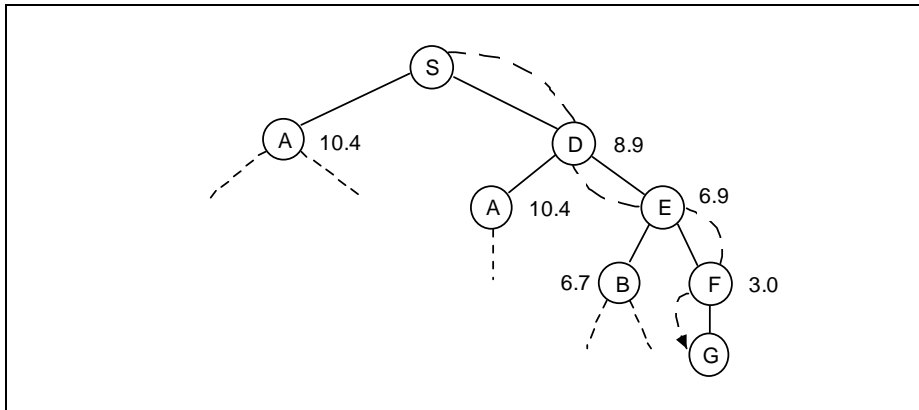
Εάν η διαδρομή μέσω του κόμβου E δεν έφερνε το επιθυμητό αποτέλεσμα, τότε η διαδικασία θα συνεχιζόταν προς τα πίσω, αναζητώντας ένα εφικτό σημείο εκκίνησης για να προχωρήσει προς τα εμπρός. Προκειμένου να φθάσει στο A, θα γινόταν κίνηση προς τα πίσω, ώστε να φθάσει στον προορισμό της μέσω του D.

Η διαδικασία αναζήτησης με την μέθοδο του Βάθους (Depth-first) μπορεί να ορισθεί ως εξής:

1. Σχηματίσατε μια αναμονή ενός στοιχείου, η οποία θα περιλαμβάνει τον κόμβο εκκίνησης.
2. Έως ότου αδειάσει η αναμονή ή επιτευχθεί ο στόχος,
 - 2α. Εάν το πρώτο στοιχείο είναι ο κόμβος στόχος, μην κάνετε τίποτε.
 - 2β. Εάν το πρώτο στοιχείο δεν είναι ο κόμβος στόχος, μετακίνησατε το πρώτο στοιχείο από την αναμονή και προσθέσατε το πρώτο παιδί του στοιχείου που αφαιρέσατε, εάν υπάρχει, στην αρχή της αναμονής.
3. Εάν έχει βρεθεί ο κόμβος στόχος, ανακοινώσατε επιτυχία. Σε ενάντια περίπτωση, αποτυχία.

Η μέθοδος αναζήτησης Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing): Αναζήτηση ως προς το Βάθος (Depth-First Search) με μετρήσεις ποιότητας

Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αναζήτησης μπορεί να βελτιωθεί θεαματικά, εάν είναι δυνατόν να ταξινομηθούν οι διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις με τέτοιο τρόπο, ώστε αυτές που υπόσχονται περισσότερα να διερευνηθούν πρώτες. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι δυνατόν να γίνουν απλές μετρήσεις, ώστε να προκύψει μια λογική ταξινόμηση.



Σχήμα 5.18 Η μέθοδος αναζήτησης Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing)

Για να κινηθούμε μέσα σε ένα δένδρο με διαδρομές, χρησιμοποιώντας την μέθοδο Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing), προχωρούμε όπως και στην μέθοδο ως προς το Βάθος Depth-First Search αλλά ταξινομούμε τις διαφορετικές επιλογές με βάση κάποιο εμπειρικό κριτήριο και ανάλογα με την απόσταση που απομένει στην κάθε διαδρομή. Το Σχήμα 5.18 [12] δείχνει τι συμβαίνει, όταν χρησιμοποιούμε την μέθοδο Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing) στο πρόβλημα εύρεσης της διαδρομής του προηγούμενου παραδείγματος (Σχ. 5.15 και Σχ. 5.16), χρησιμοποιώντας την ευθεία απόσταση για την ταξινόμηση των επιλογών.

Από διαδικαστική άποψη, η μέθοδος αναζήτησης Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing) διαφέρει από την μέθοδο αναζήτησης ως προς το Βάθος (Depth-First Search) σε μια και μόνο λεπτομέρεια, (περιγράφεται στο κείμενο με τα πλάγια γράμματα που ακολουθεί):

1. Σχηματίσατε μια αναμονή ενός στοιχείου, η οποία θα περιλαμβάνει τον κόμβο εκκίνησης.
2. Έως ότου αδειάσει η αναμονή ή επιτευχθεί ο στόχος,
 - 2α. Εάν το πρώτο στοιχείο είναι ο κόμβος στόχος, μην κάνετε τίποτα.
 - 2β. Εάν το πρώτο στοιχείο δεν είναι ο κόμβος στόχος, μετακινήσατε το πρώτο στοιχείο από την αναμονή, ταξινομήσατε τα παιδιά του στοιχείου που αφαιρέσατε, εάν υπάρχουν, σύμφωνα με την απόσταση που απομένει και προσθέσατε το πρώτο παιδί του στοιχείου που αφαιρέσατε, εάν υπάρχει, στην αρχή της αναμονής.
3. Εάν έχει βρεθεί ο κόμβος στόχος, ανακοινώσατε επιτυχία. Σε ενάντια περίπτωση, αποτυχία.

Μια μορφή της μεθόδου αναζήτησης Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing), χρησιμοποιείται και στην βελτιστοποίηση παραμέτρων. Προκειμένου να κι-

νηθούμε στο πεδίο των τιμών των παραμέτρων, χρησιμοποιώντας παραμετροστραφή (parameter-oriented) *Αναρρίχηση Λόφου (Hill Climbing)*, κάνουμε ένα βήμα σε κάθε μια από τις κατευθύνσεις που περιλαμβάνονται σε ένα σταθερό σύνολο, μετακινούμεθα στην καλύτερη εναλλακτική που προσδιορίζουμε και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέχρι να φθάσουμε σε ένα σημείο, το οποίο είναι καλύτερο από όλα τα γειτονικά σημεία, στα οποία φθάσαμε με την διερεύνηση ενός βήματος. Για να εφαρμόσουμε την βελτιστοποίηση των παραμέτρων στον σχεδιασμό ενός συστήματος παραγωγής, οι παράμετροι θα πρέπει να είναι οι μεταβλητές απόφασης, των οποίων οι τιμές καθορίζουν τον σχεδιασμό του συστήματος παραγωγής.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων, με την χρήση της *Αναρρίχησης Λόφου (Hill Climbing)*, υπόκειται σ' έναν αριθμό από περιορισμούς:

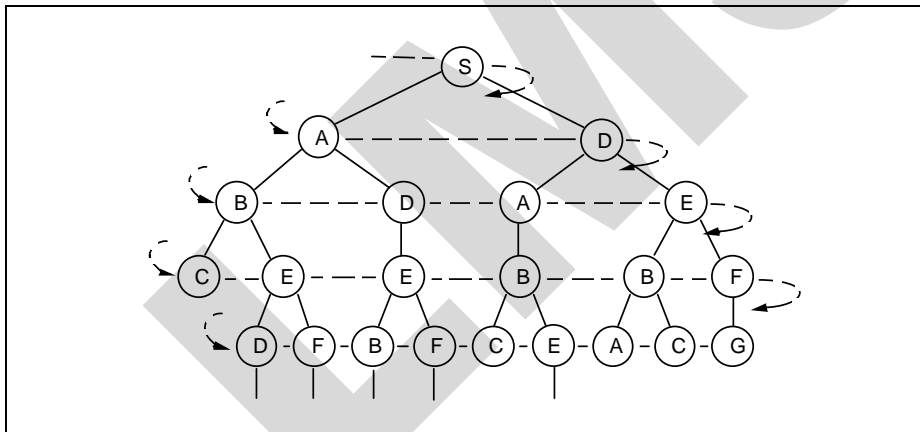
- Το πρόβλημα του πρόποδα του λόφου (*foothill problem*) εμφανίζεται όταν υπάρχουν δευτερεύοντα μέγιστα σημεία. Προσδιορίζεται ένα βέλτιστο σημείο, το οποίο είναι τοπικό και όχι συνολικό.
- Το πρόβλημα του επιπέδου (*plateau problem*) εμφανίζεται, κυρίως, όταν υπάρχει μια επίπεδη περιοχή, η οποία διαχωρίζει τα βέλτιστα σημεία. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία τοπικής βελτίωσης αποτυγχάνει ολοκληρωτικά.
- Το *ridge problem* είναι περισσότερο περίπλοκο. Ας υποθέσουμε ότι

το τρέχον σημείο βρίσκεται σε κάτι που μοιάζει με κόψη μαχαιριού και γενικά κινείται από βορειανατολικά προς νοτιοδυτικά. Οι γνωστές αναζητήσεις κατά ένα βήμα, στην βόρεια, νότια, δυτική και ανατολική κατεύθυνση, υποδεικνύουν ότι όλα τα γειτονικά σημεία είναι χειρότερα από το τρέχον σημείο, ακόμα και αν το τρέχον σημείο δεν είναι ούτε τοπικό ούτε ολικό μέγιστο. Η αύξηση του αριθμού των κατευθύνσεων που χρησιμοποιούνται στις αναζητήσεις μπορεί να φανεί χρήσιμη.

Γενικότερα, τα προβλήματα foothill, plateau, και ridge, επιδεινώνονται όταν ο αριθμός των διαστάσεων των παραμέτρων αυξάνεται.

Η μέθοδος αναζήτησης *Breadth-First Search*

Όταν οι μέθοδοι αναζήτησης, *Depth-First* και *Hill Climbing*, δεν είναι καλές επιλογές, η μέθοδος αναζήτησης *Breadth-First* μπορεί να είναι χρήσιμη. Η μέθοδος αυτή ψάχνει για τον κόμβο στόχο ανάμεσα σε όλους τους κόμβους ενός συγκεκριμένου επίπεδου, πριν χρησιμοποιήσει τα παιδιά των κόμβων του επιπέδου για να προχωρήσει. Στην περίπτωση που φαίνεται στο Σχήμα 5.19 [12], ο κόμβος D θα ελεγχθεί αμέσως μετά τον κόμβο A. Η διαδικασία αυτή θα συνεχισθεί από επίπεδο σε επίπεδο, ανακαλύπτοντας το G στο τέταρτο επίπεδο κάτω από τον κόμβο εκκίνησης.



Σχήμα 5.19 Η μέθοδος αναζήτησης *Breadth-First*

Όπως και στην περίπτωση της μεθόδου *Hill Climbing* η διαδικασία *Breadth-First* μοιάζει με την διαδικασία *depth-first* διαφέροντας μόνο στην θέση που τα νέα στοιχεία θα προστεθούν στην αναμονή.

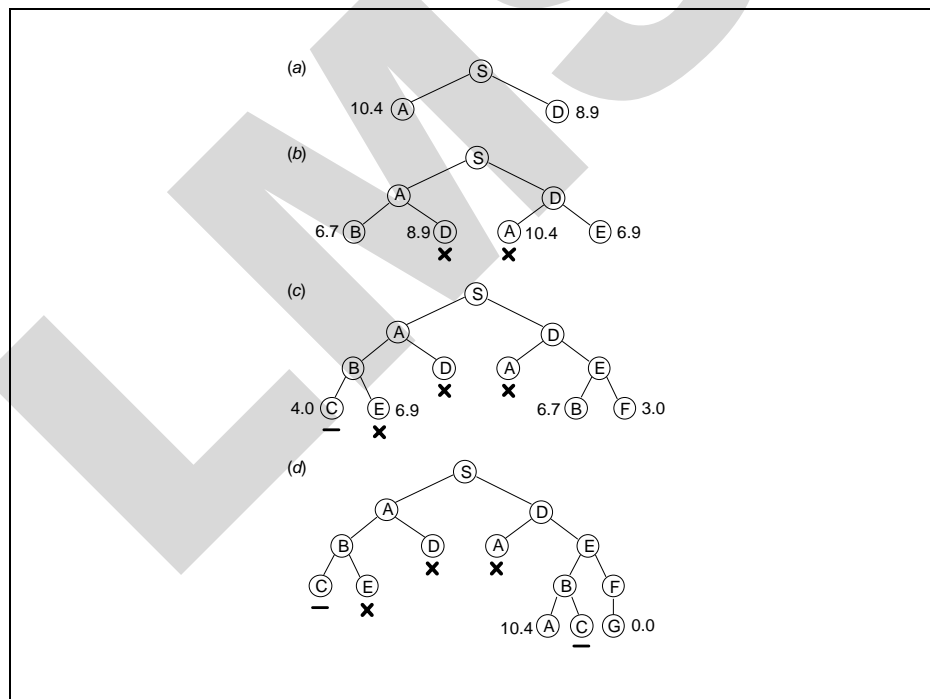
1. Σχημάτισε μια αναμονή ενός στοιχείου η οποία θα περιλαμβάνει τον κόμβο εκκίνησης.

2. Έως ότου αδειάσει η αναμονή ή επιτευχθεί ο στόχος,
 - 2α. Εάν το πρώτο στοιχείο είναι ο κόμβος στόχος, μην κάνεις τίποτα.
 - 2β. Εάν το πρώτο στοιχείο δεν είναι ο κόμβος στόχος, μετακίνησε το πρώτο στοιχείο από την αναμονή, και πρόσθεσε το πρώτο παιδί του στοιχείου που αφαιρέσες, εάν υπάρχει, στην τέλος της αναμονής.
3. Εάν έχει βρεθεί ο κόμβος στόχος, ανακοίνωσε επιτυχία, Διαφορετικά ανακοίνωσε αποτυχία.

Η μέθοδος αναζήτησης *Breadth-First* είναι αποτελεσματική ακόμα και σε δένδρα που έχουν απεριόριστο βάθος. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος αυτή είναι αναποτελεσματική στην περίπτωση που όλες οι διαδρομές που οδηγούν στον κόμβο προορισμού έχουν περίπου το ίδιο βάθος.

Η μέθοδος αναζήτησης Beam Search

Η μέθοδος αναζήτησης *Beam Search* είναι περίπου ίδια με την μέθοδο *Breadth-First* πρώτη επειδή προχωρεί από επίπεδο σε επίπεδο. Μία σημαντική διαφορά των δύο μεθόδων συνίσταται στο γεγονός ότι η μέθοδος αναζήτη-



Σχήμα 5.20 Η εφαρμογή της μεθόδου αναζήτησης *Beam Search* ($w=2$) στο πρόβλημα εύρεσης της διαδρομής

σης *Beam Search* μετακινείται προς τα κάτω μόνο από τους w βέλτιστους κόμβους σε κάθε επίπεδο. Οι άλλοι κόμβοι αγνοούνται.

Επομένως, ο αριθμός των κόμβων προς διερεύνηση παραμένει ελεγχόμενος, παρ' όλο που υπάρχουν πολλές διακλαδώσεις και η έρευνα γίνεται σε βάθος. Εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος αναζήτησης *Beam Search* με πλάτος w σε ένα δένδρο με συντελεστή διακλάδωσης b , θα υπάρχουν μόνο wb κόμβοι προς διερεύνηση σε οποιοδήποτε βάθος, και όχι ο πολύ μεγάλος αριθμός κόμβων, που θα προέκυπτε αν χρησιμοποιούταν η μέθοδος *Breadth-First*. Το Σχήμα 5.20 [12] δείχνει με ποιο τρόπο η μέθοδος αναζήτησης *Beam Search* θα αντιμετώπιζε το πρόβλημα εύρεσης της διαδρομής του παραδείγματος, που περιγράφεται παραπάνω (Σχ. 5.15, και 5.16). Οι αριθμοί δίπλα από τους κόμβους δείχνουν τις αποστάσεις σε ευθεία γραμμή από τον κόμβο στόχο.

Η μέθοδος αναζήτησης Best-First

Όταν η μετακίνηση προς τα εμπρός έχει αποκλεισθεί, η μέθοδος *Hill Climbing* απαιτεί την κίνηση προς τα εμπρός από την τελευταία επιλογή μέσω του φαινομενικά βέλτιστου κόμβου-παιδιού. Στην μέθοδο *Best-First*, η κίνηση προς τα εμπρός γίνεται από τον μέχρι εκείνη την στιγμή βέλτιστο ανοικτό κόμβο, όπου και αν βρίσκεται μέσα στο μερικώς αναπτυγμένο δένδρο.

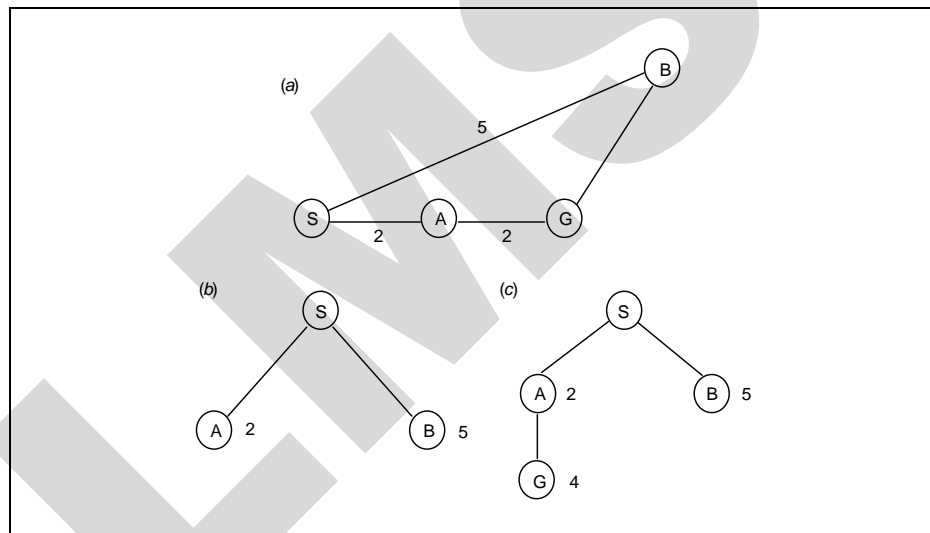
Επιλογή Στρατηγικής αναζήτησης για την εύρεση μιας διαδρομής

Υπάρχουν πολλοί τρόποι εύρεσης μιας διαδρομής, καθένας από τους οποίους έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, ανάμεσα στα οποία είναι:

- Η μέθοδος αναζήτησης *Depth-First* είναι ικανοποιητική όταν οι τυφλές διαδρομές δεν έχουν μεγάλο βάθος.
- Η μέθοδος αναζήτησης *Breadth-First* είναι ικανοποιητική όταν ο αριθμός των εναλλακτικών στα σημεία επιλογής δεν είναι πολύ μεγάλος.
- Η μέθοδος αναζήτησης *Hill Climbing* είναι ικανοποιητική όταν υπάρχει ένα δείκτης για την μέτρηση της απόστασης από τον στόχο, και μια καλή επιλογή ευρίσκεται συνήθως ανάμεσα σε επιλογές που δείχνουν καλές σε κάθε σημείο απόφασης.
- Η μέθοδος *Beam Search* είναι καλή όταν υπάρχει ένα φυσικός δείκτης για την μέτρηση της απόστασης από τον τελικό στόχο, και μια καλή διαδρομή ευρίσκεται συνήθως ανάμεσα σε καλές επιλογές σε κάθε σημείο απόφασης.
- Η μέθοδος *Best-First* είναι καλή όταν υπάρχει ένα φυσικός δείκτης για την μέτρηση της απόστασης από τον τελικό στόχο, και μια καλή διαδρομή μπορεί να φαίνεται άσχημη στα πρώτα επίπεδα.

Η μέθοδος αναζήτησης Branch and Bound Search

Ένας τρόπος για να βρεθούν οι βέλτιστες διαδρομές με λιγότερη προσπάθεια είναι η χρήση της μεθόδου αναζήτησης *branch and bound*. Μια εφαρμογή της μεθόδου *Branch and Bound* είναι αυτή την οποία ήδη συναντήσαμε στην επίλυση των ακέραιων προγραμμάτων. Εδώ, η διαδικασία αναζήτησης θα παρουσιασθεί με έναν περισσότερο γενικό τρόπο. Η βασική ιδέα είναι απλή. Ας υποθέσουμε ότι ζητάμε μια βέλτιστη λύση για το δίκτυο [12] που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21(α). Οι αριθμοί που φαίνονται κάτω από τους κόμβους, στα δένδρα είναι συνολικές αποστάσεις. Κοιτώντας μόνο το πρώτο επίπεδο στο Σχήμα 5.21(β), η απόσταση από τον κόμβο S στον κόμβο A είναι μικρότερη από την απόσταση στον κόμβο B. Ακολουθώντας τον κόμβο A για να φθάσουμε στον προορισμό, στο επόμενο επίπεδο προκύπτει ότι το συνολικό μήκος της διαδρομής είναι 4, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21(γ). Αυτό όμως σημαίνει ότι δεν υπάρχει λόγος να υπολογίσουμε την απόσταση για την εναλλακτική διαδρομή που περνάει από τον κόμβο B εφ' όσον μέχρι τον κόμβο B το μήκος ήταν ήδη 5 το οποίο είναι μεγαλύτερο από την απόσταση που προκύπτει από την ήδη γνωστή λύση μέσω του κόμβου A.



Σχήμα 5.21 Μέθοδος Branch and Bound: Ο Κόμβος B δεν έχει επεκταθεί επειδή η μερική διαδρομή έως το B είναι ήδη Μεγαλύτερη από την Ολοκληρωμένη διαδρομή μέσω του A

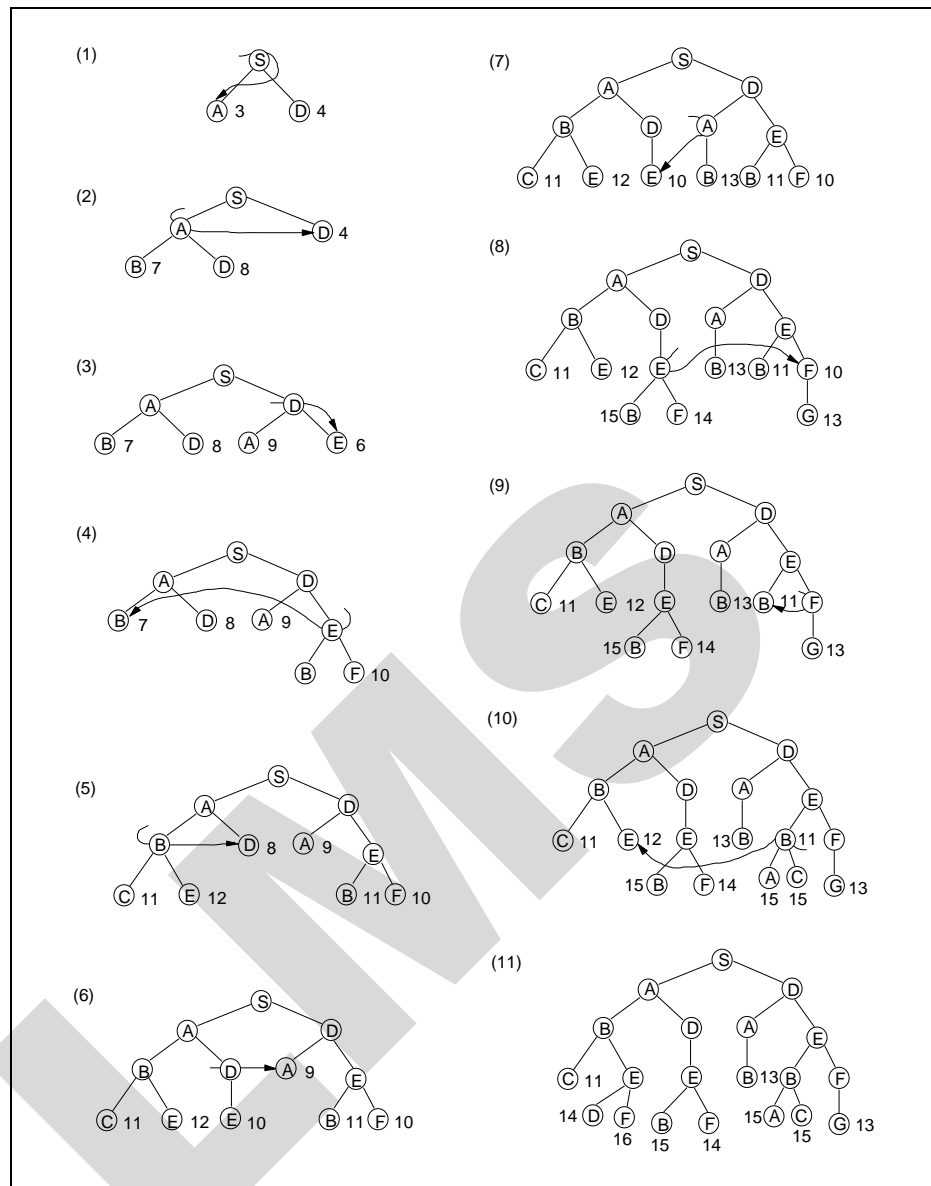
Γενικότερα, η μέθοδος *Branch and Bound* λειτουργεί ως εξής: κατά την διάρκεια της αναζήτησης υπάρχουν πολλές μη ολοκληρωμένες διαδρομές που πρέπει να τα εξεταστούν περαιτέρω. Η συντομότερη διαδρομή επεκτείνεται κατά ένα επίπεδο, δημιουργώντας τόσες νέες μη ολοκληρωμένες διαδρομές όσες και οι διακλαδώσεις. Αυτές οι νέες διαδρομές εξετάζονται μαζί με τις παλιές που

έχουν μείνει και στην συνέχεια επεκτείνεται η συντομότερη διαδρομή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου φθάσουμε στον τελικό προορισμό μέσω κάποιας διαδρομής. Επειδή πάντα επιλέγεται η συντομότερη διαδρομή για να επεκταθεί σε επόμενο επίπεδο, η διαδρομή που πρώτη φθάνει στον τελικό προορισμό, είναι βέβαιο ότι είναι η βέλτιστη. Ωστόσο το τελευταίο βήμα για να φθάσουμε στον προορισμό μπορεί να είναι αρκετά μακρύ ώστε να κάνει την υποτιθέμενη λύση μακρύτερη από μία ή περισσότερες μη-ολοκληρωμένες διαδρομές. Μπορεί ένα μικρό βήμα να οδηγήσει μια μη ολοκληρωμένη διαδρομή στον τελικό προορισμό. Επομένως, αντί η διαδικασία να τερματισθεί όταν βρεθεί μια διαδρομή, η διαδικασία θα ολοκληρωθεί όταν η συντομότερη μη-ολοκληρωμένη διαδρομή είναι μεγαλύτερη από την συντομότερη ολοκληρωμένη διαδρομή.

Η διαδικασία αναζήτησης *Branch and Bound*, με την κατάλληλη συνθήκη τερματισμού είναι:

1. Σχημάτισε μια αναμονή από επιμέρους διαδρομές. Έστω ότι η αρχική αναμονή αποτελείται από διαδρομή μηδενικούμήκους και μηδενικού-βήματος από τον αρχικό κόμβο στο πουθενά.
2. Έως ότου αδειάσει η αναμονή, ή ο τελικός στόχος έχει επιτευχθεί, προσδιόρισε εάν η πρώτη διαδρομή στην αναμονή φθάνει στον τελικό στόχο.
 - 2α. Εάν η πρώτη διαδρομή συναντά τον κόμβο-στόχο, μην κάνεις τίποτα.
 - 2β. Εάν η πρώτη διαδρομή δεν συναντά τον κόμβο-στόχο:
 - 2β1. Αφαίρεσε την πρώτη διαδρομή από την αναμονή.
 - 2β2. Σχημάτισε νέες διαδρομές από την διαδρομή που αφαιρέθηκε επεκτείνοντας την αναζήτηση κατά ένα βήμα.
 - 2β3. Πρόσθεσε τις νέες διαδρομές στην αναμονή.
 - 2β4. Ταξινόμησε την αναμονή με βάση την συνολική απόσταση κάθε διαδρομής μέχρι εκείνη την στιγμή, τοποθετώντας στην αρχή τις διαδρομές με την μικρότερη τιμή.
3. Εάν έχει βρεθεί ο κόμβος στόχος, ανακοίνωσε επιτυχία, Διαφορετικά ανακοίνωσε αποτυχία.

Το Σχήμα 5.22 [12] δείχνει την αλληλουχία αναζήτησης με την μέθοδο *Branch and Bound* όπως εφαρμόζεται στο πρόβλημα εύρεσης της διαδρομής (Σχ. 5.15 και 5.16). Στο πρώτο βήμα, οι κόμβοι A και D αναγνωρίζονται ως κόμβοι-παιδιά του μοναδικού ενεργού κόμβου, S. Η μερική απόσταση της διαδρομής στο A είναι 3 και αυτή στο D είναι 4. Επομένως ο κόμβος A γίνεται τώρα ο ενεργός κόμβος. Στην συνέχεια, οι κόμβοι B και D προκύπτουν από τον κόμβο A με μερικές συνολικές αποστάσεις 7 και 8 αντίστοιχα. Επομένως, ο πρώτος D κόμβος που συναντάμε, με μερική απόσταση 4, γίνεται ο ενεργός κόμβος, και οδηγεί στην δημιουργία των μερικών διαδρομών προς τους κόμβους A και E. Στο σημείο αυτό, υπάρχουν τέσσερις μερικές διαδρομές, με την διαδρομή S-D-E να είναι η περισσότερο σύντομη.



Σχήμα 5.22 Η εφαρμογή της μεθόδου αναζήτησης Branch and Bound στο πρόβλημα εύρεσης της διαδρομής

Μετά το έβδομο βήμα, οι επιμέρους διαδρομές S-A-D-E και S-D-E-F είναι οι συντομότερες. Η επέκταση του S-A-D-E οδηγεί στις διαδρομές οι οποίες τερματίζουν στους κόμβους B και F. Η επέκταση του S-D-E-F, κατά μήκος της δεξιάς πλευράς του δένδρου, οδηγεί στην ολοκληρωμένη διαδρομή S-D-E-F-G, με συνολική απόσταση 13. Αυτή είναι η συντομότερη διαδρομή, αλλά

για να είμαστε απολύτως βέβαιοι, πρέπει δύο ακόμη επιμέρους διαδρομές να επεκταθούν, η S-A-B-E, με μερική απόσταση 12, και η S-D-E-B, με μερική απόσταση 11. Δεν υπάρχει λόγος η διαδρομή S-D-A-B να επεκταθεί, αφού η μερική συνολική της απόστασή είναι 13 και είναι ίση με την απόσταση της ολοκληρωμένης διαδρομής μέχρι τον τελικό στόχο.

Μέθοδοι βελτίωσης της μεθόδου αναζήτησης Branch and Bound

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μέθοδος αναζήτησης *Branch and Bound* μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας υποθέσεις για τις αποστάσεις που απομένουν καθώς επίσης χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα για τις αποστάσεις που έχουν ήδη υπολογισθεί. Μετά από αυτά, εάν μια υπόθεση για μια απόσταση που απομένει είναι καλή, τότε αυτή η απόσταση εάν προστεθεί στην γνωστή απόσταση που έχει ήδη καλυφθεί, τότε αυτή θα είναι μια καλή εκτίμηση του συνολικού μήκους της διαδρομής, e (συνολικό μήκος διαδρομής).

$$e(\text{συνολικό μήκος διαδρομής}) = d(\text{απόσταση που έχει καλυφθεί}) + e(\text{απόσταση που απομένει})$$

όπου d (απόσταση που έχει καλυφθεί) είναι η γνωστή απόσταση που έχει διανυθεί και όπου e (απόσταση που απομένει) είναι μια εκτίμηση της απόστασης που απομένει.

Έχει βεβαίως νόημα να ασχοληθούμε περισσότερο με την ανάπτυξη της διαδρομής που έχει το μικρότερο εκτιμώμενο μήκος έως την στιγμή που θα δημιουργηθεί μια άλλη διαδρομή η οποία θα έχει το μικρότερο εκτιμώμενο μήκος. Μετά από αυτά, εάν οι υποθέσεις ήταν σωστές, αυτή η προσέγγιση θα διατηρηθεί ως η βέλτιστη διαδρομή σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας. Ωστόσο γενικότερα, οι υποθέσεις δεν είναι τέλειες και μια κακή υπερεκτίμηση μέσα σε μια πραγματική βέλτιστη διαδρομή μπορεί να προκαλέσει αμφιβολίες για την βέλτιστη διαδρομή.

Ας σημειωθεί, όμως, ότι τυχόν *υποτίμηση* δεν προκαλεί παράβλεψη της σωστής διαδρομής. Μια υποτίμηση της απόστασης που απομένει οδηγεί σε υποτίμηση του συνολικού μήκους της διαδρομής, u (συνολικό μήκος διαδρομής):

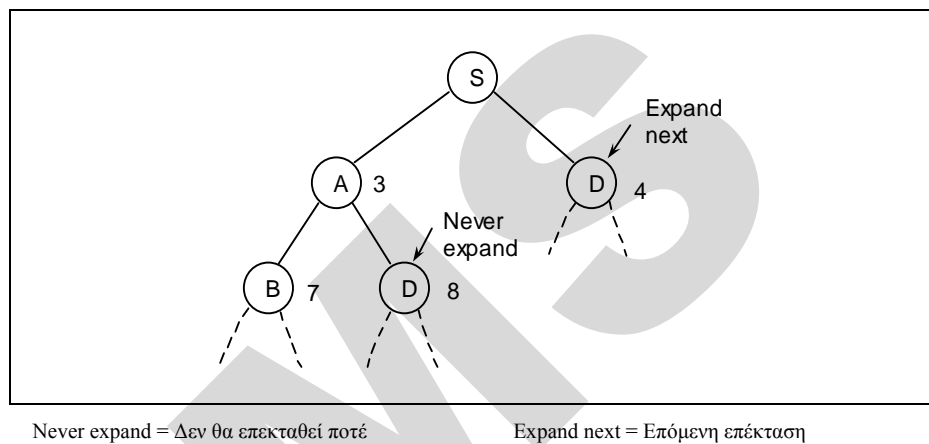
$$u(\text{συνολικό μήκος διαδρομής}) = d(\text{απόσταση που έχει καλυφθεί}) + u(\text{απόσταση που απομένει})$$

όπου d (απόσταση που έχει καλυφθεί) είναι η γνωστή απόσταση που έχουμε ήδη διανύσει και u (απόσταση που απομένει) είναι μια υποτίμηση της απόστασης που απομένει.

Εάν μια συνολική διαδρομή βρεθεί μέσω της επέκτασης της διαδρομής με την μικρότερη υποτίμηση, δεν χρειάζεται περαιτέρω εργασία αφού όλες οι εκτιμήσεις για τις μη ολοκληρωμένες αποστάσεις είναι μεγαλύτερες από την ολοκληρωμένη απόσταση. Αυτό, πράγματι, ισχύει επειδή η πραγματική από-

σταση κατά μήκος μιας ολοκληρωμένης διαδρομής δεν μπορεί να είναι συντομότερη από μια υποεκτίμηση της απόστασης. Εάν όλες οι εκτιμήσεις της απόστασης που απομένει είναι βέβαιο, ότι αποτελούν υποεκτιμήσεις, δεν μπορεί να υπάρξει αποτυχία.

Ένας άλλος τρόπος για να βελτιωθεί η βασική διαδικασία αναζήτησης *Branch and Bound* παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23 [12]. Ο αρχικός κόμβος, S, έχει επεκταθεί, δίνοντας τους κόμβους A και D. Προς το παρόν δεν χρησιμοποιούμε υποεκτιμήσεις για τα μήκη των διαδρομών που απομένουν. Αφού η διαδρομή από το S στο A είναι συντομότερη από την διαδρομή από το S στο D ο κόμβος A έχει αναπτυχθεί και αυτός, δίνοντας τρεις διαδρομές: S-A-B, S-A-D, και S-D. Επομένως, η διαδρομή S-D θα είναι το επόμενο τμήμα που θα επεκταθεί, αφού είναι η επιμέρους διαδρομή με το μικρότερο μήκος.



Σχήμα 5.23 Η Αρχή του Δυναμικού Προγραμματισμού

Τι συμβαίνει όμως με την διαδρομή S-A-D; Θα είχε ποτέ νόημα να την επεκτείνουμε; Η απάντηση είναι σίγουρα όχι. Αφού υπάρχει μια διαδρομή προς το D με μήκος 4, δεν θα είχε νόημα να εργασθούμε με κάποια άλλη διαδρομή προς το D που έχει μήκος 8. Η διαδρομή S-A-D θα έπρεπε να ξεχασθεί τελείως γιατί δεν μπορεί να δώσει νικητή. Αυτό δείχνει κάτι που ισχύει γενικότερα. Υποθέστε ότι η διαδρομή από ένα σημείο εκκίνησης S, σε ένα ενδιάμεσο σημείο I, δεν επηρεάζει την επιλογή της διαδρομής για μετακίνηση από το σημείο I στο σημείο στόχο G. Τότε η ελάχιστη απόσταση από το S στο G μέσω του I είναι το άθροισμα της ελάχιστης απόστασης από το S στο I και της ελάχιστης απόστασης από το I στο G. Επομένως, η αρχή του Δυναμικού Προγραμματισμού θεωρεί ότι όταν αναζητούμε την βέλτιστη διαδρομή από τον κόμβο S στον G, όλες οι διαδρομές από το S σε οποιοδήποτε ενδιάμεσο κόμβο, I, εκτός από την διαδρομή από το S στο I με το μικρότερο μήκος, μπορούν να αγνοηθούν.

A: Βελτίωση της μεθόδου αναζήτησης Branch and Bound*

Η διαδικασία A^* είναι μια μέθοδος αναζήτησης *Branch and Bound*, με μια εκτίμηση της απόστασης που απομένει, σε συνδυασμό με την μέθοδο του Δυναμικού-Γραμμικού Προγραμματισμού. Εάν η εκτίμηση της απόστασης που απομένει αποτελεί ένα κατώτερο όριο της πραγματικής απόστασης, τότε η διαδικασία A^* δημιουργεί βέλτιστες λύσεις. Γενικότερα, η εκτίμηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί εκτίμηση του κατώτερου ορίου, εκτός και αν δηλωθεί κάτι διαφορετικό.

Για να εφαρμόσουμε την μέθοδο αναζήτησης A^* :

1. Σχημάτισε μια αναμονή μη ολοκληρωμένων διαδρομών. Έστω ότι η αρχική αναμονή αποτελείται από την διαδρομή μηδενικού μήκους και μηδενικού βήματος από τον αρχικό κόμβο στο πουθενά.
2. Έως ότου αδειάσει η αναμονή, ή επιτευχθεί ο τελικός στόχος, προσδιόρισε εάν η πρώτη διαδρομή στην αναμονή φθάνει στον τελικό στόχο.
 - 2α. Εάν η πρώτη διαδρομή συναντά τον κόμβο-στόχο, μην κάνεις τίποτα.
 - 2β. Εάν η πρώτη διαδρομή δεν συναντά τον κόμβο-στόχο:
 - 2β1. Αφαίρεσε την πρώτη διαδρομή από την αναμονή.
 - 2β2. Σχημάτισε νέες διαδρομές από την διαδρομή που αφαιρέθηκε επεκτείνοντας την αναζήτηση κατά ένα βήμα.
 - 2β3. Πρόσθεσε τις νέες διαδρομές στην αναμονή.
 - 2β4. Ταξινόμησε την αναμονή με βάση το άθροισμα που προκύπτει από την πρόσθεση της συνολικής απόστασης κάθε διαδρομής, μέχρι εκείνη την στιγμή, με την εκτιμώμενη χαμηλότερη τιμή της απόστασης που απομένει, τοποθετώντας στην αρχή τις διαδρομές με την μικρότερη τιμή.
 - 2β5. Εάν δυο ή περισσότερες διαδρομές φθάνουν σε έναν κοινό κόμβο, διέγραψε όλες αυτές τις διαδρομές εκτός από μια που φθάνει στον κοινό κόμβο με το ελάχιστο κόστος.
3. Εάν έχει βρεθεί ο κόμβος στόχος, ανακοίνωσε επιτυχία. Διαφορετικά ανακοίνωσε αποτυχία.

Επιλογή μιας Στρατηγικής Αναζήτησης για την Εύρεση μιας Βέλτιστης Διαδρομής

Υπάρχουν πολλοί τρόποι εύρεσης βέλτιστων διαδρομών, καθένας από τους οποίους έχει πλεονεκτήματα, ορισμένα από τα οποία είναι:

- Η μέθοδος αναζήτησης *Branch and Bound* είναι ικανοποιητική όταν το δένδρο είναι μεγάλο και οι διαδρομές που δεν ικανοποιούν φαίνονται γρήγορα.

- Η μέθοδος αναζήτησης *Branch and Bound* με εκτίμηση, είναι ικανο

LMS

ποιητική όταν υπάρχει μια καλή εκτίμηση του κατώτερου ορίου της απόστασης που απομένει έως τον στόχο.

- Ο Δυναμικός Προγραμματισμός είναι χρήσιμος όταν πολλές διαδρομές φθάνουν σε κοινούς κόμβους.
- Η διαδικασία A^* είναι ικανοποιητική όταν και οι δυο μέθοδοι, *Branch and Bound* με εκτίμηση και δυναμικός προγραμματισμός, συμπεριφέρονται ικανοποιητικά.

Έμπειρα Συστήματα (Rule-Based Systems)

Τα Έμπειρα Συστήματα (*Rule-based systems*), βασίζονται σε κανόνες (*rules*) οι οποίοι αποτελούνται από ένα τμήμα «εάν» (*if*) και ένα τμήμα «τότε» (*then*) [12] (π.χ., *Εάν* η συνθήκη 1, η συνθήκη 2,... είναι αληθινές, τότε εφαρμόσε την ενέργεια 1, την ενέργεια 2, ...).

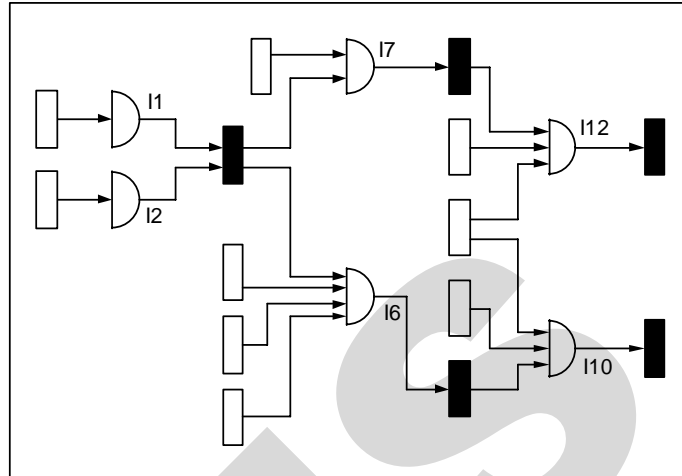
Ένα έμπειρο σύστημα αποτελείται από δυο κύρια μέρη: μια βάση κανόνων (*rule-base*) και ένα μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων (*inference engine*). Η βάση κανόνων είναι μια συλλογή από κανόνες που εμπεριέχει την ανθρώπινη εμπειρία ή λογική σε μια συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων. Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων είναι λογισμικό το οποίο χρησιμοποιεί τους κανόνες της βάσης κανόνων για να λύσει τα προβλήματα.

Στις περισσότερες βάσεις κανόνων, οι κανόνες αλληλοσχετίζονται ως εξής, η εφαρμογή μιας ενέργειας του (*then*) τμήματος ενός κανόνα, μπορεί να δημιουργήσει τις προϋποθέσεις μια συνθήκη στο (*if*) τμήμα ενός άλλου κανόνα να γίνει αληθινή. Αυτοί οι συσχετισμοί μπορούν να αναπαρασταθούν [12] με την μορφή ενός δικτύου εξαγωγής συμπερασμάτων (*inference net*) (Σχ. 5.24). Σε ένα δίκτυο εξαγωγής συμπερασμάτων, κάθε κανόνας αναπαριστάται από ένα ημικύκλιο με μια ονομασία δίπλα του. Ένα γεγονός αναπαριστάται από ένα ορθογώνιο. Ένα ορθογώνιο που προηγείται ενός κανόνα, αναπαριστά ένα γεγονός το οποίο απαιτείται για να ορισθεί το αληθές ή το ψευδές μιας συνθήκης του τμήματος (*if*) του κανόνα. Ένα ορθογώνιο που ακολουθεί έναν κανόνα αναπαριστά ένα γεγονός το οποίο ορίζεται από την εφαρμογή των ενεργειών του τμήματος (*then*) του κανόνα. Τα λευκά ορθογώνια αναπαριστούν δεδομένη κατάσταση. Τα μαύρα ορθογώνια αναπαριστούν γεγονότα που προκύπτουν κατά την διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων.

Υπάρχουν δυο τρόποι με τους οποίους ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων μιας βάσης κανόνων λύνει τα προβλήματα. Αυτοί αναφέρονται ως, προς τα εμπρός σύνδεση (*forward chaining*) και προς τα πίσω σύνδεση (*backward chaining*). Στην προς τα εμπρός σύνδεση, ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων απαντά στην ερώτηση "*Ποιές ενέργειες πρέπει να γίνουν*". Ο μηχανισμός λειτουργεί κατευθυνόμενος προς τα εμπρός (από αριστερά προς τα δεξιά) μέσα στο δίκτυο συμπερασμάτων, με την ακόλουθο τρόπο:

1. Μέχρι να λυθεί το πρόβλημα ή όταν κανένα (*if*) τμήμα των κανόνων δεν ικανοποιείται με την παρούσα κατάσταση:

- 1.1 Συλλέξτε τους κανόνες των οποίων τα (*if*) τμήματα ικανοποιούνται. Αν περισσότερα από ένα (*if*) τμήματα ικανοποιούνται, χρησιμοποιείτε μια διαδικασία επιλογής μεταξύ των αντικρουόμενων κανόνων, ώστε να περιορισθούν σε ένα.
- 1.2 Εφαρμόστε τις ενέργειες του (*then*) τμήματος του κανόνα.



Σχήμα 5.24 Ένα Παράδειγμα Δικτύου εξαγωγής Συμπερασμάτων (Inference Net)

Όταν όλες οι συνθήκες σε ένα κανόνα ικανοποιούνται με την παρούσα κατάσταση τότε ο κανόνας χαρακτηρίζεται ως *κανόνας προς εκτέλεση (triggered)*. Όταν εφαρμοσθούν όλες οι ενέργειες ενός κανόνα, τότε αυτός χαρακτηρίζεται ως *ήδη εκτελεσμένος κανόνας (fired rule)*. Έτοιμος προς εκτέλεση δε σημαίνει πάντα ότι θα εκτελεσθεί, επειδή οι συνθήκες μερικών κανόνων μπορεί να ικανοποιούνται ταυτόχρονα. Η προετοιμασία όλων των κανόνων για εκτέλεση, καθιστά απαραίτητη μια διαδικασία επίλυσης των διαφορών μεταξύ των αντικρουόμενων κανόνων, ώστε να αποφασισθεί ποιος κανόνας τελικά θα εκτελεσθεί. Ακολουθούν μερικές περιπτώσεις:

- *Διάταξη σύμφωνα με την ιδιαιτερότητα (Specificity ordering)*. Υποθέστε ότι οι συνθήκες ενός κανόνα προς εκτέλεση είναι ένα υπερσύνολο των συνθηκών ενός άλλου κανόνα προς εκτέλεση. Χρησιμοποιείτε τον κανόνα με το υπερσύνολο με την έννοια ότι αυτός είναι πιο ειδικευμένος για την παρούσα κατάσταση.
- *Διάταξη σύμφωνα με τον κανόνα (Rule ordering)*. Διατάξτε όλους τους κανόνες σε μια λίστα προτεραιότητας. Ο κανόνας προς εκτέλεση ο

οποίος θα εμφανίζεται πρώτος στην λίστα θα έχει την υψηλότερη προτεραιότητα. Αγνοήστε τους υπόλοιπους.

- *Διάταξη σύμφωνα με τα δεδομένα (Data ordering)*. Διατάξτε όλες τις πιθανές περιπτώσεις της κατάστασης σε μια λίστα προτεραιότητας. Θα επιλεγεί ο κανόνας προς εκτέλεση που έχει την συνθήκη με την υψηλότερη προτεραιότητα.
- *Διάταξη σύμφωνα με το μέγεθος (Size ordering)*. Αναθέστε την υψηλότερη προτεραιότητα στον κανόνα προς εκτέλεση με τις αυστηρότερες απαιτήσεις, όπου οι κανόνες με τις αυστηρότερες απαιτήσεις είναι αυτοί με τον μεγαλύτερο αριθμό περιορισμών.
- *Διάταξη σύμφωνα με την χρονική σειρά (Recency ordering)*. Θεωρήστε ότι ο περισσότερο πρόσφατα χρησιμοποιημένος κανόνας έχει την υψηλότερη προτεραιότητα, ή θεωρήστε τον λιγότερο πρόσφατα χρησιμοποιημένο κανόνα να έχει την υψηλότερη προτεραιότητα.
- *Διάταξη σύμφωνα με το περιεχόμενο (Context Limiting)*. Μειώστε την πιθανότητα ύπαρξης αντικρουόμενων κανόνων χωρίζοντας τους κανόνες σε ομάδες, κατά τρόπο ώστε μόνο μερικές από αυτές να είναι ενεργές σε κάθε χρονική στιγμή. Χρησιμοποιείστε μια διαδικασία η οποία να ενεργοποιεί και απενεργοποιεί ομάδες κανόνων.

Φυσικά, έχοντας ένα σύνολο επιλογών δε σημαίνει ότι υπάρχει επιστήμη ανάλυσης των αντικρουόμενων κανόνων. Η επιλογή μιας στρατηγικής γίνεται κυρίως την στιγμή που προκύπτει η ανάγκη.

Στην διαδικασία της *προς τα πίσω σύνδεσης (backward chaining)* ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων απαντά στην ερώτηση "Θα έπρεπε να εφαρμοσθεί μία συγκεκριμένη ενέργεια;". Η διαδικασία αυτή λειτουργεί με κατεύθυνση προς τα πίσω (από δεξιά προς αριστερά) μέσα στο δίκτυο εξαγωγής συμπερασμάτων, αρχίζοντας από έναν κανόνα του οποίου το τμήμα (*then*) περιλαμβάνει την υπό ερώτηση ενέργεια. Για να βρεθεί αν η ενέργεια θα έπρεπε να γίνει, ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων προσπαθεί να βρει αν ο κανόνας έπρεπε να εκτελεσθεί. (Η ενέργεια έπρεπε να γίνει αν ο κανόνας θα έπρεπε να εκτελεσθεί). Αν ένα γεγονός που είναι απαραίτητο για τον προσδιορισμό αυτόν, μπορεί να καθορισθεί από τις ενέργειες ενός άλλου κανόνα, ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων προσπαθεί να βρει αν ο *άλλος* κανόνας έπρεπε να εκτελεσθεί, και ούτω καθ' εξής. Για την δημιουργία γεγονότων τα οποία δε μπορούν να προέλθουν από άλλους κανόνες, ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων απευθύνεται στον χρήστη του έμπειρου συστήματος. Αφού τα γεγονότα έχουν δημιουργηθεί, ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων είτε συμπεραίνει αν η ενέργεια θα έπρεπε να γίνει, ή πληροφορεί τον χρήστη ότι δεν υπάρχουν αρκετά γεγονότα για να εξαχθεί συμπέρασμα.

Ένας μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων μπορεί να λειτουργήσει με κατεύθυνση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Αλλά ποία επιλογή είναι η καλύτερη; Η απάντηση εξαρτάται από τον στόχο και από την μορφή του χώρου

αναζήτησης. Βέβαια, αν ο στόχος είναι να ανακαλυφθούν όλα όσα μπορούν να προκύψουν από ένα δεδομένο σύνολο γεγονότων, τότε ο μηχανισμός πρέπει να λειτουργήσει με κατεύθυνση προς τα εμπρός. Από την άλλη μεριά, αν ο σκοπός είναι να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί ένα συγκεκριμένο συμπέρασμα, τότε ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων θα έπρεπε να λειτουργήσει με κατεύθυνση προς τα πίσω, επειδή πολλά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από ένα αρχικό σύνολο γεγονότων τα οποία να μην είναι σχετικά με το τελικό συμπέρασμα. Αν αυτά τα γεγονότα τροφοδοτούνταν σε έναν μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων με κατεύθυνση προς τα εμπρός, τότε θα χανόταν αρκετός χρόνος και θα χρειαζόταν αρκετή δουλειά στην ανάπτυξη όλων των πιθανών συνδυασμών.

Καθορισμός της αξιοπιστίας του αποτελέσματος μέσω συντελεστών βεβαιότητας

Τα Έμπειρα συστήματα, ιδίως αυτά που χρησιμοποιούνται για αναγνώριση, όπως στο παραπάνω παράδειγμα, συνήθως λειτουργούν σε περιοχές όπου τα συμπεράσματα είναι σπανίως βέβαια. Για τον λόγο αυτό οι υπεύθυνοι ανάπτυξης έμπειρων συστημάτων συχνά αναπτύσσουν κάποια διαδικασία υπολογισμού βεβαιότητας πέρα από τον βασικό μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων. Γενικά, οι διαδικασίες υπολογισμού βεβαιότητας προσδίδουν έναν αριθμό μεταξύ 0 και 1 σε κάθε γεγονός. Αυτός ο αριθμός, που καλείται *συντελεστής βεβαιότητας*, δηλώνει πόσο σίγουρο είναι το γεγονός, με το 0 να δείχνει ότι το γεγονός είναι απολύτως ψευδές και το 1 να δείχνει ότι το γεγονός είναι απολύτως αληθές.

Επειδή, ο υπολογισμός των συντελεστών βεβαιότητας έχει πρακτική σημασία, ας εξετάσουμε τις υπάρχουσες διαδικασίες υπολογισμού. Ωστόσο, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι καμία από αυτές τις διαδικασίες δεν είναι εντελώς ικανοποιητική.

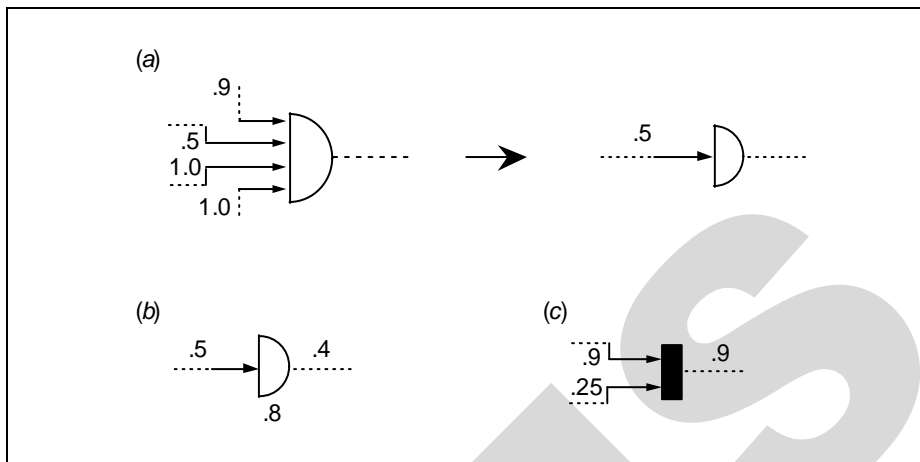
Κάθε διαδικασία υπολογισμού συντελεστών βεβαιότητας πρέπει να εμπεριέχει απαντήσεις σε τρία ερωτήματα. Πρώτον, πώς η βεβαιότητα που συσχετίζεται με τα (*if*) τμήματα ενός κανόνα συσχετίζεται με την *αρχική συνολική βεβαιότητα (overall input certainty)* του κανόνα; Δεύτερον, πώς ο κανόνας, τροποποιεί την αρχική βεβαιότητα στην *βεβαιότητα κατά την έξοδο (output certainty)*; Τρίτον, πώς υπολογίζεται η βεβαιότητα ενός γεγονότος, όταν τα (*then*) τμήματα μερικών κανόνων την υποστηρίζουν, απαιτώντας τον υπολογισμό μιας *πολλαπλά αποδεκτής βεβαιότητας (multiply argued certainty)*;

Μια απλή διαδικασία δίδει απαντήσεις με τον ακόλουθο τρόπο:

- Η ελάχιστη βεβαιότητα[12] που σχετίζεται με τα (*if*) τμήματα του κανόνα γίνεται η αρχική βεβαιότητα όλου του κανόνα (Σχ. 5.25(a)). Αυτό είναι ανάλογο με την ιδέα ότι μια αλυσίδα είναι τόσο δυνατή όσο και ο πιο αδύναμος κρίκος της.
- Η περιγραφή κάθε κανόνα περιλαμβάνει τις τιμές ενός συντελεστή σμίκρυνσης, ο οποίος όπως και οι συντελεστές βεβαιότητας παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Για τον υπολογισμό της βεβαιότητας της εξόδου

ενός κανόνα [12], η βεβαιότητα κατά την είσοδο στον κανόνα πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή σμίκρυνσης (Σχ. 5.25 (b)).

- Με αρκετούς κανόνες να υποστηρίζουν κάποιο συγκεκριμένο γεγονός, η ολική βεβαιότητα [12] που χαρακτηρίζει αυτό το γεγονός είναι η μέγιστη βεβαιότητα που προτείνεται από τους κανόνες που το υποστηρίζουν (Σχ.5.25(c)). Έτσι, η ισχύς ενός γεγονότος επηρεάζεται μόνο από τον ισχυρότερο των κανόνων υποστήριξης.



Σχήμα 5.25 Μια Ad-Hoc μέθοδος για τον υπολογισμό της βεβαιότητας γεγονότων

Ένας άλλος τρόπος, να θεωρήσης της βεβαιότητας σε ένα δίκτυο εξαγωγής συμπερασμάτων, βασίζεται σε μια αναλογία μεταξύ βεβαιότητας και πιθανοτήτων:

- Η βεβαιότητα στην είσοδο ενός κανόνα προκύπτει από το γινόμενο των βεβαιοτήτων που σχετίζονται με τα *(if)* τμήματα του κανόνα.
- Η βεβαιότητα στην έξοδο ενός κανόνα δίνεται από μια μονοσήμαντη συνάρτηση που έχει την βεβαιότητα εισόδου στον έναν άξονα και την βεβαιότητα εξόδου στον άλλον.
- Η βεβαιότητα ενός γεγονότος, που υποστηρίζεται από αρκετούς κανόνες, καθορίζεται από την μετατροπή των βεβαιοτήτων σε σχετικά μεγέθη, που καλούνται αναλογίες βεβαιότητας (*certainty ratios*), οι οποίες αφού υποστούν επεξεργασία από μια απλή μαθηματική σχέση το αποτέλεσμα μετατρέπεται τελικά πάλι σε βεβαιότητα.

Η απλούστερη αυτών των ιδεών είναι ότι η συνολική βεβαιότητα εισόδου προκύπτει από το γινόμενο των βεβαιοτήτων του *(if)* τμήματος. Η ιδέα αυτή έχει προκύψει κατευθείαν από την άποψη, ότι η πιθανότητα ενός συνδυασμέ-

νου γεγονότος είναι το γινόμενο των πιθανοτήτων των εμπλεκόμενων γεγονότων, αρκεί αυτά να μην έχουν επίδραση το ένα στο άλλο. Όταν ρίχνουμε ένα νόμισμα, για παράδειγμα, η πιθανότητα, να έρθει δυο φορές στην σειρά κεφαλή, είναι το τετράγωνο της πιθανότητας να έρθει κεφαλή σε ένα ρίξιμο. Συνοψίζοντας τον υπολογισμό, μπορεί να εκφρασθεί ως αλγεβρική σχέση που περιλαμβάνει τις βεβαιότητες c_i των (if) τμημάτων:

$$c_1 \times \cdots \times c_n$$

Ένα πρόβλημα βασισμένο σε αυτήν την ιδέα έχει να κάνει με την προαπαίτηση της ανεξαρτησίας των εμπλεκόμενων γεγονότων. Στο παράδειγμα του νομίσματος, τα γεγονότα είναι ανεξάρτητα αφού δεν επιδρούν το ένα στο άλλο. Τα (if) τμήματα ενός κανόνα συχνά είναι εξαρτημένα γεγονότα, και επομένως, ο συνδυασμός τους με πολλαπλασιασμό δεν είναι μια διαδικασία που υπολογίζει μια πιθανότητα από πιθανότητες. Αυτό που υπολογίζουμε είναι ανάλογο σε μια πιθανότητα, αλλά η μαθηματική σχέση που τα συνδυάζει δεν επιβεβαιώνεται από την θεωρία πιθανοτήτων.

Όταν υπολογισθεί μια βεβαιότητα εισόδου, το επόμενο βήμα είναι η χρήση της για τον υπολογισμό της βεβαιότητας κατά την έξοδο. Για να γίνει αυτό, ένας ειδικός καλείται να δημιουργήσει μια συνάρτηση [12] που να συσχετίζει την είσοδο με την έξοδο, όπως η συνάρτηση του Σχήματος 5.26(a). Όπως προκύπτει, η συνάρτηση δηλώνει ότι η βεβαιότητα εξόδου είναι .8, όταν εκείνη της εισόδου είναι απολύτως βέβαιη. Η βεβαιότητα εξόδου είναι 0 όταν η βεβαιότητα εισόδου είναι 0, ενώ ενδιάμεσα η βεβαιότητα εξόδου βρίσκεται σε μία ευθεία γραμμή μεταξύ των σημείων (0, 0) και (1.0, .8).

Στην πραγματικότητα, η χρησιμοποίηση αυτής της συγκεκριμένης συνάρτησης είναι εντελώς ισοδύναμη με την χρησιμοποίηση της μεθόδου του συντελεστή σμίκρυνσης με σμίκρυνση ίση με .8. Εν τούτοις, η χρησιμοποίηση της συνάρτησης του Σχήματος 5.26(b) δεν είναι ισοδύναμη με την χρησιμοποίηση ενός συντελεστή σμίκρυνσης, επειδή η γραμμή δε διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Πάντως, η πιθανότητα εξόδου τείνει στο .2 όταν η πιθανότητα εισόδου τείνει στο 0. Αυτό σημαίνει ότι τα (if) τμήματα δε χρειάζεται να είναι αληθή για να είναι αληθή τα (then) τμήματα.

Αντίθετα με τα παραδείγματα [12] των Σχημάτων 5.26(a) και 5.26(b), οι περισσότερες συναρτήσεις παριστάνονται με δυο ευθύγραμμα τμήματα παρά με ένα. Η αιτία είναι ότι η σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου δεν θα πρέπει να δηλώνει μόνο εκτιμήσεις του τελικού σημείου, αλλά και εκτιμήσεις πριν την ανάλυση. Η εκτίμηση πριν την ανάλυση, η οποία ονομάζεται *a priori value*, είναι μια πρόταση σχετική με την υπάρχουσα βεβαιότητα χωρίς να έχουμε καμία ειδική γνώση για την υπό εξέταση περίπτωση.

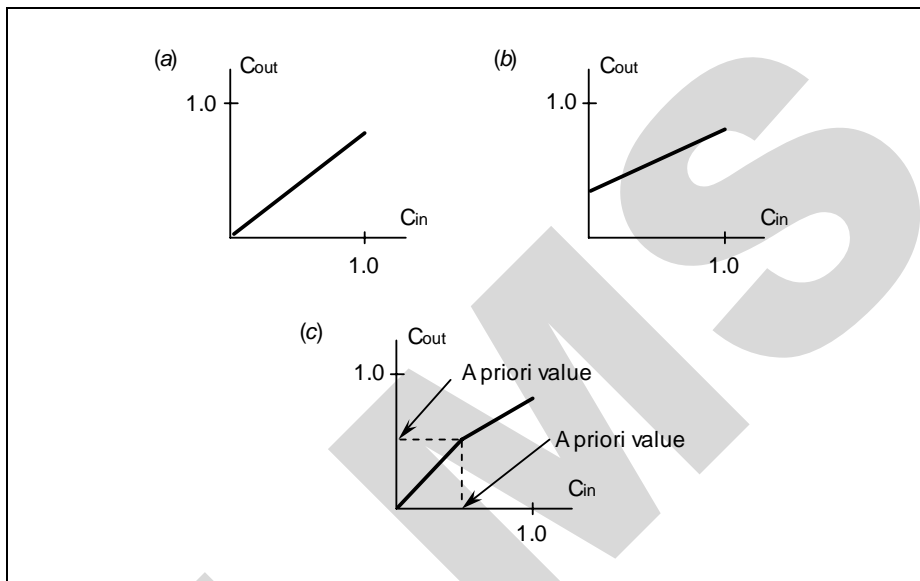
Η χρήση των εκ των *a priori values* [12] φαίνεται στο Σχήμα 5.26(c) στο οποίο η γραμμή εισόδου-εξόδου αλλάζει διεύθυνση για την εκ των προτέρων τιμή της βεβαιότητας εισόδου ίση με .5, και την εκ των προτέρων τιμή της βεβαιότητας εξόδου, επίσης .5. Η χρησιμοποίηση μιας συνάρτησης που παριστάνεται από δυο ευθύγραμμα τμήματα για τον συσχετισμό των βεβαιοτήτων

εισόδου και εξόδου είναι μια αναγκαιότητα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την κλασσική θεωρία των πιθανοτήτων, όλα τα σημεία που προήλθαν από άνθρωπο θα πρέπει να βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή. Προφανώς η ανθρώπινη συμπεριφορά δεν είναι πάντα εύκολο να μοντελοποιηθεί με μαθηματικά.

Τέλος, για τον υπολογισμό πολλαπλά αποδεκτών βεβαιοτήτων χρησιμοποιούνται λόγοι βεβαιότητας. Η βεβαιότητα c και ο λόγος βεβαιότητας r , σχετίζονται ως εξής:

$$r = \frac{c}{1 - c} \qquad c = \frac{r}{r + 1}$$

Σημειώστε ότι μια βεβαιότητα .5 αντιστοιχεί σε ουδέτερο λόγο βεβαιότητας 1.



C_{in} = Βεβαιότητα εισόδου

A priori value = εκ των προτέρων τιμή

C_{out} = Βεβαιότητα εξόδου

Σχήμα 5.26 Χρήση Πιθανοθεωρητικών Δεικτών Βεβαιότητας

Αφού οι βεβαιότητες μετατραπούν σε λόγους βεβαιότητας, ο λόγος βεβαιότητας ενός πολλαπλά αποδεκτού συμπεράσματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$r_0 \times \frac{r_1}{r_0} \times \dots \times \frac{r_n}{r_0}$$

όπου r_0 ο λόγος βεβαιότητας που αντιστοιχεί στην εκ των προτέρων τιμή (*a priori value*) της βεβαιότητας του (*if*) τμήματος, και r_i είναι οι λόγοι βεβαιότη-

τας που αντιστοιχούν στις βεβαιότητες που προκύπτουν από τις συναρτήσεις εισόδου-εξόδου των εμπλεκόμενων κανόνων. Σημειώστε ότι η σχέση δίδει ελάχιστη τιμή στην ειδική περίπτωση όπου η εκ των προτέρων τιμή βεβαιότητας του συμπεράσματος είναι .5, που αντιστοιχεί σε εκ των προτέρων λόγο βεβαιότητας ίσο με 1. Αυτή η σχέση αποτελεί μια προσαρμογή μιας σχέσης πιθανότητας, όπως και η σχέση για τον συνδυασμό των βεβαιοτήτων των (*if*) τμημάτων στον υπολογισμό της βεβαιότητας εισόδου.

Μετατρέποντας βεβαιότητες σε λόγους βεβαιοτήτων με στόχο τον υπολογισμό της βεβαιότητας των πολλαπλά αποδεκτών συμπερασμάτων παρουσιάζεται μια χρήσιμη ιδέα: αν ένα πρόβλημα είναι δύσκολο να επιλυθεί όταν παρουσιάζεται με κάποια συγκεκριμένη μορφή, προσπαθήστε να το μετατρέψετε σε μία τέτοια μορφή ώστε η επίλυσή του να γίνει ευκολότερη. Η χρησιμοποίηση των λόγων βεβαιότητας είναι αντίστοιχη με την χρησιμοποίηση των λογάριθμων ή την χρησιμοποίηση του μετασχηματισμού Fourier.

Αν και τα έμπειρα συστήματα μπορούν να απαντήσουν σε απλές ερωτήσεις σχετικά με το πώς καταλήγουν στα συμπεράσματά τους και για τους λόγους που θέτουν ερωτήσεις, στερούνται ακόμη πολλών χαρακτηριστικών της ανθρώπινης εμπειρίας. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά που τα διαφοροποιούν, είναι:

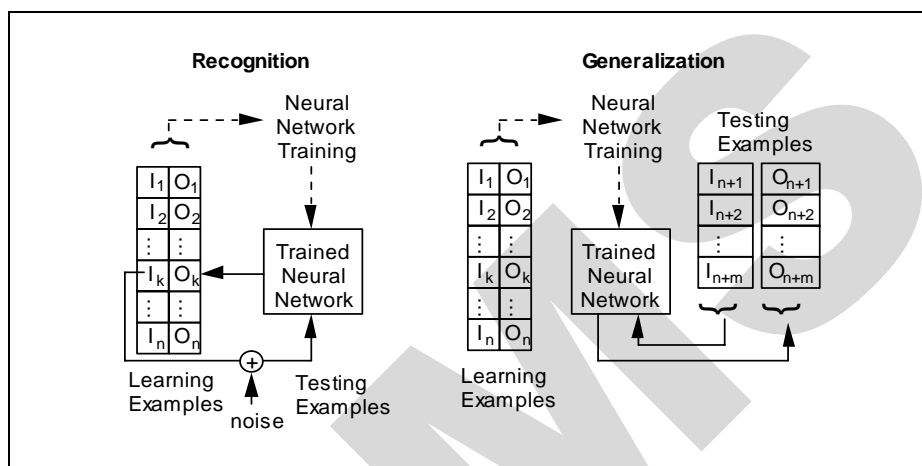
- Τα βασικά Έμπειρα συστήματα δε μαθαίνουν.
- Δεν εξετάζουν τα προβλήματα από διαφορετικές οπτικές γωνίες.
- Δεν ξέρουν πώς και πότε να υπερβούν τους ίδιους τους κανόνες τους.
- Δεν έχουν πρόσβαση στην λογική πίσω από τους κανόνες τους.

Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks)

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν μελετηθεί με σκοπό να συγκεντρώσουν σε ένα "μαύρο κουτί" την γενική σχέση μεταξύ μεταβλητών που είναι δύσκολο ή αδύνατο να συσχετισθούν αναλυτικά. Ένα νευρωνικό δίκτυο "μαθαίνει" την σχέση μεταξύ των μεταβλητών ενδιαφέροντος με απλό τρόπο, μέσω έκθεσης σε παραδείγματα αυτής της σχέσης [13,14,15]. Τυπικά, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν προσομοιωθεί με την χρήση λογισμικού, όμως η χρήση ηλεκτρονικών στην υλοποίησή τους έχει αρχίσει να γίνεται όλο και πιο συχνή.

Υπάρχουν δυο τύποι εφαρμογών των νευρωνικών δικτύων (Σχ. 5.27): *αναγνώριση (recognition)* και *γενίκευση (generalisation)* [16]. Η διαδικασία για την χρησιμοποίηση ενός νευρωνικού δικτύου σε κάθε περίπτωση αποτελείται από δυο φάσεις: την *φάση εκπαίδευσης (training phase)* και την *φάση χρησιμοποίησης (use phase)*. Και για τους δυο τύπους εφαρμογών, στην φάση εκπαίδευσης (*training phase*) ένα νευρωνικό δίκτυο "εκπαιδεύεται" μέσω της έκθεσής του σε μια λίστα ζευγών εισόδου-εξόδου $\{I_1-O_1, I_2-O_2, \dots, I_n-O_n\}$. Στην φάση χρησιμοποίησης (*use phase*) των εφαρμογών τύπου αναγνώρισης

(*recognition*), το εκπαιδευμένο δίκτυο δέχεται μια είσοδο I_k , $1 \leq k \leq n$, η οποία έχει διαταραχτεί λόγω θορύβου, και αναμένεται να δώσει την αντίστοιχη έξοδο O_k παρά την διαταραχή. Η αναγνώριση του γραφικού χαρακτήρα είναι ένα παράδειγμα των εφαρμογών αναγνώρισης των νευρωνικών δικτύων. Στην φάση χρησιμοποίησης (*use phase*) των εφαρμογών τύπου γενίκευσης (*generalisation*), το εκπαιδευμένο δίκτυο δέχεται μια εντελώς νέα είσοδο I_{n+1} διαφορετική από όλες τις εισόδους που είχε δεχθεί κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης I_1, I_2, \dots, I_n , και αναμένεται να προβλέψει την κατάλληλη έξοδο O_{n+1} βάσει του εσωτερικού μοντέλου των σχέσεων εισόδου-εξόδου, το οποίο έχει αναπτυχθεί μέσω της έκθεσης του στα ζεύγη εκπαίδευσης $\{I_1-O_1, I_2-O_2, \dots, I_n-O_n\}$. Η πρόγνωση των τιμών των ομολόγων μιας εταιρείας από τις τιμές των οικονομικών της δεικτών είναι ένα παράδειγμα των εφαρμογών γενίκευσης των νευρωνικών δικτύων [16].



Recognition = Αναγνώριση

Trained Neural Network = Εκπαιδευμένο Νευρωνικό Δίκτυο

Testing Examples = Παραδείγματα δοκιμής

Generalisation = Γενίκευση

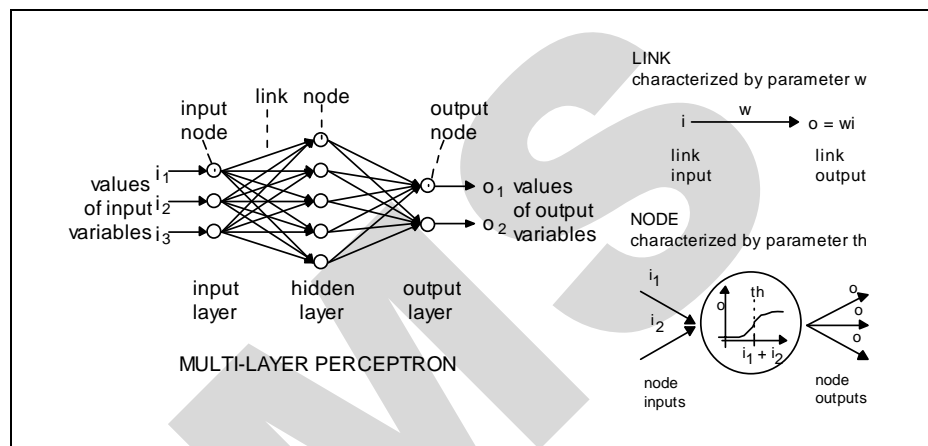
Learning Examples = Παραδείγματα Εκμάθησης

Noise = Θόρυβος

Σχήμα 5.27 Οι δύο τύποι εφαρμογών των Νευρωνικών Δικτύων: Αναγνώριση (*recognition*) και Γενίκευση (*generalisation*)

Κατασκευαστικά, ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από πολλά μη γραμμικά υπολογιστικά στοιχεία, που καλούνται κόμβοι. Ένας κόμβος παίρνει μια ή περισσότερες τιμές στην είσοδο, τις συνδυάζει δημιουργώντας μια νέα τιμή, την οποία και μετατρέπει σε τιμή εξόδου. Οι κόμβοι είναι πυκνά αλληλοσυνδεδεμένοι μέσω απευθείας συνδέσμων. Ένας σύνδεσμος παίρνει την τιμή εξόδου ενός κόμβου, την μετατρέπει, και υποβάλει το αποτέλεσμα ως τιμή εισόδου σε ένα άλλο κόμβο. Μέσω των συνδέσμων, η έξοδος κάθε κόμβου γίνεται η είσοδος σε πολλούς άλλους κόμβους. Ένα νευρωνικό δίκτυο παίρνει αριθμούς στην είσοδο και τις μετατρέπει σε αριθμούς στην έξοδο.

Η υπάρχουσα έρευνα στην χρήση των νευρωνικών δικτύων ευνοεί ένα τύπο δομής δικτύου που καλείται *multi-layer perceptron* [16,17]. Σε ένα δίκτυο αυτού του τύπου, οι κόμβοι είναι διαταγμένοι σε επίπεδα: ένα επίπεδο εισόδου, ένα επίπεδο εξόδου και μεταξύ τους, ένας αριθμός από τα αποκαλούμενα κρυφά επίπεδα (*hidden layers*). Οι κόμβοι εισόδου λαμβάνουν τις τιμές των μεταβλητών εισόδου, οι οποίες διαδίδονται μέσα στο δίκτυο ταυτόχρονα, από επίπεδο σε επίπεδο. Στο επίπεδο εξόδου, οι κόμβοι δίδουν τιμές στις μεταβλητές εξόδου. Ο αριθμός των επιπέδων και των κόμβων μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα. Η δομή του δικτύου του τύπου *multi-layer perceptron* μπορεί να ορισθεί χρησιμοποιώντας ένα συμβολισμό της μορφής $L_1-L_2-...-L_n$ όπου το L_1 δηλώνει τον αριθμό των κόμβων στο επίπεδο εισόδου, το L_n δηλώνει τον αριθμό των κόμβων στο επίπεδο εξόδου, και τα L_2, \dots, L_{n-1} δηλώνουν τον αριθμό των κόμβων σε καθένα από τα ενδιάμεσα επίπεδα (Σχ. 5.28).



Input node = Κόμβος εισόδου
 Value of input variables = Τιμές των μεταβλητών εισόδου
 Input layer = Επίπεδο εισόδου
 Output node = Κόμβος εξόδου
 Link input = Σύνδεσμος εισόδου
 Characterized by parameter w = χαρακτηρίζεται από την παράμετρο w
 Node inputs = Είσοδοι στον κόμβο
 Node outputs = Έξοδοι από τον κόμβο

Link = Σύνδεσμος
 Values of output variables = Τιμές των μεταβλητών Εξόδου
 Hidden layer = Κρυμμένο επίπεδο
 Output layer = Επίπεδο Εξόδου
 Link output = Σύνδεσμος εξόδου
 Characterized by parameter th = χαρακτηρίζεται από την παράμετρο th
 Node = Κόμβος

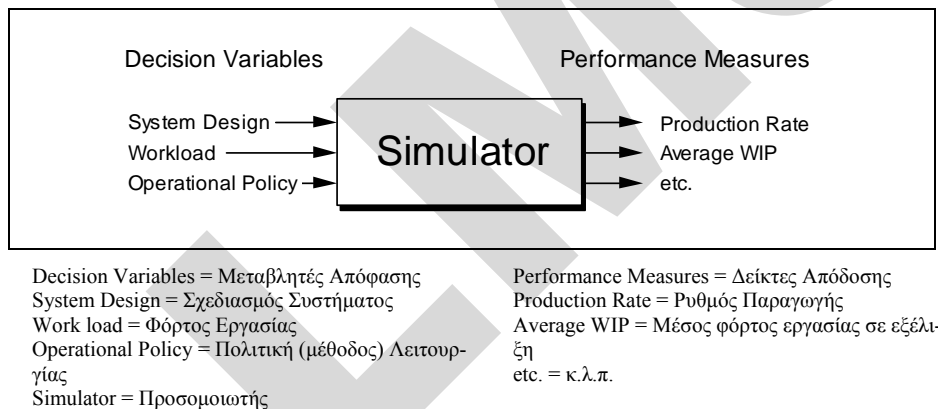
Σχήμα 5.28 3-5-2 Ένα δίκτυο τύπου *multi-layer perceptron* και η σχετική ορολογία

Οι κόμβοι και οι σύνδεσμοι μπορούν να θεωρηθούν ως συναρτήσεις μετατροπής τιμών. Η συμπεριφορά μετατροπής ενός κόμβου ελέγχεται από μια παράμετρο th . Παρόμοια, η συμπεριφορά μετατροπής ενός συνδέσμου ελέγχεται από μια παράμετρο w . Έτσι, ο μετασχηματισμός από τιμές εισόδου σε τιμές εξόδου ρυθμίζεται από τον καθορισμό των παραμέτρων th και w . Η εκπαίδευση είναι απλώς η διαδικασία ρύθμισης αυτών των παραμέτρων μέχρι το δίκτυο

να αντιστοιχίσει όλα τα παραδείγματα τιμών εισόδου στις αντίστοιχες τιμές εξόδου (εντός μιας συγκεκριμένης ανοχής). Οι ρυθμίσεις γίνονται μετά την παρουσίαση n παραδειγμάτων στο δίκτυο, συνήθως $n = 1$. Αφού ο ολικός αριθμός των παραδειγμάτων εξαντληθεί, τα παραδείγματα χρησιμοποιούνται και πάλι, αρχίζοντας από το πρώτο. Επομένως, η εκπαίδευση είναι μια επαναληπτική διαδικασία παρουσίασης-προσαρμογής. Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος εκπαίδευσης είναι ο αλγόριθμος διάδοσης προς τα πίσω (*backpropagation*) και ο οποίος βασίζεται στην μέθοδο αναζήτησης *hill climbing* [18].

5.2.3 Προσομοίωση με την χρήση H/Y (Computer Simulation)

Η προσομοίωση με την χρήση H/Y είναι ένα γενική ονομασία για μια οικογένεια συστημάτων λογισμικού, η οποία προσομοιώνει την λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής. Γενικά, τα δεδομένα εισόδου σε ένα λογισμικό προσομοίωσης είναι μεταβλητές λήψης αποφάσεων που καθορίζουν τον σχεδιασμό (π.χ. ρυθμοί λειτουργίας και εμφάνιση βλαβών μιας μηχανής, η διάταξη των μηχανών), το πρόγραμμα εργασίας (π.χ. οι αφίξεις των πρώτων υλών, οι διάφορες φάσεις επεξεργασίας ενός κομματιού), και την πολιτική λειτουργίας (π.χ. "το κομμάτι που φθάνει πρώτο εξυπηρετείται και πρώτο") ενός συστήματος παραγωγής. Ο προσομοιωτής δημιουργεί με αυτά τα δεδομένα ένα μοντέλο του συστήματος παραγωγής, το οποίο περιλαμβάνει τους κανόνες με τους οποίους τα στοιχεία του συστήματος αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ο χρήστης



Σχήμα 5.29 Προσομοίωση με την Χρήση H/Y

του προσομοιωτή ορίζει την αρχική κατάσταση του συστήματος παραγωγής (π.χ. τον αριθμό και τους τύπους των κομματιών που υπάρχουν αρχικά σε αποθέματα σε διάφορα σημεία του συστήματος). Ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση, ο προσομοιωτής ακολουθεί την λειτουργία του μοντέλου, καταγράφοντας *γεγονότα* (*events*) όπως μετακινήσεις κομματιών, βλάβες μηχανών, προετοιμασία μηχανών, κλπ. σε σχέση με τον χρόνο. Στο τέλος της προσομοί-

ωσης, ο προσομοιωτής παρέχει ένα σύνολο από στατιστικούς δείκτες απόδοσης (π.χ. ο μέσος αριθμός κομματιών που βρίσκονται στο σύστημα κάθε χρονική στιγμή) με τα οποία μπορεί να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος παραγωγής (Σχ. 5.29).

Η προσομοίωση είναι ένα εργαλείο ανάλυσης επειδή καθορίζει μόνο την απόδοση ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής. Όταν χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής, η προσομοίωση πρέπει να επικοινωνεί με ένα εξωτερικό στοιχείο, το οποίο να είναι ικανό να προτείνει ή να συνθέτει νέους σχεδιασμούς. Συχνά, το εξωτερικό στοιχείο είναι ο άνθρωπος που δημιουργεί έναν αριθμό από πιθανούς εφικτούς σχεδιασμούς, τους οποίους αξιολογεί με την χρήση του προσομοιωτή. Με βάση τα αποτελέσματα του προσομοιωτή, είτε επιλέγεται ο καλύτερος εναλλακτικός σχεδιασμός, ή προτείνονται νέοι και πιθανώς βελτιωμένοι σχεδιασμοί. Η προσομοίωση, επομένως, χρησιμοποιείται συχνά στον σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (*trial and error*), όπως περιγράφεται στην Εδάφιο 5.1.3.

Ο μηχανισμός της προσομοίωσης (Mechanic of Simulation)

Τα περισσότερα προγράμματα προσομοίωσης μοντελοποιούν ένα σύστημα παραγωγής, καθώς αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, μέσω μιας αναπαράστασης στην οποία οι μεταβλητές, που παρακολουθούν την κατάσταση του συστήματος (μεταβλητές κατάστασης), αλλάζουν στιγμιαία σε διακριτά σημεία στον χρόνο [19]. Αυτά τα σημεία του χρόνου είναι εκείνα στα οποία λαμβάνουν χώρα τα γεγονότα, όπου ως γεγονός ορίζεται μια στιγμιαία συμβάν που μπορεί να αλλάξει την κατάσταση του συστήματος. Ένα μοντέλο αυτού του τύπου καλείται *μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων (discrete event simulation model)*.

Εξ αιτίας της δυναμικής φύσης των μοντέλων προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, η τρέχουσα τιμή του χρόνου προσομοίωσης πρέπει να καταγράφεται, καθώς η προσομοίωση εξελίσσεται και επομένως χρειάζεται ένας μηχανισμός για να αυξάνει τον χρόνο προσομοίωσης από την μια τιμή στην επόμενη. Η μεταβλητή σε ένα μοντέλο προσομοίωσης, που δίδει την τρέχουσα τιμή του χρόνου προσομοίωσης, λέγεται *χρονοδείκτης –ρολόι προσομοίωσης (simulation clock)*. Όσον αφορά τον μηχανισμό εξέλιξης του χρόνου προσομοίωσης, η ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση καλείται προσέγγιση που *καθοδηγείται από τα γεγονότα (event-driven)*.

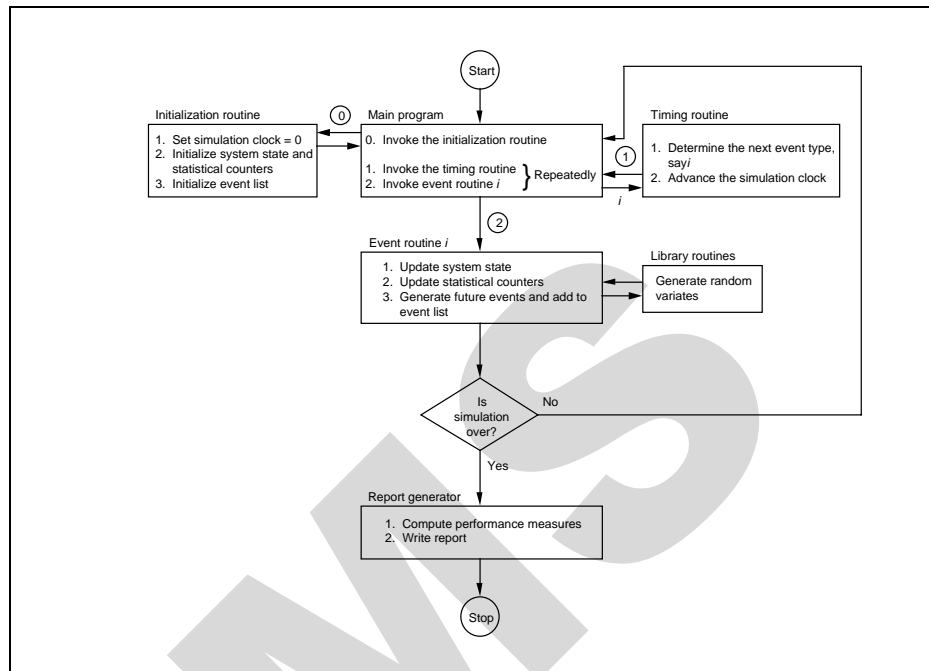
Με αυτήν την προσέγγιση, ο χρονοδείκτης προσομοίωσης παίρνει την τιμή 0 στην αρχή, βάση της οποίας καθορίζονται οι χρόνοι εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Το ρολόι της προσομοίωσης μεταβαίνει στην χρονική στιγμή εμφάνισης του πρώτου από τα μελλοντικά γεγονότα. Σε αυτό το χρονικό σημείο η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται, ώστε να ληφθεί υπ' όψη η εμφάνιση του νέου γεγονότος, ενώ παράλληλα, ενημερώνεται και η υπάρχουσα γνώση σχετικά με τους χρόνους εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Το ρολόι της προσομοίωσης παίρνει την τιμή του χρόνου στον οποίο το

περισσότερο επικείμενο (νέο) γεγονός εμφανίστηκε, η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται και προσδιορίζονται οι χρόνοι των μελλοντικών γεγονότων κλπ. Αυτή η διαδικασία μετάβασης του χρονοδείκτη από τον ένα χρόνο εμφάνισης γεγονότος στον επόμενο, συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού της διαδικασίας. Αφού όλες οι αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος συμβαίνουν στις χρονικές στιγμές, που ένα γεγονός εμφανίζεται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης, οι περίοδοι αδράνειας αγνοούνται με την μεταπήδηση του χρονοδείκτη προσομοίωσης από τον χρόνο εμφάνισης ενός γεγονότος στον επόμενο χρόνο εμφάνισης. Τα χρονικά διαστήματα εμφάνισης των γεγονότων είναι κατά κανόνα διαφορετικού μεγέθους μεταξύ τους.

Όλα τα μοντέλα προσομοίωσης διακριτών γεγονότων έχουν τα ακόλουθα στοιχεία [19]:

- *Κατάσταση συστήματος (system state)*. Η συλλογή των απαραίτητων μεταβλητών κατάστασης για την περιγραφή του συστήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- *Χρονοδείκτης-ρολόι συστήματος (system clock)*. Μια μεταβλητή που δίδει την τρέχουσα τιμή του χρόνου προσομοίωσης.
- *Λίστα γεγονότων (event list)*. Μια λίστα που περιέχει την επόμενη χρονική στιγμή όπου ο κάθε τύπος γεγονότος θα εμφανισθεί.
- *Στατιστικοί μετρητές (statistical counters)*. Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή στατιστικών πληροφοριών σχετικά με την απόδοση του συστήματος.
- *Ρουτίνα αρχικοποίησης (Initialisation routine)*. Ένα υποπρόγραμμα το οποίο αρχικοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης στην χρονική στιγμή μηδέν.
- *Ρουτίνα χρόνου (timing routine)*. Ένα υποπρόγραμμα που υπολογίζει το επόμενο γεγονός από την λίστα γεγονότων, και δίδει στον χρονοδείκτη προσομοίωσης την χρονική τιμή, που θα συμβεί το επόμενο γεγονός.
- *Ρουτίνα γεγονότων (event routine)*. Ένα υποπρόγραμμα που ενημερώνει την κατάσταση του συστήματος όταν ένας συγκεκριμένος τύπος γεγονότος εμφανισθεί (υπάρχει μια ρουτίνα για κάθε τύπο γεγονότος).
- *Βιβλιοθήκη Ρουτινών (Library routines)*. Υποπρογράμματα που χρησιμοποιούνται για να παράγουν δείγματα από κατανομές πιθανοτήτων οι οποίες περιλαμβάνονται στο μοντέλο προσομοίωσης.
- *Γεννήτρια αναφορών (report generator)*. Ένα υποπρόγραμμα που υπολογίζει εκτιμήσεις (με βάση τους στατιστικούς μετρητές) των επιθυμητών δεικτών επίδοσης, και εκδίδει μία αναφορά, όταν η προσομοίωση τελειώσει.

- *Κύριο πρόγραμμα (main program)*. Ένα υποπρόγραμμα που καλεί την ρουτίνα χρόνου, να υπολογίσει το επόμενο γεγονός και στην συνέχεια, δίδει τον έλεγχο στην αντίστοιχη ρουτίνα γεγονότος, ώστε να ενημερωθεί η κατάσταση του συστήματος. Το κύριο πρόγραμμα μπορεί επίσης να ελέγχει εάν η προσομοίωση έχει ολοκληρωθεί, καθώς και να ενεργοποιεί την γεννήτρια αναφορών, όταν η προσομοίωση τελειώσει.



Start = Αρχή
 Initialisation routine = Ρουτίνα αρχικοποίησης
 Set simulation clock "←" 0 = θέτει τον χρονοδείκτη «←» 0
 Initialize event list = Ενεργοποίηση της λίστας γεγονότων
 Invoke the timing routine = Κλήση της ρουτίνας χρόνου
 Repeatedly = Επαναληπτικά
 Advance the simulation clock = Προώθηση του χρονοδείκτη προσομοίωσης
 Update system state = Ενημέρωση της κατάστασης του συστήματος
 Generate future events and add to event list = Δημιουργία των επόμενων γεγονότων και προσθήκη τους στην λίστα γεγονότων
 Is simulation over? = Ολοκληρώθηκε η προσομοίωση
 Compute performance measures = υπολογισμός των δεικτών απόδοσης

Stop = τέλος
 Main program = Κύριο πρόγραμμα
 Timing routine = Ρουτίνα χρόνου
 Initialise system state and statistical counters = Ενεργοποίηση της κατάστασης του συστήματος και των στατιστικών μετρητών
 Invoke the initialization routine = Κλήση της ρουτίνας αρχικοποίησης
 Invoke event routine i = Κλήση της ρουτίνας i
 Determine the next event type say i = Προσδιορισμός του τύπου του επόμενου γεγονότος, i
 Event routine i = Ρουτίνα γεγονότος i
 Update statistical counters = Ενημέρωση των στατιστικών μετρητών
 Generate random variates = Δημιουργία τυχαίων μεταβλητών
 Report generator = Γεννήτρια αναφορών
 Write report = παραγωγή αναφοράς

Σχήμα 5.30 Ροή Ελέγχου σε ένα Πρόγραμμα Προσομοίωσης Διακριτών Γεγονότων

Οι λογικές σχέσεις (ροή ελέγχου) ανάμεσα στα παραπάνω στοιχεία έχουν ως εξής. Η προσομοίωση αρχίζει την χρονική στιγμή 0 με το κύριο πρόγραμμα να καλεί την ρουτίνα αρχικοποίησης, όπου ο χρονοδείκτης προσομοίωσης μηδενίζεται, η κατάσταση του συστήματος και οι στατιστικοί μετρητές αρχικοποιούνται όπως επίσης και η λίστα γεγονότων. Αφού ο έλεγχος επιστρέφει στο κύριο πρόγραμμα, αυτό ενεργοποιεί την ρουτίνα χρόνου να υπολογίσει ποιος τύπος γεγονότος είναι ο περισσότερο επικείμενος. Αν το επόμενο γεγονός είναι τύπου i ο χρονοδείκτης προσομοίωσης μεταβαίνει στην χρονική στιγμή που το γεγονός τύπου i θα συμβεί, και ο έλεγχος επιστρέφει στο κύριο πρόγραμμα. Τότε το κύριο πρόγραμμα ενεργοποιεί την ρουτίνα γεγονότος i , όπου τυπικά συμβαίνουν 3 τύποι δραστηριοτήτων: (1) η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται για να λάβει υπόψη την εμφάνιση ενός γεγονότος τύπου i , (2) συγκεντρώνονται πληροφορίες για την απόδοση του συστήματος, ενημερώνοντας τους στατιστικούς μετρητές, και (3) υπολογίζονται οι χρόνοι εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων και αυτή η πληροφορία προστίθεται στην λίστα γεγονότων. Συχνά είναι απαραίτητο να παράγονται τυχαία δείγματα από τις κατανομές πιθανοτήτων για να υπολογισθούν οι χρόνοι των μελλοντικών γεγονότων. Ένα τέτοιο δείγμα λέγεται *τυχαία μεταβλητή (random variate)*. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, είτε στην i ρουτίνα είτε στο κύριο πρόγραμμα, γίνεται ένας έλεγχος για να διαπιστωθεί (σχετικά με κάποια συνθήκη τερματισμού), αν η προσομοίωση πρέπει να σταματήσει. Αν πρέπει να σταματήσει, η γεννήτρια αναφοράς ενεργοποιείται από το κύριο πρόγραμμα, για να υπολογίσει τις εκτιμήσεις (από τους στατιστικούς μετρητές) των επιθυμητών δεικτών απόδοσης, και να παράξει μια αναφορά. Αν η προσομοίωση δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα, ο έλεγχος δίνεται στο κύριο πρόγραμμα, και ο κύκλος κύριο πρόγραμμα - ρουτίνα χρόνου - κύριο πρόγραμμα- ρουτίνα γεγονότων - έλεγχος τερματισμού, επαναλαμβάνεται [19] μέχρι η συνθήκη τερματισμού να ικανοποιηθεί (Σχ.5.30).

Χαρακτηριστικά του λογισμικού προσομοίωσης (Features of Simulation Software)

Η *δυνατότητα μοντελοποίησης* αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό του λογισμικού προσομοίωσης, διότι τα συστήματα παραγωγής είναι πολύπλοκα και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους. Εάν κάποιος προσομοιωτής δεν έχει την ικανότητα να μοντελοποιήσει μια συγκεκριμένη κατάσταση ενός παραγωγικού συστήματος (π.χ. μια συγκεκριμένη πολιτική λειτουργίας), αυτή η κατάσταση πρέπει να προσεγγισθεί με κάποια άλλη δομή την οποία υποστηρίζει ο προσομοιωτής. Αυτό οδηγεί σε ένα τελικό μοντέλο του οποίου η ακρίβεια αμφισβητείται. Για τον λόγο αυτό είναι επιθυμητό ένας προσομοιωτής να έχει στοιχεία που να περιέχουν προσαρμοζόμενες μεταβλητές (π.χ. αριθμός κομματιού, ημερομηνία παράδοσης κλπ.) οι οποίες να είναι προσβάσιμες και να αλλάζουν όταν αυτό απαιτείται.

Πέρα από την δυνατότητα μοντελοποίησης, η *ευκολία μοντελοποίησης (modeling ease)* είναι πολύ σημαντική. Τα μοντέλα προσομοίωσης είναι, συ-

νήθως, δομημένα με την βοήθεια εξειδικευμένων γλωσσών προσομοίωσης, οι οποίες μοιάζουν με γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου όπως η FORTRAN. Συνεπώς, για τα μοντέλα αυτά είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ο κατάλληλος κώδικας και να ελεγχθούν για σφάλματα (debug). Επίσης μπορεί να είναι δύσκολο να κατανοηθούν. Εναλλακτικά, για την δημιουργία των μοντέλων προσομοίωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί *λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιεί εικονίδια (icon-based)*. Χρησιμοποιώντας αυτού του τύπου τα λογισμικά εργαλεία, το μοντέλο δομείται καθορίζοντας τις ιδιότητες των εικονιδίων, τα οποία αναπαριστούν κομμάτια, μηχανές ή άλλου είδους εξοπλισμό. Η γραφική αναπαράσταση απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό την κωδικοποίηση και τον έλεγχο για λάθη του μοντέλου. Πολλά τέτοια συστήματα έχουν την δυνατότητα της γραφικής αναπαράστασης της κίνησης. Κάθε φορά που η κατάσταση της προσομοίωσης αλλάζει, μια αντίστοιχη αλλαγή εμφανίζεται στην γραφική αναπαράσταση. Η γραφική προσομοίωση της κίνησης έχει γίνει ένα ευρέως αποδεκτό κομμάτι της προσομοίωσης των συστημάτων παραγωγής εξ αιτίας της καλής της επικοινωνίας του χρήστη με την δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου προσομοίωσης. Αυτό με την σειρά του αυξάνει σημαντικά την αξιοπιστία του συστήματος. Εκτός του γεγονότος, ότι η γραφική αναπαράσταση βοηθά την επικοινωνία του χρήστη με το μοντέλο, μπορεί επίσης να είναι χρήσιμη στον έλεγχο των λαθών, την επιβεβαίωση και την βελτίωση του μοντέλου. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του προσωπικού στην λειτουργία ενός συστήματος. Η γραφική αναπαράσταση της προσομοίωσης τριών μοντέλων συστημάτων παραγωγής φαίνεται στο Σχήμα 5.31.

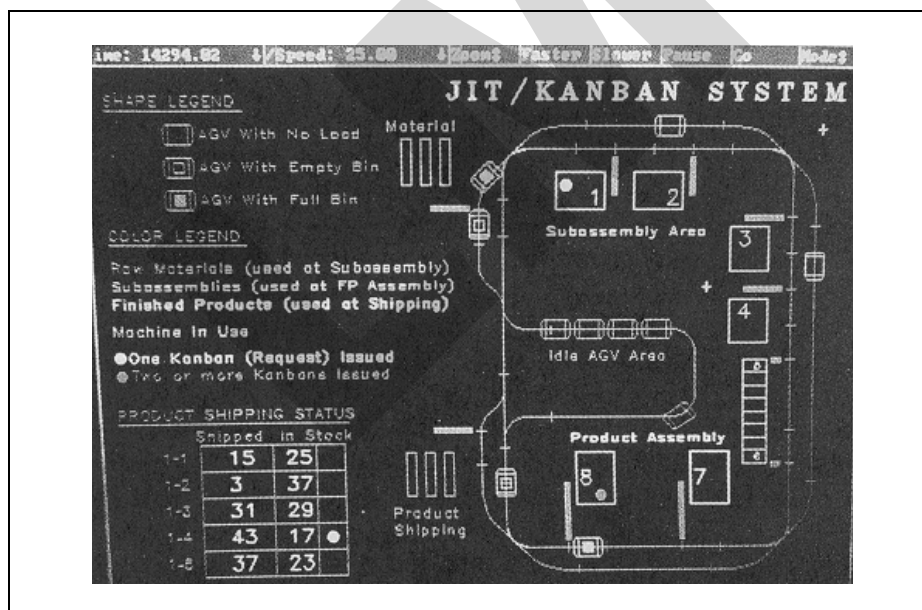
Οι παραγωγικές διαδικασίες μπορεί να παρουσιάζουν ντετερμινιστική συμπεριφορά αλλά ταυτόχρονα και στατιστικές διακυμάνσεις. Στις πηγές τυχαιότητας περιλαμβάνονται οι χρόνοι επεξεργασίας, λειτουργίας και επισκευής των μηχανών κλπ. και αυτό απαιτεί εκτίμηση της κατανομής πιθανότητας των μεταβλητών και όχι μόνο εκτίμηση της μέσης τιμής τους. Για τον λόγο αυτό οι *στατιστικές δυνατότητες (statistical capabilities)* αντιπροσωπεύουν μία σημαντική περιοχή της λειτουργικότητας του λογισμικού προσομοίωσης. Οι δυνατότητες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- *Κατανομές (Distributions)*. Το λογισμικό προσομοίωσης πρέπει να περιέχει μια μεγάλη ποικιλία των τυπικών κατανομών (π.χ., εκθετικές, γάμμα και τριγωνικές) για την διευκόλυνση της μοντελοποίησης των κατανομών που προκύπτουν από δεδομένα που παρατηρήθηκαν στο σύστημα παραγωγής.
- *Γεννήτριες τυχαίων-αριθμών (Random-number generators)*. Οι προσομοιωτές πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με γεννήτριες τυχαίων αριθμών.
- *Ανεξάρτητες επαναλήψεις (Independent replications)*. Όταν στα μοντέλα συμπεριλαμβάνονται τυχαίοι παράγοντες, τα αποτελέσματα είναι και αυτά κατά κάποιο τρόπο τυχαία. Προκειμένου να βρεθεί το φάσμα μέσα στο οποίο κυμαίνονται τα πιθανά αποτελέσματα, είναι α-

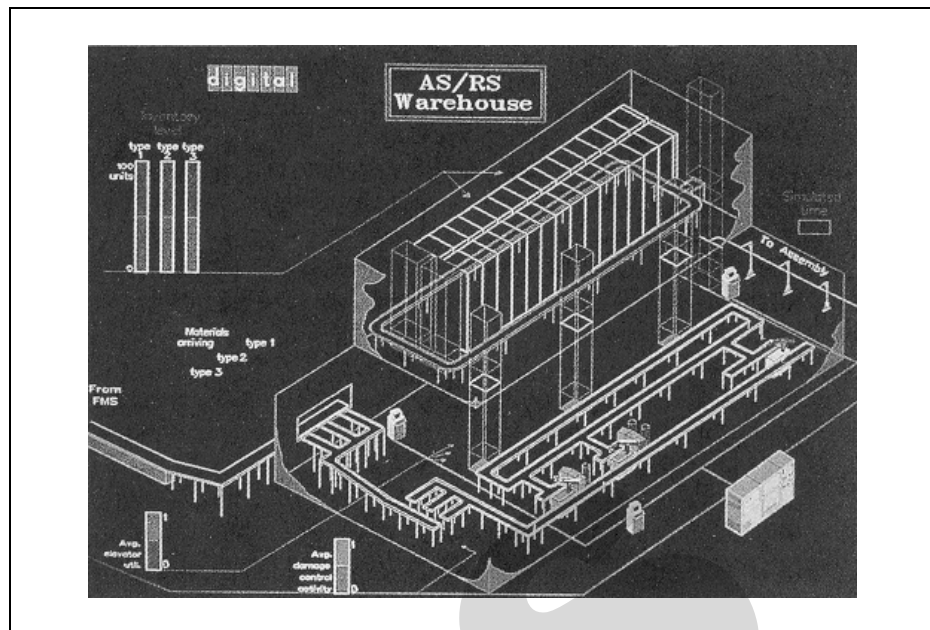
παραίτητο να γίνουν ορισμένες εκτελέσεις της ίδιας προσομοίωσης που να αρχίζουν από το ίδιο σημείο αλλά με διαφορετικές ομάδες τυχαίων αριθμών. Για να παρέχουν οι προσομοιωτές αυτή την δυνατότητα, θα πρέπει να περιέχουν εντολές οι οποίες να επαναλαμβάνουν αυτόματα την προσομοίωση και να καταγράφουν τα στατιστικά αποτελέσματα ξεχωριστά για κάθε εκτέλεση.

- *Περίοδος προθέρμανσης και διάστημα εμπιστοσύνης (Warm-up period and confidence interval).* Για τον καθορισμό της στατιστικής ακρίβειας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, ο χρήστης πρέπει να έχει την δυνατότητα να καθορίσει μια περίοδο προθέρμανσης στο τέλος της οποίας τα στατιστικά αποτελέσματα στην έξοδο να επαναφέρονται στο μηδέν και να δημιουργούνται διαστήματα εμπιστοσύνης για τους επιθυμητούς δείκτες απόδοσης όπως για παράδειγμα η μέση ημερήσια παραγωγικότητα.

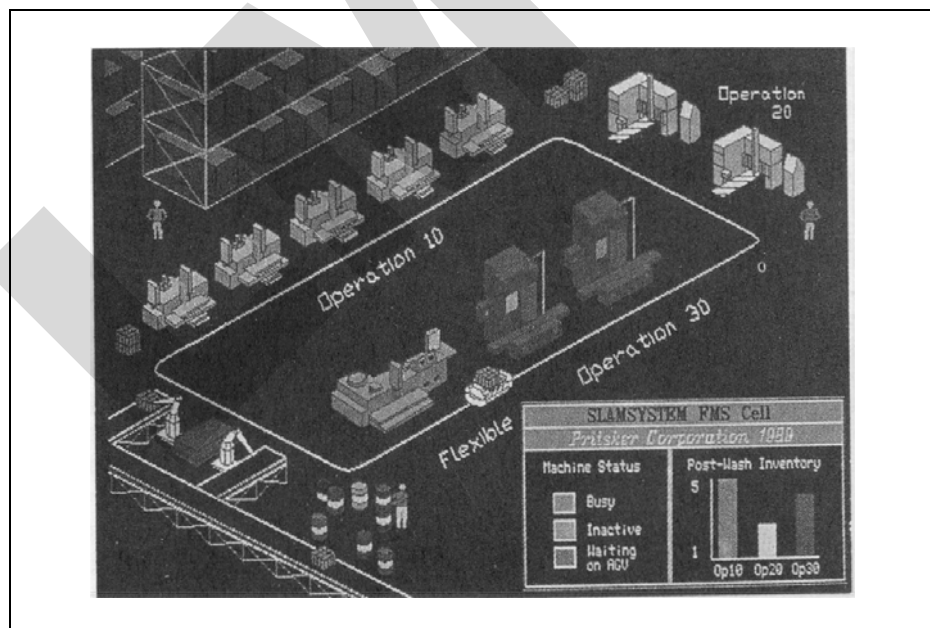
Τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν έως τώρα σχετίζονται με την δυνατότητα του προσομοιωτή να αναπαραστήσει πιστά την συμπεριφορά ενός συστήματος παραγωγής. Όμως ακόμη και αν ο προσομοιωτής είναι επιτυχημένος από αυτή την άποψη, δεν μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο εάν δεν μπορεί να τεκμηριώσει αποτελεσματικά την απόδοση του μοντελοποιημένου συστήματος. Για τον λόγο αυτό πρέπει ούτως ή άλλως να είναι διαθέσιμος ένας αριθμός από *τυπικές αναφορές* για τα στατιστικά αποτελέσματα που καταγράφονται συχνότερα όπως η εκμετάλλευση των πόρων, το μήκος των αναμονών



Σχήμα 5.31 Παράδειγμα γραφικής αναπαράστασης της προσομοίωσης [19]



Σχήμα 5.31 συνέχεια [19]



Σχήμα 5.31 συνέχεια [19]

και η παραγωγικότητα. Εξειδικευμένες αναφορές οι οποίες αφορούν συγκεκριμένη προσομοίωση θα πρέπει να μπορούν να δημιουργούνται χωρίς δυσκολία. Αυτές περιλαμβάνουν αναφορές οι οποίες καταγράφουν τα λιγότερο συνηθισμένα στατιστικά αποτελέσματα και απαιτούν ειδική μορφοποίηση της αναφοράς (όπως οι αναφορές που αφορούν την ενημέρωση της διοίκησης). Τέλος, *υψηλής ποιότητας γραφικές αναπαραστάσεις*, που περιλαμβάνουν για παράδειγμα ιστογράμματα και χρονοδιαγράμματα των σημαντικών μεταβλητών, μπορούν να συνοψίσουν αποτελεσματικά μεγάλες ποσότητες δεδομένων με στόχο την καλύτερη κατανόηση.

Σχεδιασμός Πειραμάτων Προσομοίωσης (Design of Simulation Experiments)

Η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιστοιχίσει ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης σε ένα σύνολο δεικτών απόδοσης. Η διαδικασία σχεδιασμού, όμως, είναι η *αντίστροφη* διαδικασία από αυτή της προσομοίωσης. Αντιστοιχεί τους επιθυμητούς δείκτες απόδοσης στις μεταβλητές απόφασης. Με δοσμένες τις απαιτήσεις για την απόδοση του συστήματος, πρέπει να βρεθεί ο σχεδιασμός του συστήματος (δηλαδή οι τιμές των μεταβλητών απόφασης) που να επιτυγχάνει την απαιτούμενη απόδοση.

Οι βέλτιστες μεταβλητές απόφασης προκύπτουν προοδευτικά μετά από πολλαπλές "εκτελέσεις" της προσομοίωσης. Εάν η αναζήτηση των βέλτιστων μεταβλητών απόφασης δεν έχει οργανωθεί με μεγάλη προσοχή, μπορεί να γίνει επίπονη και εξαιρετικά δύσκολη.

Η χρήση στατιστικά σχεδιασμένων πειραμάτων (*statistically designed experiments-SDE*) μπορεί να ελαχιστοποιήσει την απαιτούμενη προσπάθεια προσομοίωσης. Η μέθοδος SDE μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία δημιουργίας ενός σχεδίου για την συλλογή της απαιτούμενης πληροφορίας με το λιγότερο δυνατό κόστος, δίνοντας την δυνατότητα στον σχεδιαστή του μοντέλου να εξαγάγει έγκυρα συμπεράσματα.

Η μέθοδος SDE προϋποθέτει ότι κάθε μια από τις μεταβλητές απόφασης έχει αρκετές διακριτές καταστάσεις. Εάν μια μεταβλητή είναι συνεχής τότε πρέπει να μετατραπεί σε διακριτή. Έστω ένα πρόβλημα με n μεταβλητές απόφασης, η κάθε μια από τις οποίες έχει m διαφορετικές διακριτές καταστάσεις, ο αριθμός των δυνατών σχεδιασμών του συστήματος παραγωγής είναι n^m . Θεωρητικά φαίνεται απλό να προσομοιωθούν όλοι οι n^m πιθανοί σχεδιασμοί του συστήματος και μετά να επιλεγεί εκείνος ο σχεδιασμός με τους καλύτερους δείκτες απόδοσης στην προσομοίωση. Στην πράξη όμως ο αριθμός n^m είναι, συνήθως, πολύ μεγάλος (π.χ. $20^5 = 3,2$ εκατομμύρια) και δεν είναι υπολογιστικά εφικτό να πραγματοποιηθούν όλες αυτές οι προσομοιώσεις. Σκοπός του SDE είναι να μπορεί να καταλήξει στον καλύτερο από τους n^m σχεδιασμούς, προσομοιώνοντας μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό από τους σχεδιασμούς αυτούς.

Το πρώτο και πιο κρίσιμο βήμα στην προσέγγιση αυτή είναι ο σχηματισμός ενός ορθογωνικού πίνακα (*orthogonal array*). Σε έναν ορθογωνικό πί-

νακα οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τα πειράματα προσομοίωσης, οι στήλες αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές απόφασης, και τα στοιχεία του πίνακα περιέχουν τις καταστάσεις (τιμές) των μεταβλητών απόφασης. Επομένως, οι γραμμές του πίνακα περιγράφουν τις καταστάσεις των μεταβλητών απόφασης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κάθε πείραμα προσομοίωσης. Η ορθογωνικότητα επιβάλλει ότι, εάν οι καταστάσεις κάθε μεταβλητής απόφασης είναι συνεχόμενα αριθμημένες αρχίζοντας από το 1, ο αριθμός κάθε κατάστασης εμφανίζεται ίσες φορές σε κάθε στήλη και κάθε συνδυασμός δύο αριθμών κατάστασης (π.χ. 1-1, 1-2, 2-1) συναντάται ίσες φορές σε οποιοδήποτε ζευγάρι στηλών. (Στην σχετική με SDE βιβλιογραφία, οι μεταβλητές απόφασης καθώς και οι αντίστοιχοι αριθμοί κατάστασης αναφέρονται σαν παράγοντες (*factors*) και επίπεδα (*levels*), αντίστοιχα). Η ιδιότητα της ορθογωνικότητας παρέχει "ισορροπημένα" πειράματα, στα οποία δίδεται η ίδια βαρύτητα στην επίδραση που έχει κάθε μεταβλητή απόφασης στους δείκτες απόδοσης της προσομοίωσης.

Στο δεύτερο βήμα, «εκτελούνται» προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τιμές για τις μεταβλητές απόφασης όπως αυτές καθορίζονται από τις γραμμές του πίνακα. Για κάθε "εκτέλεση" της προσομοίωσης (δηλαδή για κάθε γραμμή του ορθογωνικού πίνακα) υπολογίζεται μια αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μετρά πόσο "καλοί" είναι οι δείκτες απόδοσης της προσομοίωσης.

Στην συνέχεια σχηματίζεται ένας πίνακας με τις μέσες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε παράγοντα σε κάθε επίπεδο. Η βέλτιστη κατάσταση της κάθε μεταβλητής απόφασης προκύπτει από τον πίνακα επιλέγοντας εκείνο το επίπεδο για κάθε παράγοντα που δίνει την καλύτερη μέση τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση.

Η ανάλυση της διακύμανσης των τιμών (ANalysis Of VAriance-ANOVA) μπορεί να εφαρμοσθεί στον πίνακα για να υπολογισθεί ποιες από τις μεταβλητές απόφασης επηρεάζουν περισσότερο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης [20].

Ως παράδειγμα για το πως λειτουργεί η SDE, θεωρείστε ένα πρόβλημα σχεδιασμού που να περιέχει τρεις παράγοντες, ο καθένας από τους οποίους έχει τρία επίπεδα. Η εφαρμογή της SDE θα γίνει ως εξής:

1^ο βήμα. Δημιουργία του ορθογωνίου πίνακα.

Αρ. Πειραμ.	Παραγοντ. 1	Παραγοντ. 2	Παραγοντ. 3	Αντ. Συναρτ.
1	1	1	1	R1
2	2	2	2	R2
3	3	3	3	R3
4	1	3	2	R4
5	2	1	3	R5
6	3	2	1	R6
7	1	2	3	R7
8	2	3	1	R8
9	3	1	2	R9

2^ο βήμα. Δημιουργία του πίνακα με τις μέσες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.

	Παράγοντας. 1	Παράγοντας. 2	Παράγοντας. 3
Επίπεδο 1	$\frac{1}{3}(R_1 + R_4 + R_7)$	$\frac{1}{3}(R_1 + R_5 + R_9)$	$\frac{1}{3}(R_1 + R_6 + R_8)$
Επίπεδο 2	$\frac{1}{3}(R_2 + R_5 + R_8)$	$\frac{1}{3}(R_2 + R_6 + R_7)$	$\frac{1}{3}(R_2 + R_4 + R_9)$
Επίπεδο 3	$\frac{1}{3}(R_3 + R_6 + R_9)$	$\frac{1}{3}(R_3 + R_4 + R_8)$	$\frac{1}{3}(R_3 + R_5 + R_7)$

3^ο βήμα. Επιλογή εκείνου του επιπέδου από κάθε παράγοντα με την καλύτερη μέση τιμή. Βέλτιστη θεωρείται η "μέγιστη" όταν πρέπει η αντικειμενική συνάρτηση να μεγιστοποιείται ή η "ελάχιστη" όταν πρέπει να ελαχιστοποιείται.

Γενικές οδηγίες για την εφαρμογή της προσομοίωσης

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων προσομοίωσης αποτελεί μόνο ένα τμήμα της συνολικής διαδικασίας προσομοίωσης. Τα ακόλουθα γενικά βήματα πρέπει να περιλαμβάνονται σε κάθε σωστή μελέτη προσομοίωσης. Αν και αυτά τα βήματα είναι γνωστά και δεν περιλαμβάνουν κάποιες νέες ιδέες προσομοίωσης, είναι αρκετά σημαντικά για την εφαρμογή της προσομοίωσης, με επιτυχία, σε πρακτικές βιομηχανικές εφαρμογές.

1. *Διατύπωση του προβλήματος και σχεδιασμός της μελέτης.* Σαφής ορισμός του σκοπού της εργασίας. Λεπτομερής περιγραφή της διάταξης του συστήματος. Καθορισμός των κριτηρίων για την σύγκριση εναλλακτικών σχεδιασμών του συστήματος. Σχεδιασμός της μελέτης όσον αφορά στον αριθμό των ανθρώπων, το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για κάθε τμήμα της.
2. *Συλλογή δεδομένων και ορισμός του μοντέλου.* Πρέπει να συγκεντρωθούν δεδομένα από το σύστημα, για τον καθορισμό των παραμέτρων εισόδου και των κατανομών πιθανοτήτων (π.χ. κατανομή του χρόνου επισκευής μιας μηχανής). Για να έχουμε έγκυρα αποτελέσματα απαιτούνται ακριβή δεδομένα. Τα δεδομένα συμπεριλαμβάνουν χρόνους επεξεργασίας, χρόνους μεταφοράς και κίνησης, χρόνους αστοχίας των διαφόρων μηχανών, χρόνους επισκευής κλπ. Μερικές φορές δε είναι δυνατόν να είναι άμεσα διαθέσιμα όλα τα δεδομένα. Κάποιες ενδεχόμενες πηγές δεδομένων (με φθίνουσα σειρά πιθανής ακρίβειας) μπορεί να είναι χρονομετρήσεις, ιστορικά αρχεία, απαιτήσεις του πελάτη, οι καλύτερες προβλέψεις του πελάτη ή καλύτερες προβλέψεις του ειδικού που δημιουργεί το μοντέλο.

3. *Στατιστική μοντελοποίηση* της τυχαιότητας του συστήματος, όπως οι βλάβες των μηχανών.
4. *Διασφάλιση αξιοπιστίας*. Να εμπλακούν άνθρωποι που είναι αρκετά εξοικειωμένοι με τις λειτουργίες του συστήματος (χειριστές μηχανών, μηχανικοί παραγωγής, κλπ), κατά την διαδικασία δόμησης του μοντέλου.
5. *Δόμηση και επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου*. Αποφασίζεται εάν θα χρησιμοποιηθεί γλώσσα προσομοίωσης ή ένας προσομοιωτής συστημάτων παραγωγής. Ο κατασκευαστής του μοντέλου μπορεί να κάνει ένα πολύπλοκο μοντέλο πιο φιλικό προς τους χρήστες, με την προσθήκη χαρακτηριστικών που βοηθούν την επικοινωνία με τους χρήστες και τα οποία επιτρέπουν στο προσωπικό της παραγωγής να κάνει συγκεκριμένες τροποποιήσεις στο μοντέλο χωρίς προγραμματισμό.
6. *Πιλοτικές δοκιμές (runs) και έλεγχος αξιοπιστίας*. Αυτό μπορεί να γίνει για παράδειγμα για να ελεγχθεί η ευαισθησία της εξόδου ενός μοντέλου σε μικρές αλλαγές μιας παραμέτρου εισόδου. Για υπάρχοντα συστήματα, τα δεδομένα εξόδου μπορούν να συγκριθούν με υπάρχοντα δεδομένα του πραγματικού συστήματος.
7. *Σχεδιασμός πειραμάτων*. Προσδιορισμός των σχεδιασμών του συστήματος που πρόκειται να προσομοιωθούν, του αριθμού των ανεξάρτητων προσομοιώσεων για κάθε εναλλακτική, το μέγεθος της κάθε δοκιμής και τις αρχικές συνθήκες για κάθε μία (π.χ. αρχική κατάσταση κάθε μηχανής και εργαζόμενου).
8. *Εκτέλεση των πειραμάτων* του βήματος 7. Ας σημειωθεί ότι οι πολλαπλές δοκιμές είναι καλύτερες από την μία, γιατί δίδουν την αίσθηση της κατανομής των μεταβλητών. Τυπικά για κάθε δοκιμή υπάρχει μια περίοδος "προθέρμανσης" (*warm-up*) έτσι ώστε να επιτραπεί στο σύστημα να προσεγγίσει μια σταθερή κατάσταση πριν την συγκέντρωση και αξιοποίηση των δεδομένων εξόδου [22].
9. *Ανάλυση των δεδομένων εξόδου*. Εκτίμηση των δεικτών απόδοσης για ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό του συστήματος, και προσδιορισμό του καλύτερου εναλλακτικού σχεδιασμού του συστήματος όσον αφορά κάποιους συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης.
10. *Καταγραφή και εφαρμογή των αποτελεσμάτων*. Καταγραφή των υποθέσεων του μοντέλου καθώς και του κώδικα του μοντέλου. Χρήση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

5.3 Εφαρμογές

Η ακαδημαϊκή βιβλιογραφία πάνω στον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής επικεντρώνεται στην λύση απλοποιημένων, ανεξάρτητων τμημάτων του συνολικού προβλήματος του σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής. Τα επί μέρους προβλήματα είναι το *πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων*, το *πρόβλημα της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων*, το *πρόβλημα ροής υλικών*, και το *πρόβλημα της χωρητικότητας των αποθηκευτικών πόρων* (Σχ. 5.10). Σκοπός της διατύπωσης και της λύσης αυτών των υποπροβλημάτων δεν είναι η δημιουργία ενός λεπτομερούς μηχανολογικού σχεδιασμού για την κατασκευή ενός εργοστασίου, αλλά το να αντιληφθεί κάποιος την ουσιαστική δυσκολία του σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής. Σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην πραγματικότητα, για την λύση των υποπροβλημάτων θεωρείται ότι η λύση του ενός δεν επηρεάζεται από την λύση των άλλων. Για την λύση αυτών των υποπροβλημάτων, χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον μέθοδοι και εργαλεία της επιχειρησιακής έρευνας (operations research, OR) και της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence, AI). Η περιορισμένη πολυπλοκότητά των μεθόδων και των εργαλείων αυτών, καθώς και τα καλά καθορισμένα μέτρα για την "ορθότητα" της λύσης τα καθιστούν κατάλληλα να περιλαμβάνονται στα εργαλεία λήψης αποφάσεων και βελτιστοποίησης, στον χώρο της επιχειρησιακής έρευνας και της τεχνητής νοημοσύνης.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές, το μέγεθος και η πολυπλοκότητα των προβλημάτων καθώς επίσης και η δυσκολία στον καθορισμό μέτρων "καταλληλότητας" της λύσης, κάνουν δύσκολη την χρήση εργαλείων λήψης αποφάσεων και βελτιστοποίησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η προσομοίωση. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται σαν ένα εργαλείο ανάλυσης, για την αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιασμών. Ο σκοπός εδώ είναι να αποφευχθεί κάποιο λάθος, βρίσκοντας μια αποδεκτή λύση σχεδιασμού. Στην πραγματικότητα είναι αδύνατο να είμαστε σίγουροι ότι θα επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός, ούτε είναι δυνατόν να καθορισθεί πόσο κοντά στο βέλτιστο βρίσκεται ο προτεινόμενος σχεδιασμός. Ωστόσο έγιναν ορισμένες προσπάθειες για την ενσωμάτωση εργαλείων βελτιστοποίησης, όπως η αναζήτηση σε εφαρμογές προσομοίωσης.

Σε αυτό το μέρος θα επαναπροσδιορισθεί η εφαρμογή της επιχειρησιακής έρευνας, της τεχνητής νοημοσύνης, και μεθόδων και εργαλείων προσομοίωσης στα απλοποιημένα υποπροβλήματα σχεδιασμού αλλά και σε πιο πολύπλοκες διατυπώσεις προβλημάτων που προσεγγίζουν καλύτερα τις βιομηχανικές ανάγκες.

5.3.1 Το Πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων (The Resource Requirements Problem)

Το πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων ορίζεται ως ο καθορισμός του αριθμού των μονάδων για κάθε τύπο παραγωγικού πόρου που απαιτούνται σε μια

παραγωγική μονάδα, κατά την διάρκεια ενός προγραμματισμού συγκεκριμένου χρονικού ορίζοντα. Σαν παραγωγικός πόρος ορίζεται οτιδήποτε μπορεί να θεωρηθεί σαν ανεξάρτητη παραγωγική μονάδα στον χώρο του εργοστασίου. Επομένως παραγωγικός πόρος μπορεί να είναι μια μηχανή, ένας χειριστής μιας μηχανής, ένα κέντρο εργασίας, ένα αυτόματο όχημα μεταφοράς κ.λ.π.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, είναι δύσκολη, γιατί η λύση του εξαρτάται από ένα πλήθος αλληλοσυσχετιζόμενων παραγόντων, όπως:

- Η *χωροταξική διάταξη της εγκατάστασης*, η οποία επηρεάζει τον αριθμό των απαιτούμενων πόρων, γιατί καθορίζει ποιοι πόροι είναι προσιτοί από κάθε σημείο στο σύστημα παραγωγής. Η έλλειψη πρόσβασης αυξάνει τον αριθμό των απαιτούμενων πόρων.
- Ο *τεχνολογικός προγραμματισμός παραγωγής και οι απαιτούμενες ποσότητες* των κομματιών που πρόκειται να κατασκευασθούν, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη, αφού μαζί υπαγορεύουν την ζήτηση για κάθε είδος πόρου.
- Η *επιχειρησιακή πολιτική*, επηρεάζει την λύση γιατί καθορίζει πόσο αποτελεσματικά θα χρησιμοποιείται κάθε πόρος του παραγωγικού συστήματος.
- Διάφοροι *περιορισμοί* όπως ο προϋπολογισμός για την απόκτηση εξοπλισμού, ο διαθέσιμος χώρος και ο αριθμός των εργαζομένων, επηρεάζουν την απόφαση για το πόσοι πόροι ενός τύπου απαιτούνται και αυτή η απόφαση, με την σειρά της, επηρεάζει τις αποφάσεις για όλους τους άλλους τύπους πόρων του συστήματος παραγωγής.

Αναλυτική Προσέγγιση στο Πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων

Η πρώτη επιστημονική προσέγγιση στο πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων χρησιμοποιεί ένα *περιγραφικό* αναλυτικό μοντέλο. Ένα περιγραφικό μοντέλο, στα πλαίσια του προβλήματος των απαιτούμενων πόρων, είναι μια εξίσωση η οποία εκφράζει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων σαν συνάρτηση μεταβλητών που έχουν σχέση με την παραγωγή, όπως ο απαιτούμενος ρυθμός παραγωγής, ο ρυθμός απόρριψης κομματιών η συχνότητα και η διάρκεια βλαβών (break-downs) των πόρων. Το αποτέλεσμα είναι συνήθως ένας δεκαδικός αριθμός ο οποίος πρέπει να στρογγυλοποιηθεί στην πλησιέστερη ακέραια τιμή στην βάση μιας διαισθητικής θεώρησης [23]. Σαν παράδειγμα περιγραφικού αναλυτικού μοντέλου, προτείνεται η παρακάτω εξίσωση η οποία καθορίζει τον αριθμό των πόρων για ένα κέντρο εργασίας. Εδώ το κέντρο εργασίας ορίζεται σαν μια ομάδα από πόρους του ίδιου τύπου, ή από παρόμοιες χειρωνακτικές εργασίες [24]:

$$n_r = \frac{st \cdot n}{60 \cdot h \cdot sf}$$

- n_r \equiv αριθμός μηχανών
 n \equiv συνολική απαιτούμενη παραγωγή σε κομμάτια ανά ημέρα
 st \equiv τυπικός απαιτούμενος χρόνος για την κατεργασία ενός κομματιού σε μια μηχανή
 sf \equiv συντελεστής απορριμμάτων (ο αριθμός των καλών κομματιών προς τον αριθμό των ελαττωματικών)
 h \equiv τυπικός αριθμός διαθέσιμων ωρών λειτουργίας της μηχανής ανά ημέρα

Αυτό είναι ένα μοντέλο μιας περιόδου που εφαρμόζεται μόνο σε ένα κέντρο εργασίας, για ένα μόνο προϊόν και για ένα σύστημα παραγωγής μιας μόνο διεργασίας. Όπως και με άλλα αναλυτικά μοντέλα, είναι πολύ εύκολο στην χρήση, αλλά λύνει ένα πολύ περιορισμένο πρόβλημα. Δεν λαμβάνει υπόψη του την δυναμική φύση των απαιτήσεων της παραγωγής κατά τον σχεδιασμό και την στοχαστική φύση των βλαβών και των απορριμμάτων. Και το πιο σημαντικό είναι ότι δε λαμβάνει υπόψη του καμία από τις αλληλεπιδράσεις με την χωροταξική διάταξη ή τις μεθόδους χρονοπρογραμματισμού του συστήματος παραγωγής.

Έχουν γίνει επεκτάσεις της αναλυτικής προσέγγισης για την παραγωγή ενός προϊόντος σε ένα σύστημα παραγωγής με πολλαπλές διεργασίες [25,26]. Άλλες επεκτάσεις λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα των παραμέτρων του προβλήματος σε πραγματικά συστήματα παραγωγής, μοντελοποιώντας τις παραμέτρους σαν τυχαίες μεταβλητές τόσο στην περίπτωση συστήματος παραγωγής με μια διεργασία [27] όσο και στην περίπτωση με πολλές διεργασίες [28].

Εφαρμογή της Μεθόδου του Μαθηματικού Προγραμματισμού στο πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων

Η διατύπωση του προβλήματος των απαιτούμενων πόρων με την βοήθεια μαθηματικού προγραμματισμού έχει το πλεονέκτημα ότι οι περιορισμοί στις διάφορες "ποσότητες" σχετικές με τον σχεδιασμό και την λειτουργία, οι οποίες κατανέμονται στους πόρους του συστήματος, μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια σαν περιορισμοί στο μαθηματικό πρόγραμμα. Παραδείγματα τέτοιων ποσοτήτων κατανεμημένων στους πόρους του συστήματος, είναι ο προϋπολογισμός, ο διαθέσιμος χώρος και οι υπερωρίες. Κάθε πόρος "καταναλώνει" ένα συγκεκριμένο ποσό της κάθε ποσότητας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προσδιορισθούν οι συσχετισμοί ανάμεσα στις ποσότητες πόρων διαφορετικού τύπου.

Μια από τις πιο κατανοητές διατυπώσεις του προβλήματος των απαιτούμενων πόρων με την βοήθεια μαθηματικού προγραμματισμού [29] είναι η περίπτωση στην οποία οι πόροι είναι μηχανές. Αυτή η περίπτωση θα περιγραφεί

φεί λεπτομερώς στην συνέχεια, σαν παράδειγμα επίλυσης του προβλήματος των απαιτούμενων πόρων με την βοήθεια μαθηματικού προγραμματισμού.

Το πρόβλημα έγκειται στο να καθορισθεί ο αριθμός των απαιτούμενων μηχανών σε καθένα από τα N κέντρα εργασίας, και σε κάθε μια από T χρονικές περιόδους. Τα κέντρα εργασίας συνιστούν μια διαδικασία παραγωγής flow line, η οποία παράγει πολλαπλά προϊόντα. Κάθε ένα από τα N κέντρα εργασίας περιλαμβάνει μόνο ένα τύπο μηχανής, αλλά διαφορετικά κέντρα εργασίας περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους μηχανών. Τα χαρακτηριστικά παραγωγής ενός κέντρου εργασίας (π.χ. ο ρυθμός παραγωγής ανά μηχανή και το ποσοστό απορριμμάτων) ποικίλουν από την μια περίοδο στην άλλη, όπως και η ζήτηση για τα τελικά προϊόντα. Στόχος τελικά είναι, να βρεθεί ο αριθμός μηχανών σε κάθε κέντρο εργασίας για κάθε χρονική περίοδο, ο οποίος ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος. Οι μηχανές που υπάρχουν σε καθένα από τα κέντρα εργασίας κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, είναι δυνατόν είτε να έχουν αγορασθεί στην αρχή αυτής της περιόδου, είτε να λειτουργούν σε αυτά από προηγούμενη χρονική περίοδο. Έχει υποτεθεί ότι τα επιμέρους κόστη που έχουν σχέση με το συνολικό κόστος, είναι το κόστος επένδυσης της μηχανής, τα έξοδα λειτουργίας κατά τις υπερωρίες, το κόστος μη χρήσης της μηχανής και το κόστος διάθεσης της μηχανής των οποίων οι τιμές ανάγονται στην ση-μερινή τους αξία (παρούσα αξία) η οποία και χρησιμοποιείται για όλους τους υπολογισμούς.

Έστω x_{it} είναι ο αριθμός των διαθέσιμων μηχανών στο κέντρο εργασίας i στην αρχή και κατά την διάρκεια της χρονικής περιόδου t . Η αντικειμενική συνάρτηση, που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε, είναι το άθροισμα από τα επιμέρους κόστη:

$$\bullet \text{ Κόστος Επένδυσης} = \sum_{t=1}^T (P | F, I, t - 1) \sum_{i=1}^N F_{ii} |x_{it} - x_{i,t-1}|^+$$

όπου:

$$\begin{aligned} (P | F, I, t) &\equiv \text{ο συντελεστής απόδοσης χρήματος, όταν ο συν-} \\ &\text{τελεστής απόσβεσης είναι } I\% \text{ ανά περίοδο και ο} \\ &\text{χρόνος απόσβεσης αντιστοιχεί σε } t \text{ περιόδους} \\ F_{ii} &\equiv \text{το κόστος μιας μηχανής στο κέντρο εργασίας } i \\ &\text{όταν αυτή αγοράζεται στην αρχή της περιόδου } t \\ |x_{it} - x_{i,t-1}|^+ &\equiv \text{ο αριθμός των πρόσθετων μηχανών τύπου } i \text{ που} \\ &\text{αποκτούνται στην αρχή της περιόδου } t \\ &\equiv x_{it} - x_{i,t-1} \text{ εάν } x_{it} \geq x_{i,t-1}, 0 \text{ σε άλλη περίπτωση} \end{aligned}$$

$$\bullet \text{ Κόστος διάθεσης της μηχανής} = - \sum_{t=1}^T (P | F, I, t - 1) \sum_{i=1}^N S_{ii} |x_{i,t-1} - x_{it}|^+$$

όπου:

- S_{it} \equiv μέση ταμειακή εισροή ως αποτέλεσμα της απόσυρσης μιας μηχανής του κέντρου εργασίας i στην αρχή της χρονικής περιόδου t
- $|x_{i,t-1} - x_{it}|^+$ \equiv Ο αριθμός των μηχανών τύπου I , οι οποίες έχουν αποσυρθεί (διατεθεί) στην αρχή της περιόδου t
- $\equiv x_{i,t-1} - x_{it}$ εάν $x_{i,t-1} \geq x_{it}$, 0 σε άλλη περίπτωση

- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης $= \sum_{t=1}^T (P|F, I, t) \sum_{i=1}^N m_{it} x_{it}$

όπου:

- m_{it} \equiv το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μιας μηχανής τύπου i κατά την διάρκεια της περιόδου t

Τα εναπομείναντα δύο κόστη είναι συναρτήσεις της απόκλισης του αριθμού των διαθέσιμων μηχανών σε μια περίοδο, X_{it} από τον αριθμό M_{it} , που απαιτείται έτσι ώστε να επιτευχθούν οι απαιτήσεις της παραγωγής που έχουν προγραμματισθεί για την περίοδο αυτή. Προκειμένου να υπολογίσουμε το M_{it} σημειώνουμε ότι εάν κάθε μηχανή στο κέντρο εργασίας i έχει, χωρίς διακοπές, ένα ρυθμό παραγωγής r_{ij} κομμάτια ανά περίοδο για τον τύπο προϊόντος j ($j = 1, 2, \dots, J$) και ένα συντελεστή απορριμμάτων e_{ij} για το προϊόν τύπου j , τότε ο αριθμός των μηχανών που απαιτείται για να ικανοποιηθούν πλήρως οι απαιτήσεις της παραγωγής για P_{ijt} μονάδες προϊόντος ($j = 1, 2, \dots, J$), είναι:

$$M_{it} = \sum_{j=1}^J \frac{P_{ijt}}{(1 - e_{ij})r_{ij}}$$

Καθώς το σύστημα είναι διάταξης flow line, η έξοδος του κέντρου εργασίας i είναι η είσοδος του κέντρου εργασίας $i + 1$. Οι απαιτήσεις σε τελικό προϊόν μπορούν να καθορισθούν ως P_{Njt} ($j = 1, 2, \dots, J$). Προκειμένου να είναι σίγουρο ότι αυτές ικανοποιούνται, οι απαιτήσεις παραγωγής για το κέντρο εργασίας $N-1$ θα πρέπει να είναι:

$$P_{N-1,jt} = \frac{P_{Njt}}{(1 - e_{Nj})}$$

Με παρόμοιο τρόπο, οι απαιτήσεις παραγωγής για το κέντρο εργασίας $N-2$, $P_{N-2,jt}$, μπορούν να υπολογισθούν από το $P_{N-1,jt}$ και ούτω καθ'εξής, έτσι ώστε ο αριθμός των μηχανών που απαιτείται στο κέντρο εργασίας i κατά την διάρκεια της περιόδου t να είναι:

$$M_{it} = \sum_{j=1}^J \frac{P_{Njt}}{\prod_{k=1}^{N-i} (1 - e_{i+k,j}) (1 - e_{ij}) r_{ij}}$$

Όταν $x_{it} > M_{it}$, έχουμε πλεονάζον δυναμικό παραγωγής, με αποτέλεσμα την ύπαρξη κόστους από το κεφάλαιο που είναι δεσμευμένο σε ανενεργό εξοπλισμό και εργαζομένους. Το κόστος αυτό αναφέρεται σαν κόστος υπολειτουργίας.

- Κόστος υπολειτουργίας = $\sum_{t=1}^T (P|F, I, t) \sum_{i=1}^N C_{it}^+ |x_{it} - M_{it}|^+$

όπου:

$$C_{it}^+ \equiv \text{το κόστος που συνεπάγεται η ύπαρξη μιας πλεονάζουσας μηχανής τύπου } i \text{ κατά την περίοδο } t$$

$$|x_{it} - M_{it}|^+ \equiv X_{it} - M_{it} \text{ εάν } X_{it} \geq M_{it}, 0 \text{ σε άλλη περίπτωση}$$

Όταν $X_{it} < M_{it}$ δεν υπάρχει αρκετό δυναμικό παραγωγής προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε τελικό προϊόν (P_{Njt} για όλα τα j), και απαιτείται πρόσθετη παραγωγή με χρήση υπερωριών (η επιλογή υπεργολαβίας δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτό το παράδειγμα).

- Κόστος υπερωριών = $\sum_{t=1}^T (P|F, I, t) \sum_{i=1}^N C_{it}^- |M_{it} - x_{it}|^+$

όπου:

$$C_{it}^- \equiv \text{το κόστος υπερωριακής εργασίας που συνεπάγεται η έλλειψη μιας μηχανής τύπου } i \text{ κατά την διάρκεια της περιόδου } t$$

$$|M_{it} - x_{it}|^+ \equiv M_{it} - x_{it} \text{ εάν } M_{it} \geq x_{it}, \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση } 0$$

Οι βασικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι οι ακόλουθοι:

- *Περιορισμός προϋπολογισμού (budget constraint)*. Το κόστος επένδυσης των μηχανών στην περίοδο t δεν πρέπει να υπερβαίνει το άθροισμα του προϋπολογισμού της περιόδου t συν τα έσοδα από την διάθεση μηχανών στην αρχή της περιόδου t .

$$\sum_{i=1}^N (F_{it} |x_{it} - x_{i,t-1}|^+ - S_{it} |x_{i,t-1} - x_{it}|^+) \leq B_t, \text{ για κάθε } t$$

όπου:

$B_t \equiv$ ο προϋπολογισμός για την περίοδο t

- *Περιορισμός χώρου εργασίας (floor space constraint)*. Οι μηχανές που χουν προγραμματισθεί να λειτουργήσουν την περίοδο t πρέπει να μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στα όρια του χώρου εργασίας που είναι διαθέσιμος εκείνη την περίοδο.

$$\sum_{i=1}^N a_i x_{it} \leq L_t, \text{ για κάθε } t$$

όπου:

$a_i \equiv$ ο χώρος που καταλαμβάνει μια μηχανή τύπου i

$L_t \equiv$ η ολική επιφάνεια στον χώρο εργασίας που είναι διαθέσιμη στην περίοδο t

- *Περιορισμός υπερωριών (overtime constraint)*. Δεν πρέπει να ξεπεραστεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός ωρών για υπερωρίες σε κάθε κέντρο εργασίας.

$$b_i |M_{it} - x_{it}|^+ \leq U_{it}, \text{ για κάθε } i, t$$

όπου:

$b_i \equiv$ οι ώρες υπερωριών ανά μηχανή και περίοδο, για μηχανή τύπου i

$U_{it} \equiv$ ο μέγιστος αριθμός υπερωριών για το κέντρο εργασίας i στην περίοδο t

- *Περιορισμοί εφικτής λύσης (solution feasibility constraints)*. Ο αριθμός των μηχανών σε κάθε περίοδο πρέπει να είναι ένας μη αρνητικός ακέραιος αριθμός. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των μηχανών που διατίθενται για απόσυρση στην αρχή κάθε περιόδου, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των διαθέσιμων μηχανών κατά την διάρκεια της προηγούμενης περιόδου.

$x_{it} \geq 0$ και ακέραιος, για όλα τα i, t

$$|x_{i,t-1} - x_{it}|^+ \leq x_{i,t-1}, \text{ για όλα τα } i, t$$

Όπως έχει ειπωθεί, το μαθηματικό μοντέλο είναι μη γραμμικό. Όμως, το μο-

ντέλο αυτό μπορεί να μετατραπεί σε γραμμικό με την βοήθεια μερικών ορισμών:

Θεωρούμε:

- $y_{it}^+ = |x_{it} - x_{i,t-1}|^+ = (x_{it} - x_{i,t-1})$ αν $x_{it} \geq x_{i,t-1}$, αλλιώς 0
- $y_{it}^- = |x_{i,t-1} - x_{it}|^+ = (x_{i,t-1} - x_{it})$ αν $x_{i,t-1} \geq x_{it}$, αλλιώς 0
- $\mu_{it}^+ = |x_{it} - M_{it}|^+ = (x_{it} - M_{it})$ αν $x_{it} \geq M_{it}$, αλλιώς 0
- $\mu_{it}^- = |M_{it} - x_{it}|^+ = (M_{it} - x_{it})$ αν $M_{it} \geq x_{it}$, αλλιώς 0

έτσι ώστε

- $y_{it}^+ \cdot y_{it}^- = 0, \mu_{it}^+ \cdot \mu_{it}^- = 0$
- $x_{it} = y_{it}^+ - y_{it}^- + x_{i,t-1}$, ή

$$x_{it} = x_{i0} + \sum_{k=1}^t (y_{ik}^+ - y_{ik}^-)$$

και

- $x_{it} = \mu_{it}^+ - \mu_{it}^- + M_{it}$

Το ολοκληρωμένο μοντέλο είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακεραίου προγραμματισμού και μπορεί να εκφρασθεί ως ακολούθως

$$\text{Minimize } z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} (P|F, I, t-1)(F_{it}y_{it}^+ - S_{it}y_{it}^-) \\ + (P|F, I, t)(C_{it}^+\mu_{it}^+ - C_{it}^-\mu_{it}^-) \\ + (P|F, I, t)(m_{it})(\mu_{it}^+ - \mu_{it}^- + M_{it}) \end{bmatrix} \quad (5-16a)$$

Υπό τους όρους:

$$\sum_{i=1}^N (F_{it}y_{it}^+ - S_{it}y_{it}^-) \leq B_t, \text{ για όλα τα } t \quad (5-16b)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i (\mu_{it}^+ - \mu_{it}^- + M_{it}) \leq L_t, \text{ για όλα τα } t \quad (5-16c)$$

$$b_i \mu_{it}^- \leq U_{it}, \text{ για όλα τα } i, t \quad (5-16d)$$

$$y_{it}^- - \sum_{k=1}^{t-1} (y_{ik}^+ - y_{ik}^-) \leq x_{io}, \text{ για όλα τα } i, t > 1 \quad (5-16e)$$

και

$$y_{i1}^- \leq x_{io}$$

$$\sum_{k=1}^t (y_{ik}^+ - y_{ik}^-) - \mu_{it}^+ + \mu_{it}^- = M_{it} - x_{io}, \text{ για κάθε } i, t \quad (5-16f)$$

$$y_{it}^+ \cdot y_{it}^- = 0, \quad \mu_{it}^+ \cdot \mu_{it}^- = 0, \text{ για κάθε } i, t \quad (5-16g)$$

$$y_{it}^+, y_{it}^- \geq 0 \text{ και ακέραιος } \mu_{it}^+, \mu_{it}^- \geq 0, \text{ για κάθε } i, t \quad (5-16h)$$

$$(\mu_{it}^+ - \mu_{it}^- + M_{it}) \text{ ακέραιος, για κάθε } i, t \quad (5-16i)$$

Οι περιορισμοί (5-16b) μέχρι και (5-16e) αντιστοιχούν στον προϋπολογισμό, τον χώρο παραγωγής, τις υπερωρίες και τον περιορισμό εφικτής λύσης. Ο περιορισμός (5-16f) είναι απαραίτητος για την διασφάλιση ότι ο ορισμός x_{it} είναι ο ίδιος όταν προσδιορίζεται από τα y όπως και όταν προσδιορίζεται από τα μ . Ο τελευταίος περιορισμός (5-16i) διασφαλίζει ότι το x_{it} θα είναι ακέραιος.

Μελετώντας το μοντέλο αυτό, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για ένα ρεαλιστικό πρόβλημα, η διατύπωση ενός μαθηματικού προγράμματος μπορεί να είναι πολύ δύσκολη. Αυτό συμβαίνει γιατί απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για να αναπτυχθούν αναλυτικές εκφράσεις για την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς, οι οποίες στην συνέχεια πρέπει να γραμμικοποιηθούν, και επιπλέον γιατί η διατύπωσή του δεν εγγυάται την *λύση* του. Πράγματι, σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους και πολυπλοκότητας, είναι σχεδόν αδύνατο να συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα, αλλά ακόμα κι αν αυτό επιτευχθεί, ο μεγάλος αριθμός μεταβλητών και περιορισμών μπορεί να καταστήσει την επίλυση του διατυπωμένου μοντέλου ανέφικτη [30]. Οι λόγοι αυτοί έχουν αποτρέψει μια ευρεία εφαρμογή των μεθόδων Μαθηματικού Προγραμματισμού σε προβλήματα σχεδιασμού στην βιομηχανία.

Εφαρμογή της Προσομοίωσης στο πρόβλημα των απαιτούμενων πόρων

Κατά τον σχεδιασμό σχετικά απλών συστημάτων είναι δυνατόν να χρησιμο-

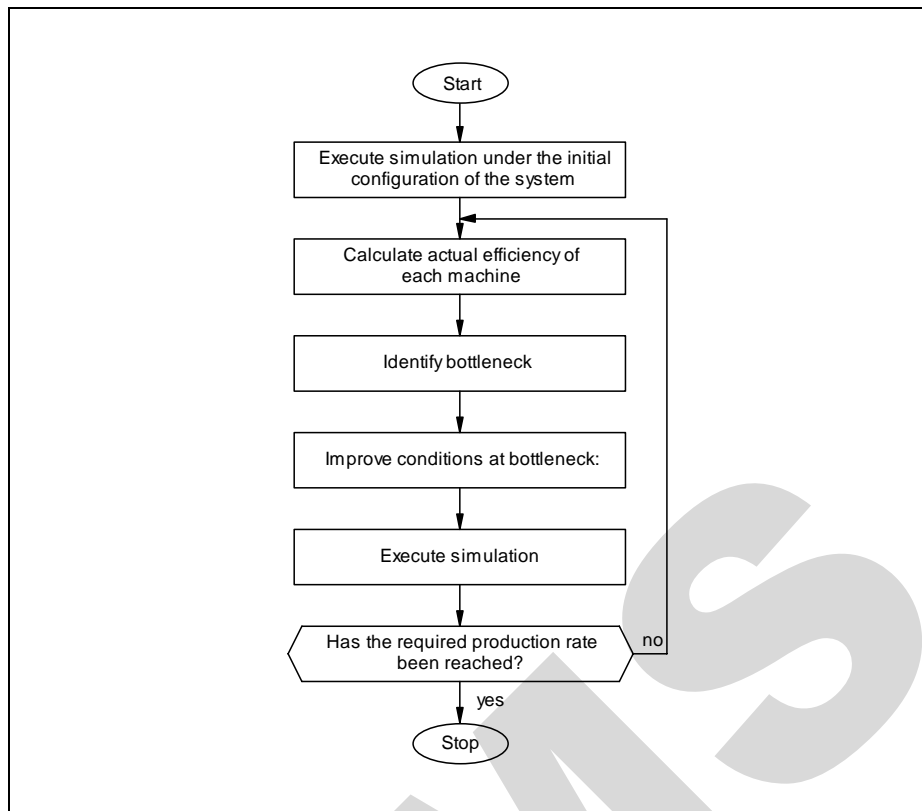
ποιηθεί η προσομοίωση, με τρόπο που να δίδει καλύτερα αποτελέσματα από την "τυφλή" επαναληπτική μέθοδο δοκιμής και λάθους. Μια τέτοια, περίπτωση είναι αυτή στην οποία προσδιορίζονται οι απαιτήσεις σε παραγωγικούς πόρους ενός συστήματος παραγωγής με διάταξη flow line, η οποία πρέπει να επιτύχει ένα δεδομένο ρυθμό παραγωγής.

Ο ρυθμός παραγωγής σε ένα σύστημα flow line, περιορίζεται σε απόλυτο βαθμό από τον πόρο με μικρότερη παραγωγικότητα. Στους πόρους που βρίσκονται πριν από τον αυτόν τον συγκεκριμένο πόρο στην γραμμή παραγωγής, είναι πολύ πιθανό να παρουσιασθεί συσσώρευση κομματιών προς επεξεργασία, γιατί η ροή των κομματιών επιβραδύνεται από τον ρυθμό με τον οποίο ο αργός παραγωγικός πόρος δέχεται από τον προηγούμενο πόρο της γραμμής τα κομμάτια. Αντίστοιχα, στους πόρους που βρίσκονται μετά από αυτόν παρατηρείται έλλειψη κομματιών, γιατί δε μπορούν να τροφοδοτηθούν αρκετά γρήγορα. Το πρόβλημα συσσώρευσης κομματιών εμφανίζεται πάντοτε γιατί στην πράξη, σε μια γραμμή παραγωγής, είναι σχεδόν αδύνατο να συγχρονισθούν απόλυτα οι ρυθμοί παραγωγής όλων των πόρων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να μετριασθεί αν:

- αναδιανεμηθεί η εργασία που επιτελείται στον πόρο με τον μικρό ρυθμό παραγωγής,
- τροποποιηθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του πόρου με τον μικρό ρυθμό παραγωγής, ή
- προστεθούν επιπλέον πόροι στο στάδιο παραγωγής του αργού πόρου.

Όμως, αφού εφαρμοσθεί μια από τις προηγούμενες διορθωτικές ενέργειες, δημιουργείται συσσώρευση κομματιών (αν και λιγότερο σοβαρή από την προηγούμενη), σε κάποιο άλλο σημείο της γραμμής παραγωγής. Ας σημειωθεί ότι η προσθήκη επιπλέον πόρων είναι μόνο μια από τις διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος της συσσώρευσης που προκαλείται από τον αργό πόρο. Στην βιομηχανία είναι η λιγότερο επιθυμητή λόγω του υψηλού της κόστους.

Μια μέθοδος για τον σχεδιασμό μιας παραγωγικής διαδικασίας flow line, είναι να αρχίσει κανείς από μια ελάχιστη αρχική διαμόρφωση του συστήματος (με τον μικρότερο δυνατό αριθμό πόρων κάθε τύπου). Μια τέτοια συντηρητική αρχική διαμόρφωση της γραμμής παραγωγής θα μπορούσε να περιλαμβάνει έναν πόρο από κάθε τύπο. Το επόμενο βήμα είναι να προσδιορισθεί ο αργός πόρος με την βοήθεια προσομοίωσης. Ο ρυθμός παραγωγής της γραμμής παραγωγής μπορεί στην συνέχεια να βελτιωθεί εφαρμόζοντας μια από τις παραπάνω διορθωτικές ενέργειες. Αν ο απαιτούμενος ρυθμός παραγωγής δεν έχει επιτευχθεί ακόμα, τότε εφαρμόζεται μια διορθωτική ενέργεια για τον καινούργιο αργό πόρο κ.ο.κ. (Σχ. 5.32) [31].



Execute simulation under the initial configuration of the system = Εκτέλεση της προσομοίωσης με βάση την αρχική διαμόρφωση του συστήματος
 Calculate actual efficiency of each machine = Υπολογισμός της πραγματικής απόδοσης κάθε μηχανής
 Identify bottleneck = Αναγνώριση του σημείου

Συσσώρευσης
 Improve conditions at bottleneck = Βελτίωση των συνθηκών στο σημείο συσσώρευσης
 Execute simulation = Εκτέλεση προσομοίωσης
 Has the required production rate been reached? = Έχει επιτευχθεί ο απαιτούμενος ρυθμός παραγωγής;

Σχήμα 5.32 Διαδικασία Σχεδίασης Γραμμής Παραγωγή (Flow Line) με Χρήση Προσομοίωσης

Ο ρόλος της προσομοίωσης σε αυτή την διαδικασία είναι να προσδιορίζει κάθε φορά το σημείο συσσώρευσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας την πραγματική απόδοση E_r κάθε πόρου, η οποία ορίζεται ως εξής [31]:

$$E_r = \frac{J_r}{T_r - S_r - B_r}$$

όπου:

J_r ≡ ο αριθμός ολοκληρωμένων προϊόντων στον πόρο r , εκτός

		από εκείνα τα προϊόντα που χρειάζονται επανεπεξεργασία
T_r	\equiv	ο ολικός χρόνος στον πόρο r
S_r	\equiv	ο ολικός χρόνος υστέρησης τροφοδοσίας του πόρου r
B_r	\equiv	ο ολικός χρόνος υστέρησης επεξεργασίας στον πόρο r

Ο πόρος με την μικρότερη πραγματική απόδοση E_r , θεωρείται ότι είναι ο αργός πόρος ο οποίος δημιουργεί συσώρευση.

Στατιστικά μεγέθη, όπως ο συνολικός χρόνος υστέρησης τροφοδοσίας του πόρου r και ο συνολικός χρόνος υστέρησης επεξεργασίας στον πόρο r , είναι δύσκολο να μετρηθούν με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο εκτός της προσομοίωσης, ιδίως όταν το σύστημα είναι μεγάλο, οι λεπτομέρειες της λειτουργίας του είναι πολύπλοκες και το σύστημα δεν υπάρχει ακόμη στην πραγματικότητα.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε σε μια βιομηχανία παραγωγής ατσάλινων σωλήνων μεγάλης διαμέτρου. Μελετήθηκε η διαμόρφωση μιας γραμμής παραγωγής με 25 διεργασίες και επιθυμητό ρυθμό παραγωγής 7.000 σωλήνων μηνιαίως [31].

Προσέγγιση του Προβλήματος των απαιτούμενων πόρων με την θεωρία των αναμονών (queuing theory)

Κατά τον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής ο ρόλος της θεωρίας των αναμονών είναι παρόμοιος με αυτόν της προσομοίωσης. Για απλά συστήματα παραγωγής, τα αποτελέσματα που συνήθως παρέχονται από την προσομοίωση μπορούν αντί αυτής να προκύψουν από την λύση των αλγεβρικών εξισώσεων που αποτελούν το μοντέλο της θεωρίας των αναμονών.

"Όπως συμβαίνει με όλα τα αναλυτικά μοντέλα, τα "μοντέλα αναμονής" έχουν μια περιορισμένη περιοχή στην οποία μπορούν να εφαρμοσθούν. Μόνο ορισμένοι τύποι συστημάτων παραγωγής μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν με την χρήση αυτών των μοντέλων. Σε έναν τέτοιο τύπο ανήκουν τα συστήματα στα οποία η εργασία σε εξέλιξη (WIP) παραμένει σταθερή. Η συνθήκη της σταθερής WIP ισχύει σε πολλά ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS), στα οποία τα κομμάτια κυκλοφορούν μέσα στο σύστημα, πάνω σε καθορισμένο αριθμό παλετών.

Ας συζητήσουμε τον τρόπο με τον οποίο πως η θεωρία αναμονών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής (FMS). Θα περιορίσουμε την προσοχή μας στην περίπτωση ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής (FMS), το οποίο παράγει μόνο ένα συγκεκριμένο τύπο κομματιού και αποτελείται από M ομάδες μηχανών, που η κάθε ομάδα έχει από μια μηχανή. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετή για να πάρουμε μια ιδέα της απαιτούμενης ανάλυσης. Η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί χωρίς δυσκολία, έτσι ώστε να καλύψει την γενική περίπτωση πολλών τύπων κομματιών και πολλών μηχανών σε κάθε ομάδα μηχανών[32].

Έστω:

L	\equiv	Αριθμός των παλετών στο ευέλικτο σύστημα παραγωγής
-----	----------	--

- M ≡ Αριθμός των ομάδων μηχανών (= αριθμός μηχανών)
 X ≡ Ρυθμός παραγωγής
 $V(m)$ ≡ Μέσος αριθμός επισκέψεων στην μηχανή m
 $T(m)$ ≡ Μέσος χρόνος απόκρισης της μηχανής m
 $R(m)$ ≡ Μέσος χρόνος απόκρισης (αναμονή + επεξεργασία) στην μηχανή m , για κάθε επίσκεψη
 $L_q(m)$ ≡ Μέσο μήκος σειράς αναμονής στην μηχανή m (περιέχει τις εργασίες που περιμένουν ή που βρίσκονται υπό επεξεργασία)
 $W_q(m)$ ≡ Μέσος χρόνος αναμονής στην μηχανή m , για κάθε επίσκεψη
 $U(m)$ ≡ Εκμετάλλευση της μηχανής m

Στους παραπάνω ορισμούς ο όρος "μέσος" χρησιμοποιείται για τον μέσο όρο, από όλες τις διαδρομές, σε μια συγκεκριμένη φάση, ενός τύπου κομματιού. Στόχος μας είναι ο προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής X , του μέσου μήκους σειράς αναμονής $L_q(m)$ για κάθε μηχανή m , και την εκμετάλλευση $U(m)$ της κάθε μηχανής m .

Για την ανάλυση αυτή, ως σταθμοί εξυπηρέτησης είναι οι μηχανές και ως πελάτες τα κομμάτια. Πρώτα παρατηρούμε ότι για κάθε μηχανή m ,

$$R(m) = T(m) + W_q(m)$$

Ένα κομμάτι το οποίο φθάνει στην μηχανή m , κατά μέσο όρο θα βρει $L_q(m) \cdot (L-1)/L$ κομμάτια, τα οποία περιμένουν για επεξεργασία στην μηχανή πριν από αυτό. Ο αριθμός αυτός είναι το μέσο μήκος της σειράς αναμονής στην μηχανή m , διορθωμένο έτσι όπως "φαίνεται" από ένα από τα κομμάτια τα οποία ευρίσκονται στο ευέλικτο σύστημα παραγωγής (FMS). Καθώς το κάθε κομμάτι, το οποίο προηγείται στην σειρά, έχει ένα χρόνο κατεργασίας $T(m)$,

$$R(m) = T(m) + \frac{(L-1)}{L} L_q(m) T(m)$$

Πολλαπλασιάζοντας με $V(m)$,

$$R(m)V(m) = T(m)V(m) \left[1 + \frac{(L-1)}{L} L_q(m) \right] \quad m = 1, \dots, M \quad (5-17)$$

Το αριστερό μέλος αυτής της εξίσωσης εκφράζει τον μέσο χρόνο που ξοδεύεται από ένα κομμάτι στην μηχανή m , για όλες τις επισκέψεις. Επομένως, ο μέσος χρόνος που ένα κομμάτι παραμένει στο ευέλικτο σύστημα παραγωγής είναι

$$W = \sum_{m=1}^M R(m)V(m)$$

Ο τύπος του Little (5-10) εφαρμοζόμενος συνολικά στο ευέλικτο σύστημα παραγωγής (FMS) δίδει $\bar{\lambda} = L/W$, όπου λ είναι ο μέσος ρυθμός με τον οποίο τα κομμάτια φθάνουν στο σύστημα. Ωστόσο, επειδή ο αριθμός των κομματιών (ή παλετών) στο ευέλικτο σύστημα παραγωγής είναι σταθερός L , το $\bar{\lambda}$ θα πρέπει να είναι ίσο με το X , δηλαδή τον ρυθμό παραγωγής:

$$X = \frac{L}{\sum_{m=1}^M R(m)V(m)} \quad (5-18)$$

Το μέσο μήκος της σειράς αναμονής $L_q(m)$ μπορεί να βρεθεί με εφαρμογή του τύπου (5-11) στην κάθε μηχανή m :

$$L_q(m) = R(m)V(m)X \quad (5-19)$$

Η εκμετάλευση της μηχανής $U(m)$ μπορεί να υπολογισθεί ως εξής. Υποθέτουμε ότι ένα σύνολο p κομματιών παρήχθησαν σε ΔT χρονικές μονάδες, κατά την διάρκεια των οποίων η μηχανή m είναι πραγματικά απασχολημένη για $B(m)$ χρονικές μονάδες. Στην συνέχεια

$$B(m) = T(m)V(m)P$$

Αλλά $U(m) = B(m)/\Delta T$, και $X = p/\Delta T$, έτσι ώστε

$$U(m) = T(m)V(m)X \quad (5-20)$$

Παρατηρώντας τις εξισώσεις (5-17), (5-18) και (5-19) βλέπουμε ότι ξεκινώντας με ένα αρχικό σετ τιμών για το $L_q(m)$, μπορούμε να αξιολογήσουμε τις εξισώσεις (5-17), (5-18) και (5-19) έτσι ώστε να προκύψει ένα νέο σετ τιμών για $L_q(m)$, $m = 1, \dots, M$. Η αποδεκτή διαδικασία είναι να επαναλάβουμε τα παραπάνω, έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση. Σαν αποτέλεσμα θα προκύψουν οι τιμές του ρυθμού παραγωγής X και του μέσου μήκους της αναμονής $L_q(m)$. Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, η εκμετάλλευση $U(m)$ μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση (5-20).

Η θεωρία της αναμονής, όπως και η προσομοίωση, μπορεί να εφαρμοσθεί σε μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμής λάθους για τον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής. Το μοντέλο αναμονής ενός δεδομένου συστήματος θα δώσει μόνο ένα υποσύνολο των δεικτών απόδοσης, που παρέχονται από ένα αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης. Ωστόσο, θα δώσει αποτελέσματα σε συντομότερο χρονικό διάστημα [32], δηλαδή εάν η χρήση προσομοίωσης έδινε αποτελέσματα σε μερικές ώρες η χρήση της θεωρίας αναμονής θα έδινε αποτελέσματα σε μερικά λεπτά.

5.3.2 Το πρόβλημα χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων (Resource Layout Problem)

Το πρόβλημα της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων σχετίζεται με την τοποθέτηση των πόρων σε ένα τμήμα εργοστασίου, με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται μερικές απαιτήσεις παραγωγής. Το πρόβλημα έχει διατυπωθεί με πολλούς τρόπους καθένα από τους οποίους περιέχει διαφορετικό βαθμό ευφυΐας.

1. Ανακατανομή γεωμετρικών αντιγράφων των μηχανών (*template shuffling formulation*).
2. *Quadratic assignment problem (QAP)*.
3. Διάγραμμα σχέσεων (Relationship Chart - REL) .

Οι διατυπώσεις αυτές θα αναλυθούν εκτενέστερα στις παραγράφους που ακολουθούν.

Προσέγγιση του προβλήματος της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων με ανακατανομή γεωμετρικών αντιγράφων των μηχανών.

Πρόκειται για μια μέθοδο όπου ένας αριθμός περιγραμμάτων (γεωμετρικά αντίγραφα των μηχανών, των μονάδων διαχείρισης υλικών κλπ.) κατανέμονται μετά από μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμής και λάθους σε έναν συγκεκριμένο χώρο του εργοστασίου. Είναι ο πιο συνηθισμένος και ευρέως χρησιμοποιούμενος τρόπος λύσης του προβλήματος της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων στην βιομηχανία.

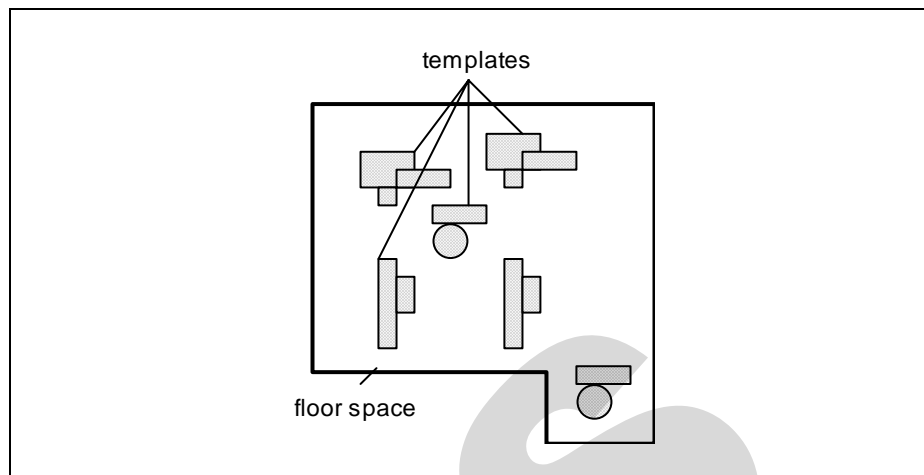
Αυτή η μέθοδος δεν προσφέρεται για αυτοματοποιημένη λύση επειδή δεν είναι καλά δομημένη και οι διάφορες εναλλακτικές διατάξεις των πόρων πρέπει να αξιολογούνται με οπτικό έλεγχο. Ωστόσο, πρακτικά, υποστηρίζεται από όλα τα εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά συστήματα σχεδιασμού εγκαταστάσεων. Αυτά τα συστήματα έχουν την δυνατότητα να "μετακινούν" τα περιγράμματα των πόρων εικονικά στον υπολογιστή πολύ καλύτερα από τον χειρωνακτικό χειρισμό των φυσικών γεωμετρικών αντιγράφων των πόρων. Επίσης, δίδουν την δυνατότητα αντιγραφής, μετακίνησης, διαγραφής και αλλαγής μεγέθους οποιουδήποτε περιγράμματος, εύκολα στην οθόνη (Σχ. 5.33).

Παρέχεται επίσης η δυνατότητα, ο σχεδιασμός να γίνεται σε διάφορα επίπεδα, έτσι ώστε ο σχεδιαστής να έχει την δυνατότητα να επικεντρωθεί σε μερικά μόνο περιγράμματα που τον ενδιαφέρουν, κάνοντας τα υπόλοιπα αόρατα.

Προσέγγιση του προβλήματος της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων με την διατύπωση Quadratic Assignment Problem - QAP.

Η διατύπωση QAP για την χωροταξική τοποθέτηση των πόρων αναφέρεται στην ανάθεση n πόρων σε n χώρους ίσης επιφάνειας για την βελτιστοποίηση ενός στόχου. Οι πιο κοινοί στόχοι περιλαμβάνουν την συνολική απόσταση δια-

κίνησης των υλικών, το συνολικό κόστος για την διακίνηση των υλικών και το κόστος για την αναδιάταξη των ήδη υπάρχοντων πόρων. Τα κόστη διακίνησης των υλικών συνήθως θεωρούνται ανάλογα του γινομένου της απόστασης και του ρυθμού ροής των υλικών ανάμεσα σε δυο πόρους.



Template = Περίγραμμα

Floor space = Επιφάνεια (χώρος) δαπέδου

Σχήμα 5.33 Αντιμετώπιση του Προβλήματος της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων μέσω Ανακατανομής Περιγραμμάτων

Η διατύπωση *QAP* για την χωροταξική τοποθέτηση των πόρων έχει αρκετούς περιορισμούς:

- Πραγματικά προβλήματα είναι δύσκολο να λυθούν βέλτιστα.
- Μεμονωμένοι περιορισμοί, όπως η απαίτηση ότι η απόσταση ανάμεσα σε δυο συγκεκριμένες μηχανές δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από κάποια συγκεκριμένη τιμή, δεν μπορούν να ενσωματωθούν στην διατύπωση του προβλήματος.
- Η τελική διάταξη μπορεί να περιέχει ανομοιομορφη κάλυψη του χώρου των πόρων στον τελικό σχεδιασμό. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαίρεσης που έγινε σε ορισμένους χώρους πόρων έτσι ώστε όλοι οι χώροι να έχουν ίσες διαστάσεις.
- Δεν διαθέτει εύκολο τρόπο εισαγωγής συντελεστών διαφορετικών από το κόστος αναδιάταξης των πόρων και το κόστος μεταφοράς υλικών, στο μοντέλο.
- Θεωρεί μια απλή γραμμική σχέση για τον υπολογισμό του κόστους

διακίνησης υλικών μεταξύ δύο πόρων, σε σχέση με την απόσταση τους.

Η διατύπωση μέσω μαθηματικού προγραμματισμού του QAP δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l c_{ijkl} x_{ik} x_{jl} \quad (5-21a)$$

Υπό τους όρους:

$$\sum_j x_{ij} = 1, \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (5-21b)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, \text{ για } j = 1, \dots, n \quad (5-21c)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (5-21d)$$

Η μεταβλητή X_{ik} αναπαριστά μια μεταβλητή (0-1), η οποία ισούται με 1 αν και μόνο αν η μηχανή i ανατίθεται στην θέση k ενώ το c_{ijkl} είναι το κόστος της ανάθεσης των μηχανών i και j στις θέσεις k και l αντίστοιχα. Ο περιορισμός (5-21b) εκφράζει το γεγονός ότι κάθε πόρος i πρέπει να ανατίθεται μόνο σε μια θέση και ο περιορισμός (5-21c) εκφράζει το γεγονός ότι σε κάθε θέση j πρέπει να έχει ανατεθεί μια μηχανή. Πρόκειται για έναν ακέραιο πρόγραμμα.

Για την λύση αυτού του προγράμματος έχουν προταθεί πολλές λύσεις και παραλλαγές [33-37]. Ωστόσο, το πρόβλημα είναι NP-hard [38], που σημαίνει ότι ο χρόνος που απαιτείται από κάποιον αλγόριθμο για να προσδιορίσει την βέλτιστη λύση αυξάνει εκθετικά, καθώς το μέγεθος του προβλήματος (π.χ. ο αριθμός των πόρων) αυξάνει γραμμικά. Συνεπώς, βέλτιστες λύσεις για προβλήματα που αναμειγνύουν περισσότερους από 15 περίπου πόρους [39] δεν μπορούν να επιτευχθούν με τις σημερινές υπολογιστικές δυνατότητες.

Εξ αιτίας αυτής της υπολογιστικής δυσκολίας, έχουν επινοηθεί πολλές διαφορετικές εμπειρικές (heuristics) μέθοδοι για να βρίσκουν "υποβέλτιστες", αλλά "καλές" λύσεις στο QAP. Αυτές οι μέθοδοι είναι είτε διαδικασίες κατασκευής, οι οποίες τοποθετούν τους πόρους στον χώρο του εργοστασίου τον έναν μετά τον άλλον, έως ότου όλοι οι πόροι να τοποθετηθούν, ή διαδικασίες βελτίωσης, οι οποίες ξεκινούν από μια αρχική ολοκληρωμένη λύση και στην συνέχεια προσπαθούν να βελτιώσουν την λύση με εσωτερικές αναδιατάξεις των πόρων [40].

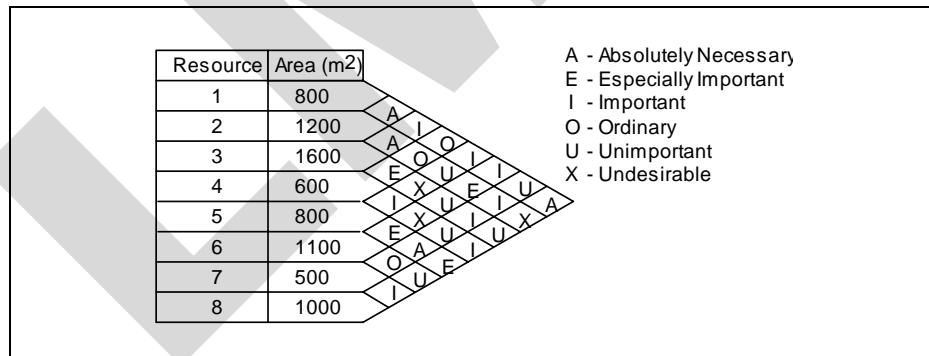
Προσέγγιση στο πρόβλημα της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων των πόρων μέσω διαγράμματος σχέσεων (REL)

Η διατύπωση του προβλήματος της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων με

την βοήθεια διαγράμματος σχέσεων είναι μια περισσότερο ποιοτική διατύπωση, η οποία ξεπερνά το πρόβλημα που δημιουργείται με την *QAP* η οποία έχει αυξημένες απαιτήσεις σε δεδομένα. Ένα διάγραμμα σχέσεων δείχνει το κατά πόσο είναι επιθυμητό να έχουμε ζεύγη πόρων. Αυτός ο βαθμός επιθυμίας εκφράζεται συνήθως με έναν κώδικα από γράμματα (Σχ. 5.34):

- A Απολύτως απαραίτητο τα δύο τμήματα να τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο
- E Βασικό, τα δύο τμήματα να τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο
- I Σημαντικό, τα δύο τμήματα να τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο
- O Οριακά ωφέλιμο, τα δύο τμήματα να τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο
- Y Ασήμαντο, εάν τα δύο τμήματα τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο
- X Τα δύο τμήματα δεν πρέπει να τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο

Αυτοί οι κώδικες μετατρέπονται σε αριθμητική βαθμολογία. Για παράδειγμα, οι βαθμολογίες που χρησιμοποιήθηκαν από το Αυτοματοποιημένο Πρόγραμμα Σχεδιασμού Χωροταξικών Τοποθετήσεων (ALDEP) [41] είναι: $A=4^3$, $E=4^2$, $I=4^1$, $O=4^0$, $U=0$, $X=-4^5$. Η βαθμολόγηση μιας χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων είναι απλά το άθροισμα των εκτιμήσεων για κάθε ζευγάρι γειτονικών πόρων. Αντικειμενικός σκοπός είναι να βρεθεί η διάταξη με την υψηλότερη βαθμολογία.



Resource = Πόρος

Area (m²) = Εμβαδόν (m²)

Σχήμα 5.34 Διάγραμμα REL για οκτώ πόρους

Οι υπάρχουσες μέθοδοι για την διατύπωση με διάγραμμα σχέσεων είναι "εμπειρικές" (*heuristics*) και αρκούνται στο να βρίσκουν τις "καλές" και όχι τις βέλτιστες λύσεις. Οι μέθοδοι είναι κυρίως διαδικασίες δόμησης, οι οποίες

προσθέτουν έναν πόρο κάθε φορά στο εργοστάσιο μέχρι να συμπληρωθεί η *χωροταξική τοποθέτηση των πόρων* [41,42]. Η ποιότητα του αποτελέσματος καθορίζεται από την ποιότητα της εμπειρικής μεθόδου.

Η διατύπωση με την βοήθεια του διαγράμματος σχέσεων βασίζεται στην προϋπόθεση, ότι η τοπική μεγιστοποίηση ωφελεί το σύστημα στο σύνολό του. Ωστόσο, δεν είναι βέβαιο ότι, ο συσχετισμός της τοπικής μεγιστοποίησης με ορισμένους συνολικούς δείκτες απόδοσης όπως ο ρυθμός παραγωγής ή το κόστος απόκτησης εξοπλισμού, είναι ισχυρός.

Προσέγγιση στο πρόβλημα της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων με την χρήση Έμπειρων Συστημάτων (Rule-Based)

Η εφαρμογή των Έμπειρων Συστημάτων στο πρόβλημα της *χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων*, υπήρξε περιορισμένη. Εξ αιτίας της συνδυαστικής φύσης του προβλήματος, είναι αδύνατο να βρεθούν κανόνες γενικά εφαρμόσιμοι για την λύση του. Γι' αυτόν τον λόγο απαιτούνται απλοποιήσεις.

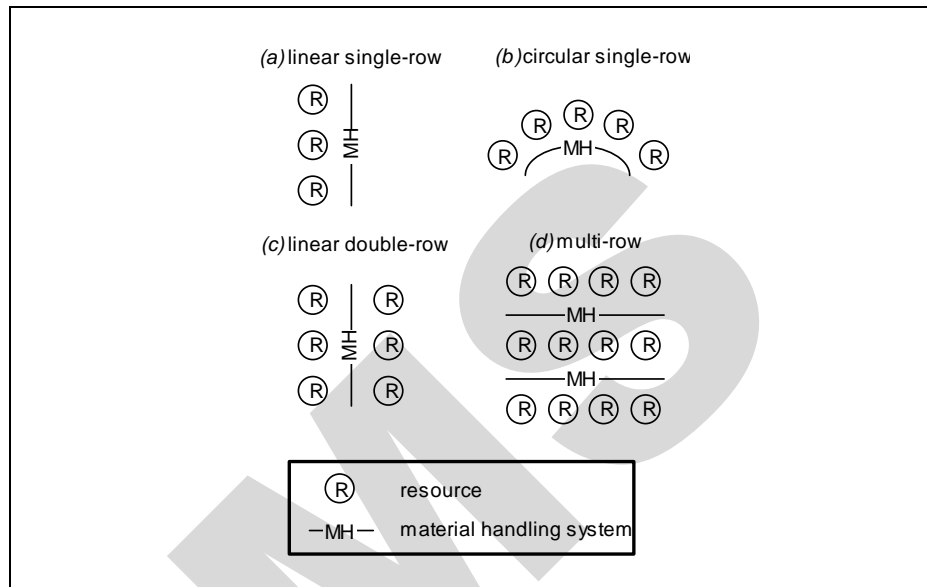
Μια προσέγγιση είναι να χωρισθούν οι *χωροταξικές τοποθετήσεις των πόρων* (διατάξεις) σε μερικές γενικές κατηγορίες. Έχουν προταθεί τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες είναι: γραμμική μονής σειράς, κυκλική μονής σειράς, γραμμική διπλής σειράς και πολλαπλής σειράς. Σ' αυτήν την προσέγγιση, οι διατάξεις πρόκειται να συνδυασθούν με μια από τις δύο κατηγορίες των συστημάτων διαχείρισης υλικών: Αυτόματα Καθοδηγούμενα Οχήματα (AGV's) ή ρομπότ (Σχ. 5.35). Επί πλέον, εξετάστηκαν μόνο μερικοί συγκεκριμένοι συνδυασμοί διατάξεων και συστημάτων διαχείρισης υλικών: γραμμική μονής σειράς/AGV, κυκλική μονής σειράς /ρομπότ, γραμμική διπλής σειράς/AGV, και πολλαπλής σειράς /AGV [43].

Απλοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα, ένα έμπειρο σύστημα μπορεί να εφαρμοσθεί με δυο τρόπους. Πρώτον, βασιζόμενο στους περιορισμούς του χώρου, το σύστημα έχει την δυνατότητα να επιλέξει έναν από τους τέσσερις συνδυασμούς *χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων/συστήματος διαχείρισης υλικού*. Το υπάρχον σύστημα προτείνει πάντα τους συνδυασμούς με την εξής σειρά: κυκλική μονής σειράς/ρομπότ, κυκλική μονής σειράς/AGV, γραμμικής διπλής σειράς/AGV, πολλαπλής σειράς/AGV, περνώντας στον επόμενο συνδυασμό (σύμφωνα με την σειρά) μόνο όταν ο τρέχων συνδυασμός δεν χωρά στον καθορισμένο χώρο του εργοστασίου.

Όταν το βήμα αυτό ολοκληρωθεί, χρησιμοποιούνται επιπλέον κανόνες από το έμπειρο σύστημα για την επιλογή ενός από τα πολλά αναλυτικά μοντέλα (παρόμοια με την Εξ. 5-21, το μοντέλο *QAP*), και έναν αλγόριθμο επίλυσης για το μοντέλο. Η επιλογή του μοντέλου βασίζεται στην δομή της επιλεγμένης *χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων* και στον αριθμό και το μέγεθος των πόρων. Η λειτουργία του επιλεγμένου αναλυτικού μοντέλου είναι να τοποθετεί τους μεμονωμένους πόρους εντός του επιλεγμένου γενικού σχεδιασμού, έτσι ώστε το κόστος της διαχείρισης των υλικών να ελαχιστοποιείται.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το έμπειρο σύστημα από μόνο του δεν δημιουργεί καμία νέα σχεδιαστική γνώση και δεν μπορεί να περιγράψει σχέ-

δια, τα οποία αυτός που του έθεσε τους κανόνες δεν γνωρίζει πως να σχεδιάσει. Συγκεκριμένα μπορεί μόνο να σχεδιάσει μια από τις τέσσερις χωροταξικές τοποθετήσεις πόρων του Σχήματος 5.35. Ο ρόλος του έμπειρου συστήματος είναι να εφαρμόσει την διαίσθηση και την γνώση ενός έμπειρου ανθρώπου, όπως εκφράστηκε με την βοήθεια μιας ομάδας κανόνων, με σκοπό να περιγράψει την βασική δομή της χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων. Στην συνέχεια, ακολουθώντας και πάλι την κρίση του ειδικού, υποδεικνύεται ένα αναλυτικό μοντέλο για την βελτιστοποίηση της επιλεγμένης χωροταξικής τοποθέτησης των πόρων.



Linear single-row = Γραμμικό μονής σειράς
Circular single-row = Κυκλικό μονής σειράς

Linear double-row = Γραμμικό διπλής σειράς
multi-row = Πολλαπλών σειρών

Σχήμα 5.35 multi-row = Πολλαπλών σειρών

5.3.3 Το πρόβλημα της ροής των υλικών

Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος διαχείρισης υλικών πρέπει να προσδιορισθούν ορισμένες μεταβλητές απόφασης σχετικές με την ροή των υλικών. Αυτές οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να διαχωρισθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: σε αυτές που καθορίζουν τον *τύπο* του συστήματος διαχείρισης υλικών και σε αυτές που καθορίζουν την *διάταξη* ενός δοσμένου τύπου συστήματος διαχείρισης υλικών.

Οι μεταβλητές απόφασης της διάταξης εξαρτώνται από τον τύπο του συστήματος διαχείρισης υλικών. Για ένα σύστημα διαχείρισης υλικών, το οποίο βασίζεται σε μεταφορικές ταινίες, οι μεταβλητές αυτές μπορούν να είναι η θέ-

ση των ταινιών στον χώρο του εργοστασίου, οι κατευθύνσεις λειτουργίας και οι ταχύτητες.

Για ένα σύστημα διαχείρισης των υλικών, βασισμένο σε αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα (AGVs), εφαρμόζεται ένα διαφορετικό σύνολο από μεταβλητές απόφασης. Τα αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα χρησιμοποιούνται για την μεταφορά φορτίων από την μια περιοχή του εργοστασίου σε μια άλλη, χρησιμοποιούν ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία και ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα (AGVs) χρησιμοποιούνται συχνά σε ευέλικτα συστήματα παραγωγής. Οι μεταβλητές απόφασης της διάταξης, που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά τον σχεδιασμό και την λειτουργία ενός συστήματος διαχείρισης υλικών το οποίο είναι βασισμένο σε αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα (AGVs), είναι οι εξής [44]:

- Η διάταξη των διαδρόμων μεταφοράς
- Ο αριθμός και οι θέσεις των σταθμών συλλογής και παράδοσης
- Ο τύπος της ροής του υλικού μέσα στους διάδρομους μεταφοράς (απλής κατεύθυνσης, διπλής ή συνδυασμοί αυτών)
- Ο αριθμός των απαιτούμενων οχημάτων
- Οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται από τα οχήματα κατά την διάρκεια συγκεκριμένων λειτουργιών
- Η λογική της διαπεραιώσης που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια της λειτουργίας
- Οι χωρητικότητες αποθήκευσης των σταθμών συλλογής και παράδοσης

Για τον καθορισμό του πρότυπου της ροής του υλικού σε ένα σύστημα διαχείρισης υλικών, βασισμένο σε αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα, εφαρμόστηκε η μέθοδος του μαθηματικού προγραμματισμού [45]. Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι να βρεθεί η διαδρομή, η οποία ελαχιστοποιεί την συνολική μετακίνηση των αυτόματα καθοδηγούμενων οχημάτων όταν αυτά είναι φορτωμένα. Οι απαιτούμενες εισοδοί είναι: η χωροταξική τοποθέτηση των τμημάτων του συστήματος παραγωγής, οι διάδρομοι στους οποίους μπορεί να γίνει μεταφορά με αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα, οι θέσεις των σταθμών συλλογής (P) και παράδοσης (D) του κάθε τμήματος, και οι εντάσεις ροής υλικού μεταξύ των τμημάτων. Η λύση αυτού του προγράμματος θα δώσει ως αποτέλεσμα ποιοι διάδρομοι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά με αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα (AGVs) και την κατεύθυνση της μεταφοράς σε κάθε έναν από τους διαδρόμους. Έχει γίνει η υπόθεση ότι επιτρέπεται η μεταφορά μόνο προς μια κατεύθυνση σε κάθε διάδρομο.

Η διατύπωση του μαθηματικού προγράμματος βασίζεται στην παρουσίαση των πληροφοριών εισόδου με την μορφή ενός γραφήματος. Το γράφημα αποτελείται από κόμβους, οι οποίοι απεικονίζουν τους σταθμούς συλλογής και πα-

ράδοσης, τις διασταυρώσεις, τις γωνίες των διαδρόμων, και από τόξα που συνδέουν τους κόμβους και απεικονίζουν τις πιθανές κατευθύνσεις μεταφοράς κατά μήκος των διαδρόμων. Κάθε διάδρομος συνοδεύεται από δύο τόξα, ένα για κάθε πιθανή κατεύθυνση μεταφοράς. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας αριθμός. Ένα τόξο από τον κόμβο i στον κόμβο j προσδιορίζεται από μια ακέραια μεταβλητή X_{ij} . Εάν το X_{ij} ισούται με 1, τότε το τελικό πρότυπο της ροής των υλικών θα περιλαμβάνει μεταφορά με αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα από την θέση που εκπροσωπείται από τον κόμβο i στην θέση που εκπροσωπείται από τον κόμβο j . Εάν το X_{ij} ισούται με 0, τότε καμία ροή υλικών από τον κόμβο i στον κόμβο j δε θα περιλαμβάνεται στην τελική λύση.

Τα παραπάνω φαίνονται με την βοήθεια ενός απλού παραδείγματος [45] με δυο τμήματα (Σχ. 5.36). Τα τμήματα και η διάταξη των διαδρόμων φαίνεται στο Σχήμα 5.36(a). Οι αριθμοί αντιπροσωπεύουν αποστάσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων, (οι οποίοι είναι σταθμοί P/D, διασταυρώσεις, ή γωνίες διαδρόμων). Το P είναι σταθμός συλλογής και το D σταθμός παράδοσης. Η ένταση της ροής υλικού μεταξύ των δύο σταθμών (από το τμήμα 1 στο τμήμα 2) είναι 100. Αυτή η διάταξη μετατρέπεται στο γράφημα του Σχήματος 5.36(b). Η διαγραφή των τόξων αυτού του γραφήματος οδηγεί στο τελικό πρότυπο ροής των υλικών (Σχ. 5.36(c)).

Αντικειμενικός σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταφοράς των αυτόματα καθοδηγούμενων οχημάτων όταν αυτά είναι φορτωμένα. Για να συμπεριληφθεί αυτό σε μια αλγεβρική αντικειμενική συνάρτηση υπενθυμίζουμε ότι ένα αυτόματα καθοδηγούμενο όχημα (AGV) πρέπει να φύγει από το σημείο συλλογής P μέσω του τόξου x_{32} ή x_{36} . Επίσης, το όχημα (AGV) πρέπει να φθάσει στον σταθμό παράδοσης D μέσω του τόξου x_{45} ή x_{65} . Επειδή η μεταφορά, κατά μήκος του κάθε διαδρόμου, γίνεται μόνο προς την μια κατεύθυνση, υπάρχουν τέσσερις πιθανότητες: Μεταφορά προς 1) x_{32} και x_{45} , 2) x_{32} και x_{65} , 3) x_{36} και x_{45} , 4) x_{36} και x_{65} . Για την πρώτη πιθανότητα το συντομότερο μονοπάτι μεταφοράς θα είναι το 3-1-2-4-5, με ολική απόσταση $4+7+10+3 = 24$ (Σχ. 5.36(a)). Επίσης για τις υπόλοιπες εναλλακτικές λύσεις η απόσταση μεταφοράς υπολογίζεται ότι είναι 52, 36, και 10 αντίστοιχα.

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί λοιπόν να γραφεί ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση } 100[24x_{32}x_{45}+52x_{32}x_{65}+36x_{36}x_{45}+10x_{36}x_{65}]$$

Αφού σε μια αποδεκτή λύση, μόνο ένα από τα τέσσερα γινόμενα $x_{32}x_{45}$, $x_{36}x_{45}$, $x_{36}x_{65}$ και $x_{32}x_{65}$ μπορεί να πάρει την τιμή 1, ενώ όλα τα άλλα πρέπει να πάρουν την τιμή 0, η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται, όταν επιλέγεται το συντομότερο μονοπάτι 3-6-5 (κάνοντας το $x_{36}x_{45}$ ίσο με 1 και την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης 1,000).

Προκειμένου να εξασφαλισθεί μια αποδεκτή λύση θα πρέπει να ικανοποιείται ένα σύνολο από περιορισμούς. Η μεταφορά πρέπει να γίνεται προς μια μόνο κατεύθυνση, γεγονός το οποίο σημαίνει, ότι μόνο ένα από τα δύο τόξα που συνδέουν τους δύο κόμβους μπορεί να βρίσκεται στην τελική λύση. Επομένως,

$$\begin{aligned} x_{14} + x_{41} &= 1 \\ x_{47} + x_{74} &= 1 \\ x_{78} + x_{87} &= 1 \\ &\vdots \end{aligned}$$

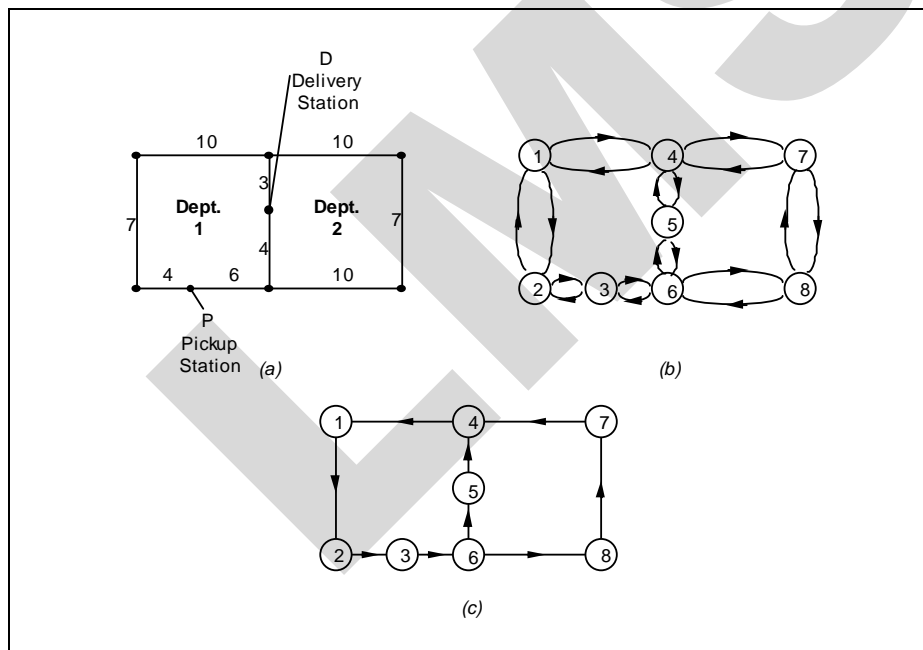
Επίσης θα πρέπει να υπάρχει πρόσβαση σε κάθε κόμβο, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα τόξο εισόδου για κάθε κόμβο. Για τον κόμβο 4 αυτός ο περιορισμός μεταφράζεται ως:

$$x_{41} + x_{45} + x_{47} \geq 1$$

Κάθε κόμβος, ο οποίος παραβιάζει αυτόν τον περιορισμό, ονομάζεται πηγαίος κόμβος (source node). Ακόμη, θα πρέπει να είναι δυνατή η αποχώρηση από κάθε κόμβο. Αυτό μεταφράζεται ως εξής:

$$x_{14} + x_{54} + x_{74} \geq 1$$

Κάθε κόμβος ο οποίος παραβιάζει τον παραπάνω περιορισμό ονομάζεται κόμβος βύθισης (sink node). Οι περιορισμοί αυτοί εφαρμόζονται και στους άλλους κόμβους.



Delivery = Παράδοση
Pickup = Παραλαβή

Station = Σταθμός
Dept. (Department) = Τμήμα

Σχήμα 5.36 Τα Βήματα για τον Καθορισμό του Προτύπου Ροής Υλικού σε Συστήματα Βασισμένα σε AGV

Τελικά, πηγαίοι περιορισμοί και περιορισμοί βύθισης θα πρέπει να παρατηρούνται επίσης για ομάδες κόμβων. Θεωρούμε την ομάδα των κόμβων $\{1,2,3,4,5,6\}$. Ο περιορισμός

$$x_{74} + x_{86} \geq 1$$

εμποδίζει αυτήν την ομάδα να γίνει πηγαία, ενώ ο περιορισμός

$$x_{47} + x_{68} \geq 1$$

Την εμποδίζει να γίνει ομάδα βύθισης.

Η αντικειμενική συνάρτηση σε συνδυασμό με τον περιορισμό μονής κατεύθυνσης και όλους τους περιορισμούς πηγής και βύθισης αποτελούν την διατύπωση του παραπάνω παραδείγματος, με την μορφή μαθηματικού προγράμματος. Η διατύπωση αυτή αποτελεί ένα μη γραμμικό ακέραιο πρόγραμμα. Η λύση του προγράμματος δίδει (Σχ. 5.36(γ)):

$$x_{12} = 1 \quad x_{41} = 1 \quad x_{23} = 1$$

$$x_{68} = 1 \quad x_{36} = 1 \quad x_{87} = 1$$

$$x_{65} = 1 \quad x_{74} = 1 \quad x_{54} = 1$$

όλες οι άλλες μεταβλητές = 0.

Η παραπάνω προσέγγιση έχει επεκταθεί για να μπορεί να τοποθετεί βέλτιστα τους σταθμούς P/D. Η επεκταμένη προσέγγιση [46] αποτελείται από δύο φάσεις. Η φάση 1 είναι η αρχική προσέγγιση. Στην φάση 2, οι θέσεις των σταθμών P/D αλλάζουν μέσω ενός εμπειρικού αλγόριθμου, έτσι ώστε να μειωθεί η συνολική εκτιμώμενη απόσταση μεταφοράς των οχημάτων (AGVs). Επειδή αυτή η επανατοποθέτηση των σταθμών μπορεί να καταστρέψει το βέλτιστο των διευθύνσεων ροής που προέκυψαν από την φάση 1, οι δύο φάσεις πρέπει να εκτελεστούν επαναληπτικά έως ότου η φάση 2 να μην αλλάξει τελικά το βέλτιστο της φάσης 1. Σε μια προέκταση της προσέγγισης αυτής, συμπεριλαμβάνεται στην αντικειμενική συνάρτηση και η διαδρομή που κάνουν τα αυτόματα οδηγούμενα οχήματα (AGV), όταν δεν είναι φορτωμένα [47].

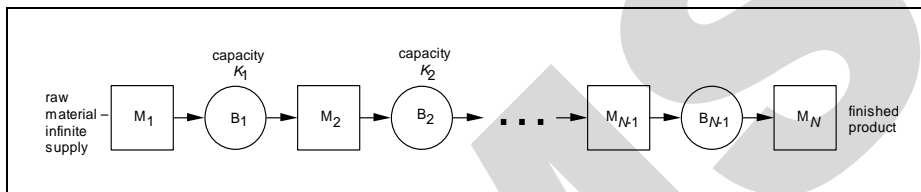
5.3.4 Το πρόβλημα χωρητικότητας των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων (Buffer Capacity Problem)

Σε ένα σύστημα παραγωγής μεταξύ των διαφόρων φάσεων μπορεί να υπάρχουν ενδιάμεσοι αποθηκευτικοί χώροι για την αποθήκευση κομματιών. Οι αποθηκευτικοί αυτοί χώροι βοηθούν στην αποσύζευξη των διαφόρων σταδίων επεξεργασίας του συστήματος. Παρέχοντας ενδιάμεσους αποθηκευτικούς χώ-

ρους μεταξύ των μηχανών, οι πιθανότητες για σταμάτημα της παραγωγής εξαιτίας μιας μηχανής, ή έλλειψης κομματιών προς επεξεργασία μιας άλλης μειώνονται. Αυτό τελικά οδηγεί σε μια αύξηση του ρυθμού παραγωγής. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι ταυτόχρονα αυξάνεται το κόστος λόγω των αυξημένων αποθεμάτων.

Η απόφαση για το σημείο, στο οποίο θα τοποθετηθεί ένας ενδιάμεσος αποθηκευτικός χώρος καθώς και το μέγεθος που θα έχει, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα επειδή γενικά, δεν είναι δυνατό να καταλήξουμε σε μια αναλυτική σχέση μεταξύ των απαιτήσεων απόδοσης και της σωστής επιλογής μεγέθους και θέσης των αποθηκευτικών χώρων. Επίσης, η υπάρχουσα διάταξη του εργοστασίου και το κατά πόσο υπάρχουν διαθέσιμοι χώροι είναι παράγοντες που δρουν επίσης περιοριστικά στην σωστή επιλογή μεγέθους και θέσης των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της τοποθέτησης αποθηκευτικών χώρων χωρητικότητας Z κομματιών σε $N - 1$ πιθανές θέσεις σε μια αυτόματη γραμμή παραγωγής (automatic transfer line) με N μηχανές (Σχ. 5.37), χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού [48].



Capacity = Χωρητικότητα
Raw material = Ακατέργαστο υλικό

Infinite supply = Απεριόριστη τροφοδοσία
Finished product = Τελειωμένο προϊόν

Σχήμα 5.37 Μελέτη Συστήματος Transfer Line με Δυναμικό Προγραμματισμό

Στην διατύπωση του δυναμικού προγραμματισμού, η συνολική χωρητικότητα πρέπει να είναι ακριβώς Z και η χωρητικότητα του κάθε αποθηκευτικού χώρου K_n δεν πρέπει να ξεπερνά ένα δεδομένο περιορισμό τοπικής χωρητικότητας C_n . Σκοπός μας είναι να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός παραγωγής $f(\mathbf{K}_{N-1})$, όπου το \mathbf{K}_{N-1} είναι το διάνυσμα των $N-1$ ανεξάρτητων χωρητικοτήτων των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων. Εάν η συνολική χωρητικότητα Z ξεπεράσει το άθροισμα των επιμέρους $C_1 + C_2 + \dots + C_{N-1}$, η συνηθισμένη λύση είναι να γίνει κάθε $K_n = C_n$. Με αυτήν την περίπτωση δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω.

Το ανωτέρω πρόβλημα πήρε την μορφή του ακόλουθου προβλήματος δυναμικού προγραμματισμού:

Μεγιστοποίηση της: $f(\mathbf{K}_{N-1})$

Υπό τους όρους:

$$\sum_{n=1}^{N-1} K_n = Z$$

$$0 \leq K_n \leq C_n \quad (5-22)$$

Στην προσέγγιση του δυναμικού προγραμματισμού, το πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών, το οποίο περιελάμβανε $N-1$ ανεξάρτητες χωρητικότητες των αποθηκευτικών χώρων K_1, \dots, K_{N-1} , χωρίστηκε σε $N-1$ προβλήματα βελτιστοποίησης μιας μεταβλητής, που αφορά το κάθε K ξεχωριστά. Αυτά τα προβλήματα λύνονται σε $N-1$ συνεχόμενες φάσεις. Οι αποφάσεις σε κάθε φάση n , $1 \leq n \leq N-1$, απαιτούν τον υπολογισμό του ρυθμού παραγωγής του τμήματος της γραμμής παραγωγής (transfer line) που αποτελείται από τα $M_1-B_1-\dots-B_n-M_{n+1}$. Επιπλέον, ο ρυθμός παραγωγής που υπολογίστηκε στην φάση n , πρέπει να εκφρασθεί με την βοήθεια των παραμέτρων που υπολογίστηκαν στην φάση $n-1$. Αυτή η επαναλαμβανόμενη ποιότητα είναι μια προϋπόθεση των αντικειμενικών συναρτήσεων του δυναμικού προγραμματισμού. Ο ρυθμός παραγωγής μπορεί να υπολογισθεί επαναληπτικά με την βοήθεια μιας προσέγγισης στην οποία το σύστημα αναλύεται σε $N-1$ γραμμές παραγωγής δυο φάσεων (M_1, B_1, M_2) , (RM_1, B_2, M_3) , ..., (RM_{N-2}, B_{N-1}, M_N) , όπου το RM_i είναι μια ισοδύναμη μηχανή η οποία αντικαθιστά το (RM_{i-1}, B_i, M_{i+1}) . Ο ρυθμός παραγωγής του κάθε transfer line δύο φάσεων υπολογίζεται αναλυτικά, υποθέτοντας για ευκολία ότι δεν υπάρχει μπλοκάρισμα στην δεύτερη φάση. Η απαραίτητη επαναληψιμότητα επιτυγχάνεται προσδιορίζοντας τα χαρακτηριστικά βλαβών της μηχανής RM_i σε σχέση με τα χαρακτηριστικά βλαβών της RM_{i-1} , την χωρητικότητα του αποθηκευτικού χώρου B_i , και τα χαρακτηριστικά βλαβών της M_{i+1} .

Η κύρια απαίτηση αυτής της διατύπωσης είναι η επαναλαμβανόμενη ποιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο στόχος σχετικά με τον ρυθμό παραγωγής μπορεί να προσαρμοσθεί ανάλογα ώστε να ικανοποιεί αυτή την συνθήκη, αλλά η γενίκευση αυτής της προσέγγισης και για άλλους τύπους δεικτών απόδοσης είναι δύσκολη. Για παράδειγμα το κόστος που σχετίζεται με τους παρεχόμενους ενδιάμεσους χώρους αποθήκευσης καθορίζεται μόνο από τον συνολικό αποθηκευτικό χώρο που δεσμεύθηκε και όχι από τα πραγματικά επίπεδα αποθεμάτων στον χώρο αποθήκευσης, όπως μπορεί να δει κανείς και από την Εξίσωση (5-22). Επιπρόσθετα, η προσέγγιση που έγινε για τον υπολογισμό του ρυθμού παραγωγής αναλύοντας την γραμμή παραγωγής, μπορεί να εφαρμοσθεί κυρίως για συστήματα παραγωγής με σειριακή ροή υλικού.

5.3.5 Πολύπλοκα προβλήματα σχεδιασμού

Οι περισσότερες από τις προσεγγίσεις σχεδιασμού που έχουν αναφερθεί ως τώρα έχουν εφαρμοσθεί μόνο στην ακαδημαϊκή έρευνα. Ο σχεδιασμός πραγματικών συστημάτων παραγωγής γίνεται από έμπειρους ανθρώπους, οι οποίοι συνθέτουν τα συστήματα παραγωγής, βασιζόμενοι στην προσωπική τους εκτίμηση και στην πείρα τους. Στην καλύτερη των περιπτώσεων τα σχέδια πριν εφαρμοσθούν έχουν απλά επαληθευθεί με την βοήθεια προσομοίωσης. Η δημιουργία του αρχικού σχεδίου ή η τροποποίηση του ήδη υπάρχοντος, ακόμη

και αν τα αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης αποβούν δυσμενή, δεν παύει να είναι μια μη δομημένη διαδικασία.

Τα άμεσα εμπόδια στην προσπάθεια να γίνει περισσότερο επιστημονική η διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων παραγωγής, είναι οι περιορισμοί που προέρχονται από την δυσκολία διατύπωσης του προβλήματος με βάση την επιστήμη της μηχανολογίας. Οποιαδήποτε επιμέρους προσέγγιση του προβλήματος σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής, όπως η προσέγγιση μόνο του προβλήματος των απαιτούμενων πόρων ή της χωρητικότητας των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων, χάνει την επαφή με το συνολικό πρόβλημα του σχεδιασμού. Έτσι το γεγονός ότι η χωρητικότητα των αποθηκευτικών χώρων επηρεάζει τον αριθμό των απαιτούμενων πόρων και αντίστροφα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την λύση του συνολικού προβλήματος, πράγμα που δεν λαμβάνεται όμως υπ' όψη από τις επιμέρους προσεγγίσεις του προβλήματος.

Κάτω από αυτό το πρίσμα, οι μηχανολογικές επιστημονικές προσεγγίσεις, οι οποίες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής ως ένα διάνυσμα από μεταβλητές απόφασης, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις αυτές είναι δυνατόν να διατυπώσουμε ένα πρόβλημα στο οποίο κάποιες από τις μεταβλητές απόφασης που πρέπει να προσδιορισθούν είναι οι χωρητικότητες των αποθηκευτικών χώρων, οι απαιτούμενοι πόροι, παράμετροι διαχείρισης υλικών κ.λ.π. Στην βιβλιογραφία οι προσεγγίσεις αυτές αναφέρονται συχνά σαν προσεγγίσεις *παραμετρικού σχεδιασμού*.

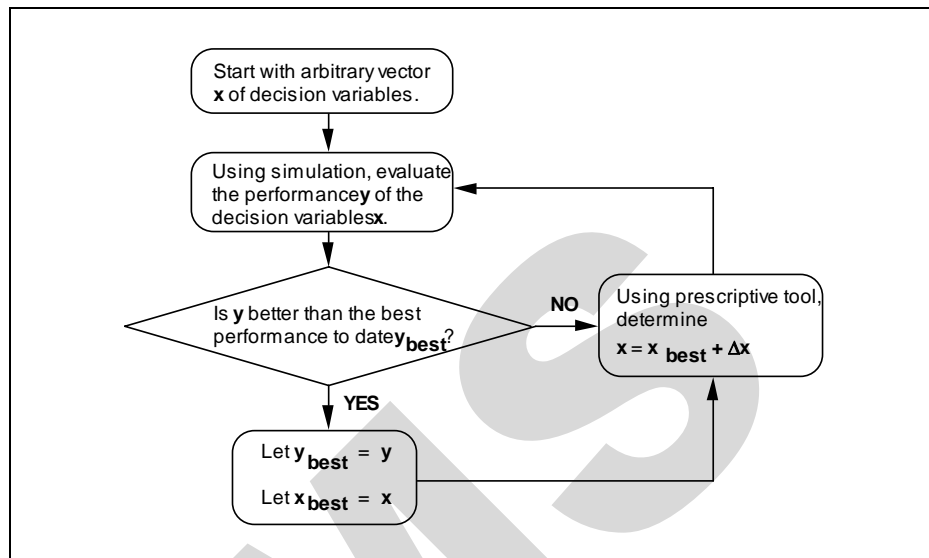
Σχεδιασμός Συστήματος Παραγωγής με την χρήση Προσομοίωσης και Αναζήτησης (Simulation Plus Search Approach to Manufacturing System Design)

Μια προσέγγιση παραμετρικού σχεδιασμού συμπληρώνει τις περιγραφικές ικανότητες της προσομοίωσης με τεχνικές, ικανές να παράγουν νέα σχέδια του συστήματος παραγωγής. Η τεχνικές αυτές έχει συνήθως την μορφή ενός αλγόριθμου αναζήτησης. Η προσέγγιση αυτή θεωρεί τον σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής σαν ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο πρέπει να βελτιστοποιηθεί ένας δείκτης απόδοσης, που εξαρτάται από τις τιμές των μεταβλητών απόφασης.

Η προσέγγιση αρχίζει με ένα αρχικό διάνυσμα μεταβλητών απόφασης που αντιπροσωπεύει τον σχεδιασμό του συστήματος. Οι δείκτες απόδοσης του σχεδιασμού αυτού αξιολογούνται με την βοήθεια της προσομοίωσης. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος αναζήτησης για να τροποποιήσει το υπάρχον σχέδιο. Εάν η απόδοση του τροποποιημένου σχεδίου είναι καλύτερη του υπάρχοντος τότε το τροποποιημένο σχέδιο αντικαθιστά το υπάρχον. Σε κάθε μια από τις δυο περιπτώσεις ο αλγόριθμος αναζήτησης χρησιμοποιείται για να τροποποιήσει εκ νέου τον υπάρχοντα σχεδιασμό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (Σχ. 5.38).

Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε στο πρόβλημα προσδιορισμού των χωρητικότητων των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων για ένα αυτόματο σύστη-

μα συναρμολόγησης (Automatic Assembly System (A.A.S)) που περιέχει N μηχανές και $N+1$ ενδιάμεσους αποθηκευτικούς χώρους [49]. Η ροή των υλικών στην κατηγορία των συστημάτων που έχουν ληφθεί υπόψη, περιέχει ένα βρόγχο κύριας συναρμολόγησης και ένα βρόγχο επιδιόρθωσης για την επισκευή των ατελώς συναρμολογούμενων κομματιών (Σχ. 5.39). Ένας προκαθορισμένος αριθμός από P παλέτες μεταφέρει κομμάτια μέσα στο σύστημα. Οι παλέτες κινούνται πάνω σε μεταφορικές αλυσίδες ή ιμάντες.



Start with arbitrary vector x of decision variables = Αρχή με αυθαίρετο άνυσμα x των μεταβλητών σχεδιασμού
Using simulation, evaluate the performance y of the decision variables x = Με την χρήση προσομοίωσης, αξιολόγηση της απόδοσης y των μεταβλητών απόφασης x

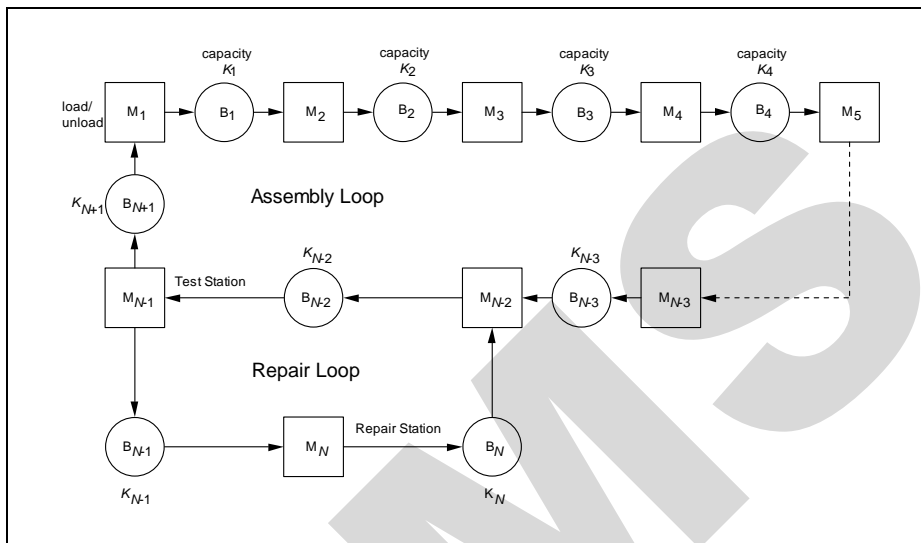
Is y better than the best performance to date y_{best} ? = Είναι η y καλύτερη από την έως τώρα απόδοση y_{best} ?
Using prescriptive tool, determine $(x = x_{best} + \Delta x)$ = Με την χρήση του εργαλείου υπολογισμού, προσδιορισμός του $(x = x_{best} + \Delta x)$

Σχήμα 5.38 Παραγωγή Νέων Σχεδιασμών μέσω της χρήσης προσομοίωσης και μεθόδων αναζήτησης

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός αυτόματου συστήματος συναρμολόγησης (A.A.S.) είναι: ο κύκλος παραγωγής (cycle time) των μηχανών, ο ρυθμός εμφάνισης εμπλοκών των κομματιών σε κάθε μηχανή, η κατανομή των χρόνων αποκατάστασης των εμπλοκών, οι χρόνοι μεταφοράς των παλετών, η πολιτική που ακολουθείται για την δειγματοληψία κατά τον έλεγχο των τελικών συναρμολογήσεων και τα μεγέθη των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων μεταξύ των μηχανών. Σ' αυτήν την εφαρμογή, από όλους τους παράγοντες μόνο το μέγεθος των αποθηκευτικών χώρων λήφθηκε υπ' όψη, ενώ οι υπόλοιποι θεωρήθηκαν δεδομένοι.

Το πρόβλημα εξετάζεται σαν ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών, στο οποίο τα μεγέθη των αποθηκευτικών χώρων, K_1 ,

... K_{N+1} , είναι οι μεταβλητές κατάστασης. Ο αντικειμενικός στόχος είναι να βρεθούν οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης που μεγιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση, που σε αυτήν την περίπτωση είναι ο ρυθμός παραγωγής του αυτόματου συστήματος συναρμολόγησης (A.A.S). Το μέγεθος του πεδίου των μεταβλητών κατάστασης ορίζεται από την θεώρηση ότι κάθε ενδιάμεσος αποθηκευτικός χώρος σε ένα πραγματικό σύστημα πρέπει να έχει χωρητικότητα που να βρίσκεται στο διάστημα $[1, P]$. Βασιζόμενοι σε εμπειρικά στοιχεία, οι χωρητικότητες των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων μπορούν να περιορισθούν περαιτέρω στην περιοχή $[1, P/3]$. Το μέγεθος του πεδίου των μεταβλητών κατάστασης που προκύπτει είναι $(P/3)^{N+1}$.

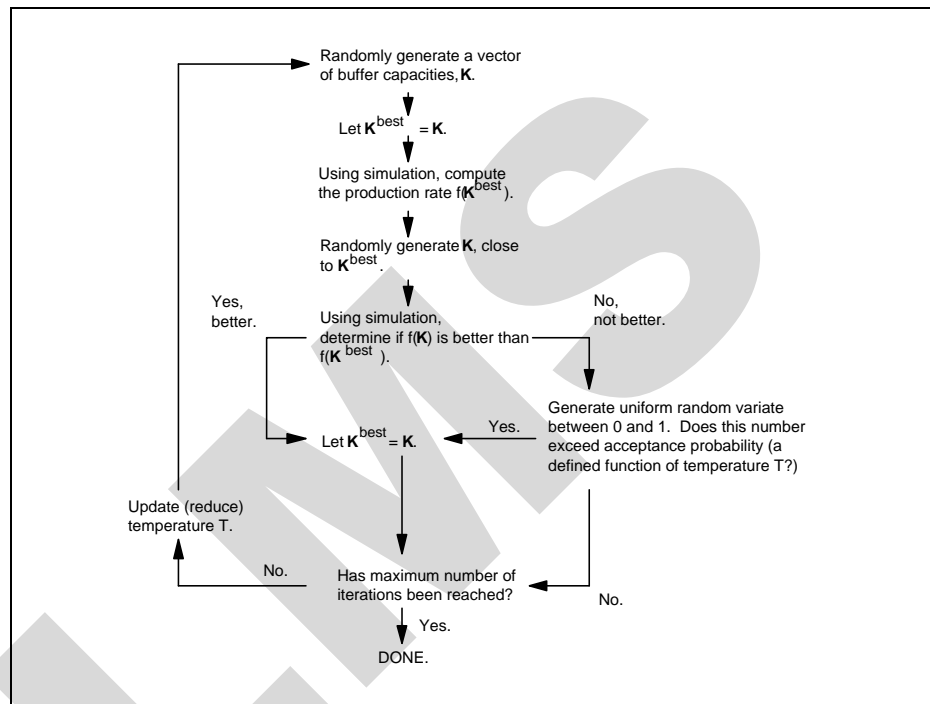


Assembly Loop = Βρόγχος συναρμολόγησης
 Repair Loop = Βρόγχος Επισκευής
 Load/Unload = Φόρτωση/Ξεφόρτωση
 Capacity = Χωρητικότητα
 Test Station = Σταθμός Δοκιμής
 Repair Station = Σταθμός Επισκευής

Σχήμα 5.39 Το Σύστημα Αυτόματης Συναρμολόγησης για την Προσομοίωση με Εφαρμογή μεθόδων Αναζήτησης

Το συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίστηκε πιο πάνω προσεγγίστηκε με την βοήθεια προσομοίωσης σε συνδυασμό με «προσομοιούμενη απόπτωση» (*simulated annealing*). Η προσομοιούμενη απόπτωση είναι μια μέθοδος αναζήτησης [50] η οποία έχει βασισθεί σε μια αναλογία της διαδικασίας απόπτωσης των στερεών, όπως αυτή περιγράφεται από τα μοντέλα της στατιστικής μηχανικής, και της διαδικασίας της συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Σε γενικές γραμμές όταν ένα στερεό περνά από την διαδικασία της απόπτωσης, (που είναι θέρμανση και βαθμιαία ψύξη), ένας πολύ μεγάλος αριθμός μορίων αρχίζει να παίρνει συγκεκριμένες θέσεις και να δημιουργεί ένα είδος κρυσταλλικού πλέγματος με πολύ μικρές εσωτερικές τάσεις στο στερεό. Σ' αυτήν την περίπτωση υπάρχει μια σχέση ανάμεσα στις θέσεις των μορίων και

τις εσωτερικές τάσεις ενός στερεού. Σε αντιστοιχία αυτής της σχέσης είναι και η σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές κατάστασης και την αντικειμενική συνάρτηση ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Έτσι τα μοντέλα της στατιστικής μηχανής που περιγράφουν την ανόπτηση στερεού είναι δυνατόν να παρέχουν μια "συνταγή" για την ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης με πολλές μεταβλητές κατάστασης. Στο συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης όπως και στο στερεό η απόδοση ανόπτησης καθορίζεται από την συνολική συμπεριφορά της παραμέτρου "θερμοκρασία" T στον χρόνο και την οποία ονομάζουμε "χρονοδιάγραμμα ψύξης". Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας για τον καθορισμό της χωρητικότητας των αποθηκευτικών χώρων συνοψίζεται στο Σχήμα 5.40.



Randomly generate a vector of buffer capacities, K = Δημιουργία, με τυχαίο τρόπο, ανύσματος των χωρητικότητας των ενδιάμεσων χώρων αποθήκευσης
 Using simulation, compute the production rate $f(K^{best})$ = Με την χρήση προσομοίωσης υπολογισμός του ρυθμού παραγωγής $f(K^{best})$
 Randomly generate K , close to K^{best} = Δημιουργία με τυχαίο τρόπο του K , κοντά στην τιμή του K^{best}
 Using simulation, determine if $f(K)$ is better than $f(K^{best})$ = Με την χρήση προσομοίωσης προσδιορίσε αν η $f(K)$ είναι καλύτερη από την $f(K^{best})$
 Update (reduce) temperature T = Ενημέρωση

(μείωση) θερμοκρασίας T
 Has maximum number of iterations been reached? = Έχει επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων;
 Generate uniform random variate between 0 and 1. Does this number exceed acceptance probability (a defined function of temperature T)? = Δημιουργία ομοιόμορφων τυχαίων τιμών μεταξύ του 0 και του 1. Αυτός ο αριθμός ξεπερνά την αποδεκτή πιθανότητα; (μια ορισμένη συνάρτηση της θερμοκρασίας T)

Σχήμα 5.40 Καθορισμός Χωρητικότητας Ενδιάμεσων Αποθηκευτικών Χώρων με την Μέθοδο Simulated Annealing

Εφ' όσον η προσομοίωση χειρίζεται, συνήθως, πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των δεικτών απόδοσης (ρυθμός παραγωγής) και των μεταβλητών απόφασης, η προσέγγιση αυτή απαιτεί μικρό αριθμό περιοριστικών υποθέσεων για την φύση των δεικτών απόδοσης και των μεταβλητών απόφασης του συστήματος που πρόκειται να σχεδιασθεί. Αν και στην συγκεκριμένη εφαρμογή βελτιστοποιούνται μόνο οι χωρητικότητες των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων, στο μοντέλο της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν πολύπλοκες μεταβλητές απόφασης όπως η πολιτική ποιοτικού ελέγχου και ως εκ τούτου οι λύσεις, που προκύπτουν, είναι εφαρμόσιμες για τις συγκεκριμένες πολιτικές ποιοτικού ελέγχου, που έχουν υποτεθεί.

Ένας πιθανός περιορισμός στην προσέγγιση της προσομοιούμενης απόδοσης, είναι το γεγονός, ότι ο απαιτούμενος αριθμός των προσομοιώσεων μπορεί να είναι μεγάλος (της τάξεως των μερικών χιλιάδων). Συνεπώς, το υπολογιστικό φορτίο της διαδικασίας μπορεί να γίνει απαγορευτικό για πραγματικές εφαρμογές.

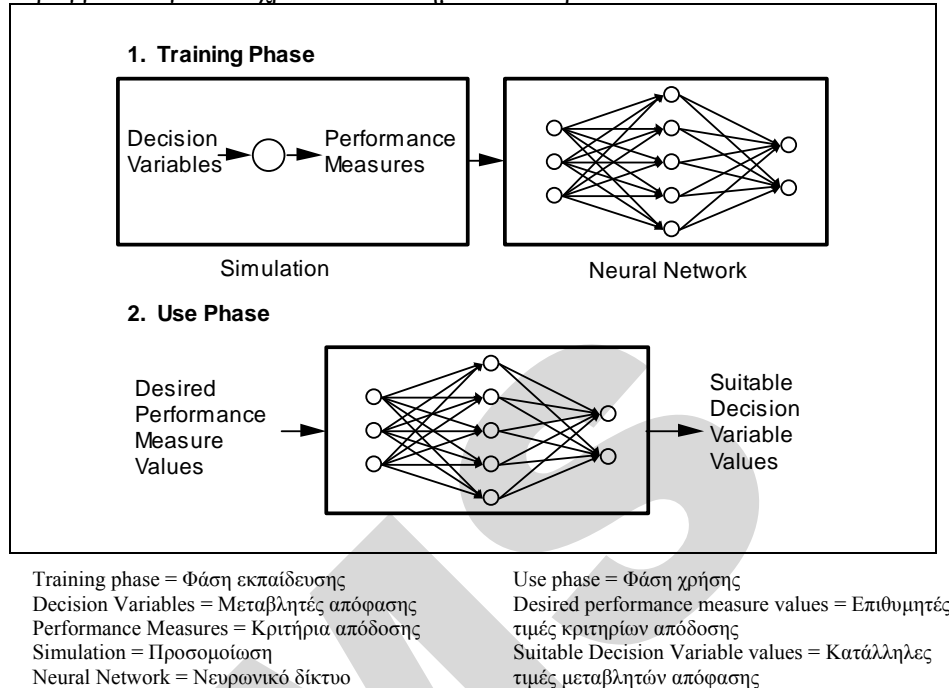
Σχεδιασμός Συστημάτων παραγωγής με την χρήση Νευρωνικών Δικτύων (Neural Network Approach to Manufacturing System Design)

Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής υπό την έννοια μιας εφαρμογής γενίκευσης, η οποία απαιτεί μια φάση εκπαίδευσης και μια φάση χρήσης. Κατά φάση εκπαίδευσης, δημιουργούνται προσομοιώσεις, προκειμένου να δώσουν δείγματα συσχετισμού ανάμεσα στις μεταβλητές απόφασης και τις τιμές των δεικτών απόδοσης. Το νευρωνικό δίκτυο «εκπαιδεύεται» με την χρήση αυτών των συσχετίσεων, οι οποίες εκφράζονται με την μορφή εκπαιδευτικών ζευγών $\{I_1-O_1, I_2-O_2, \dots, I_n-O_n\}$, όπως στο Σχήμα 5.27. Το I_k είναι ένα διάνυσμα που περιέχει τις τιμές των δεικτών απόδοσης, ενώ το O_k είναι το αντίστοιχο διάνυσμα που περιέχει τις τιμές των μεταβλητών απόφασης. Κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης το νευρωνικό δίκτυο γενικεύει την σχέση ανάμεσα στα I_k και τα O_k .

Στην φάση της χρήσης υποθέτουμε ότι για μια χρονική περίοδο κατά την λειτουργία του συστήματος παραγωγής, υπάρχει ένας γενικός στόχος, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί με την βοήθεια ορισμένων δεικτών απόδοσης. Για παράδειγμα σαν δείκτες απόδοσης θα μπορούσαν να είναι τα εξής: "μέσο κόστος ανά κομμάτι 35 δολάρια και μέσος χρόνος καθυστέρησης 20 λεπτά". Αυτοί οι επιθυμητοί δείκτες απόδοσης (έστω I_{n+1}) δίδονται σαν είσοδοι στο εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο το οποίο έπειτα θα δώσει σαν έξοδο τις τιμές των μεταβλητών απόφασης (O_{n+1}), που είναι πιο κοντά στην πραγματοποίηση της επιθυμητής απόδοσης. Η όλη διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 5.41.

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοσθεί για τον καθορισμό του αριθμού των πόρων (μηχανών) σε κάθε ένα από τα N κέντρα εργασίας ενός job shop [51]. Χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικά σε ένα job shop με $N = 3$ κέντρα εργασίας. Έτσι, κάθε εφικτή διάταξη του job shop μπορεί να περιγραφεί από τρεις ακεραίους αριθμούς, οι οποίοι καθορίζουν τον αριθμό των πόρων σε κάθε κέντρο εργασίας. Όλοι οι πόροι σε ένα κέντρο εργασίας θεωρήθηκαν ίδιοι μεταξύ

τους. Το σύνολο των εργασιών (jobs) του job shop αποτελείται από πέντε διαφορετικούς τύπους εργασιών, ο καθένας από τους οποίους αποτελείται από μια έως τρεις υπεργασίες. Κάθε υπεργασία μπορεί να υλοποιηθεί από οποιονδήποτε πόρο του αντίστοιχου κέντρου εργασίας. Λήφθηκαν υπόψη οι αφίξεις παραγγελιών για ένα χρονικό διάστημα οκτώ ωρών.



Σχήμα 5.41 Η Εφαρμογή των Νευρωνικών Δικτύων στον Σχεδιασμό Συστημάτων παραγωγής

Κατά την φάση εκπαίδευσης θεωρήθηκαν σαν είσοδοι σε έναν προσομοιωτή μια συγκεκριμένη διάταξη του job shop, ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα εργασίας και μια πολιτική λειτουργίας για την ανάθεση των εργασιών στους πόρους του κέντρου εργασίας. Η έξοδος του προσομοιωτή ήταν ένα σύνολο από τέσσερα κριτήρια επίδοσης. Αυτοί είναι: ο μέσος χρόνος καθυστέρησης (mean tardiness), ο μέσος χρόνος παραμονής μιας εργασίας στο σύστημα παραγωγής (mean flow time), η μέση εκμετάλλευση (mean utilization, το ποσοστό επί τοις εκατό (%) του χρόνου, κατά μέσο όρο, που μια μηχανή πραγματικά απασχολείται με κάποια συγκεκριμένη υπεργασία) και ο χρόνος ολοκλήρωσης της τελευταίας εργασίας (time of completion).

Η προσομοίωση εκτελέστηκε πέντε φορές, κάθε φορά και για μια διαφορετική διάταξη του job shop. Τα αποτελέσματα της φάσης εκπαίδευσης ήταν πέντε ζεύγη εισόδου-εξόδου $\{I_1 - O_1, I_2 - O_2, \dots, I_5 - O_5\}$, για τα οποία κάθε είσοδος I_k είναι ένα σύνολο τιμών για καθένα από τους τέσσερις δείκτες απόδοσης. Κάθε έξοδος O_k είναι η αντίστοιχη διάταξη του job shop (Πιν 5.6). Αυτές οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν για να εκπαιδεύσουν ένα νευρωνικό δίκτυο

τύπου 4-15-3 (αυτή η ορολογία εξηγείται στο σχήμα 5.28). Αυτή η δομή του δικτύου θεωρήθηκε η πιο κατάλληλη, διότι ο αριθμός των κόμβων εισόδου (4) ισούται με τον αριθμό των δεικτών απόδοσης, ενώ ο αριθμός των κόμβων εξόδου (3) ισούται με τον αριθμό των κέντρων εργασίας στον πειραματικό job shop. Στην φάση χρήσης, δόθηκαν σαν εισοδοί, στο εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, πέντε ομάδες επιθυμητών δεικτών απόδοσης. Για κάθε μια από τις ομάδες, το δίκτυο έδινε σαν έξοδο και μια διαφορετική διάταξη του job shop. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώθηκε η φάση χρήσης.

k	Εισοδοί εκπαίδευσης (I): Δείκτες απόδοσης				Στόχοι εξόδων (O): Διάταξη Job Shop		
	Μέσος χρόνος καθυστέρησης (min)	Μέσος χρόνος παραμονής μιας εργασίας στο σύστημα (min)	Μέση εκμετάλλευση (%)	Χρόνος ολοκλήρωσης τελευταίας εργασίας (min)	# Πόρων WC-1	# Πόρων WC-2	# Πόρων WC-3
1	30,25	116,05	77,98	642,00	2	3	3
2	135,25	226,60	89,50	895,00	1	2	2
3	1,95	76,60	66,93	544,00	3	4	4
4	96,80	185,60	56,26	791,00	4	2	3
5	69,00	151,05	56,57	885,00	1	4	3

Πίνακας 5.6 Ζεύγη Εισόδων-Εξόδων που Χρησιμοποιήθηκαν για την Εκπαίδευση του Νευρωνικού Δικτύου

Μέσος χρόνος καθυστέρησης (min)	Εισοδοί δικτύου: Επιθυμητοί Δείκτες απόδοσης			Εξοδοί δικτύου Διάταξη Job Shop		
	Μέσος χρόνος παραμονής μιας εργασίας στο σύστημα (min)	Μέση εκμετάλλευση (%)	Χρόνος ολοκλήρωσης τελευταίας εργασίας (min)	# Πόρων WC-1	# Πόρων WC-2	# Πόρων WC-3
0	50	70	600	1	4	4
50	100	75	500	4	2	4
25	75	90	550	2	3	3
0	50	85	600	1	4	4

Πίνακας 5.7 Διάταξη Job Shop προτεινόμενη από το Νευρωνικό Δίκτυο

Προκειμένου να γνωρίσουμε καλύτερα τις δυνατότητες του νευρωνικού δικτύου έγινε σύγκριση της διάταξης του job shop που έδωσε σαν έξοδο το νευρωνικό δίκτυο με την διάταξη που έδωσε σαν έξοδο μια παλινδρόμηση (regression). Μια γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόστηκε στα πέντε ζεύγη εισόδου-εξόδου του Πίνακα. 5.6, ενώ κάθε αριθμός πόρων n_{WC-i} εκφράστηκε σε μια συνάρτηση του τύπου:

$$n_{WC-i} = a_0 + b_i (\text{μέσος χρόνος καθυστέρησης}) + c_i (\text{μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα}) + d_i (\text{μέση εκμετάλλευση}) + e_i (\text{χρόνος ολοκλήρωσης}),$$

όπου οι συντελεστές a_0 , b_i , c_i , d_i και e_i αξιολογούνται από τα δεδομένα του Πίνακα 5.6. Στην συνέχεια οι επιθυμητές τιμές των δεικτών απόδοσης του Πίνακα 5.7 αντικαταστήθηκαν σε αυτές τις συναρτήσεις, οπότε προέκυψαν οι διατάξεις του job shop που φαίνονται στον Πίνακα 5.8. Παρατηρούμε ότι σε ορισμένες διατάξεις έχουμε για κάποια κέντρα εργασίας αρνητικό αριθμό πόρων, γεγονός που από φυσικής απόψεως είναι αδύνατον. Αυτό το απλό παράδειγμα μας δείχνει το πλεονέκτημα που έχουν τα νευρωνικά δίκτυα κατά την μοντελοποίηση καθώς οι σχέσεις, που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση, είναι ισχυρά μη γραμμικές.

Είσοδοι δικτύου: Επιθυμητοί Δείκτες απόδοσης				Έξοδοι δικτύου Διάταξη Job Shop		
Μέσος χρόνος καθυστέρησης (min)	Μέσος χρόνος παραμονής μιας εργασίας στο σύστημα (min)	Μέση εκμετάλλευση (%)	Χρόνος ολοκλήρωσης τελευταίας εργασίας (min)	# Πόρων WC-1	# Πόρων WC-2	# Πόρων WC-3
0	50	70	600	1	7	5
50	100	75	500	4	5	5
25	75	90	550	1	6	5
0	50	85	600	-1	7	5
0	50	95	650	-2	8	4

Πίνακας 5.8 Καθορισμός Διάταξης Job Shop Προτεινόμενος από Παλινδρόμηση

Επίσης, η αποτελεσματικότητα του νευρωνικού δικτύου ελέγχθηκε και με έναν άλλο τρόπο. Εξετάστηκε ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ των επιθυμητών δεικτών απόδοσης και της "πραγματικής" απόδοσης που επετεύχθη από το job shop, το οποίο περιγράφηκε από το νευρωνικό δίκτυο. Η "πραγματική" απόδοση καθορίστηκε προσομοιώνοντας την κάθε διάταξη που αποτελεί έξοδο του νευρωνικού δικτύου, κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτου εργασίας και επιχειρησιακής πολιτικής, που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του εκπαιδευτικού σταδίου. Ο "βαθμός συμφωνίας", για κάθε ένα από τους δείκτες απόδοσης (PM), ποσοτικοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα δείκτη κλασματικής διαφοράς (*fractional difference index*):

$$FD_{PM} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left| \frac{desPM_i - achPM_i}{desPM_{avg}} \right| \quad (5-23)$$

όπου:

- $desPM_i$ \equiv η τιμή του δείκτη απόδοσης (PM) στο σύνολο i των επιθυμητών δεικτών απόδοσης
- $achPM_i$ \equiv η τιμή του δείκτη απόδοσης (PM) που επιτεύχθηκε από το job shop, το οποίο περιγράφηκε από το νευρωνικό δίκτυο και αντιστοιχεί στο σύνολο i των επιθυμητών δεικτών απόδοσης
- $desPM_{avg}$ \equiv ο μέσος όρος των επιθυμητών τιμών των δεικτών απόδοσης (PM) από τα πέντε σύνολα των επιθυμητών δεικτών απόδοσης που φαίνονται στον Πίνακα 5.7

Όσο μικρότερος είναι ο δείκτης κλασματικής διαφοράς (FD), τόσο καλύτερη είναι η συμφωνία μεταξύ των επιθυμητών και των επιτυγχανόμενων δεικτών απόδοσης. Οι κλασματικές διαφορές (FD) που επιτεύχθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 5.9.

FD Μέσος χρόνος καθυστερήσης	FD Μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα	FD Μέση εκμετάλλευση	FD Χρόνος ολοκλήρωσης τελευταίας εργασίας	Μέσο FD
3,43	1,31	0,31	0,41	1,36

Πίνακας 5.9 Βαθμός Συμφωνίας Ανάμεσα στους Επιθυμητούς και Επιτευχθέντες Δείκτες Απόδοσης, όπως μετρήθηκαν από το FD (Εξίσωση 5-23) για ένα Νευρωνικό Δίκτυο Εκπαιδευμένο με 5 Ζεύγη Εισόδου-Εξόδου

Όταν στο ίδιο νευρωνικό δίκτυο δόθηκαν οι ίδιοι επιθυμητοί δείκτες απόδοσης, με την διάφορα ότι αυτή την φορά είχε εκπαιδευτεί με επτά ζεύγη εισόδου-εξόδου αντί για πέντε (Πιν. 5.7.), επιτεύχθηκαν καλύτερες τιμές κλασματικών διαφορών (FD) όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.10 .

FD Μέσος χρόνος καθυστερήσης	FD Μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα	FD Μέση εκμετάλλευση	FD Χρόνος ολοκλήρωσης τελευταίας εργασίας	Μέσο FD
2,58	1,10	0,25	0,33	1,06

Πίνακας 5.10 Βαθμός Συμφωνίας Ανάμεσα στους Επιθυμητούς και Επιτευχθέντες Δείκτες Απόδοσης, όπως μετρήθηκαν από το FD (Εξίσωση 5-23) για ένα Νευρωνικό Δίκτυο Εκπαιδευμένο με Επτά ζεύγη Εισόδου-Εξόδου

Από τα αποτελέσματα που φαίνονται στους (Πιν. 5.9 και 5.10), γίνεται σαφής η ικανότητα του νευρωνικού δικτύου να μαθαίνει, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των παραδειγμάτων με τα οποία ειδικεύεται. Ωστόσο, τα δεδομένα δεν επαρκούν για να καθορίσουν τον βαθμό στον οποίο το job shop που περιγράφεται από το νευρωνικό δίκτυο, ικανοποιεί τους επιθυμητούς δείκτες απόδοσης.

Υπάρχουν αρκετά χαρακτηριστικά στον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής με νευρωνικά δίκτυα, που πρέπει να προσεχθούν:

1. Οι στόχοι του σχεδιασμού εκφράστηκαν σαν επιθυμητές τιμές των δεικτών απόδοσης που είναι σχετικοί. Αυτό το γεγονός μας δίνει ορισμένα πλεονεκτήματα όπως:
 - μπορούν να ληφθούν υπόψη πολλοί στόχοι μαζί,
 - οι στόχοι του σχεδιασμού μπορούν να αλλάξουν χωρίς να αλλάξει η προσέγγιση,
 - οι στόχοι του σχεδιασμού, που είναι οι δείκτες απόδοσης (*PM*), δεν είναι τίποτε άλλο παρά συχνά χρησιμοποιούμενες και αποδεκτές εκφράσεις της επιθυμητής απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής.

Η διατύπωση του προβλήματος λοιπόν γίνεται πολύ ευέλικτη. Με αυτήν την προσέγγιση, η διατύπωση μπορεί να προσαρμοσθεί στο πρόβλημα. Με κάποιες άλλες προσεγγίσεις (όπως για παράδειγμα μια αναλυτική προσέγγιση), το πρόβλημα θα πρέπει να προσαρμοσθεί στην διατύπωση.

2. Με την βοήθεια της χρήσης ενός προσομοιωτή, η προσέγγιση αυτή λαμβάνει υπ' όψη της το αποτέλεσμα μιας συγκεκριμένης επιχειρησιακής πολιτικής. Άλλες προσεγγίσεις τυπικά υποθέτουν, για απλοποίηση, σαν επιχειρησιακή πολιτική τον κανόνα «First-Come-First-Served».
3. Η διαδικασία σχεδιασμού αποσυνδέεται από το μοντέλο προσομοίωσης. Το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να γίνει περισσότερο ευφυές, χωρίς να συμβαίνει κάτι ανάλογο και στην διαδικασία σχεδιασμού του νευρωνικού δικτύου.

Υπάρχουν όμως και αρκετά θέματα στον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής με νευρωνικά δίκτυα, που παραμένουν προς επίλυση:

1. Τα δεδομένα εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων παράγονται από ένα περιορισμένο αριθμό από δοκιμές της προσομοίωσης, στα οποία οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) διαφέρουν, κατά κάποιο τρόπο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα περιορισμένο αριθμό x αντιστοιχίσεων των μεταβλητών απόφασης στους δείκτες απόδοσης. Στις

περισσότερες περιπτώσεις, ο λόγος x/n , όπου n ο συνολικός αριθμός των δυνατών αντιστοιχήσεων ή αλλιώς ο συνολικός αριθμός των δυνατών συνδυασμών των μεταβλητών απόφασης, θα είναι στην πραγματικότητα πολύ μικρός. Πόσο μεγάλος πρέπει να είναι ο x/n ; Φυσικά, εάν ο n μπορεί να μειωθεί με κάποιο τρόπο, τότε η πιθανότητα επιτυχίας της προτεινόμενης προσέγγισης θα ήταν αυξημένη. Επίσης, θα ήταν πολύ θετικό να υπήρχαν μερικά εύκολα εφαρμόσιμα κριτήρια, που να εξαλείφουν τους κακούς συνδυασμούς των μεταβλητών απόφασης. Τότε τα νευρωνικά δίκτυα θα μπορούσαν να εκπαιδευτούν μόνο με «καλές» αντιστοιχίσεις, οι οποίες οδηγούν σε καλές τιμές των δεικτών απόδοσης.

2. Κάτι άλλο που μας προβληματίζει είναι το γεγονός, ότι τα αποτελέσματα παράγονται από προσομοιώσεις, που αφορούν την επεξεργασία ενός και μόνο προγράμματος παραγωγής από διάφορες διατάξεις του job shop. Πρέπει να καθορισθεί κατά πόσο μπορούν να γενικευθούν τα αποτελέσματα αυτά και σε άλλα προγράμματα παραγωγής.

Η χρήση των νευρωνικών δικτύων είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για τον σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής. Και αυτό γιατί έχουν την δυνατότητα να καθοδηγούν την διαδικασία του σχεδιασμού η οποία απαιτεί πολλές επαναλήψεις και με τον τρόπο αυτό μειώνουν τον αριθμό των προσομοιώσεων, που απαιτούνται κατά την διαδικασία. Το πιο σημαντικό είναι, ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει την ικανότητα να καθοδηγεί, εξ αιτίας μιας απλής και αυτόματης διαδικασίας εκπαίδευσης και όχι εξ αιτίας μιας κωδικοποίησης από μια σύνθετη ομάδα εμπειρικών κανόνων.

Ενώ οι προσεγγίσεις παραμετρικού σχεδιασμού, που περιγράφονται παραπάνω, είναι αρκετά ευέλικτες, ώστε να αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά ρεαλιστικές διατυπώσεις του προβλήματος του σχεδιασμού συστημάτων παραγωγής, παραμένει να δούμε εάν κάποια από αυτές τις διατυπώσεις μπορεί να λυθεί αποτελεσματικά. Αν και η λύση χρησιμοποιεί την προσομοίωση σε συνδυασμό με την αναζήτηση [49], τα νευρωνικά δίκτυα [51], και άλλες μεθόδους, το πιο πιθανό είναι ότι για να λυθούν ρεαλιστικά βιομηχανικά προβλήματα, θα απαιτούνται ηλεκτρονικοί υπολογιστές με πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Επιπλέον υλικό (Further Reading)

Ο σχεδιασμός συστημάτων παραγωγής απαιτεί την *σύνθεση*, ιδεών από διαφορετικούς χώρους, όπως η επιχειρησιακή έρευνα, τα οικονομικά, η τεχνητή νοημοσύνη και άλλοι τομείς. Αν και ο κάθε χώρος είναι αρκετά καλά προσδιορισμένος, ο συνδυασμός περισσότερων του ενός χώρων για την αντιμετώπιση του προβλήματος του σχεδιασμού συστημάτων παραγωγής, μπορεί να εξετασθεί από μια άλλη οπτική γωνία. Αυτό προσπάθησε να κάνει αυτό το κεφάλαιο.

Συνεπώς, οι περιγραφές ανεξάρτητων μεθόδων και εργαλείων έγινε σε μεγάλο βαθμό από υπάρχουσες εργασίες, και είναι αυτές στις οποίες θα παραπέμψουμε τους αναγνώστες που ενδιαφέρονται. Συγκεκριμένα, το τμήμα που αναφέρεται σε μεθόδους και εργαλεία επιχειρησιακής έρευνας έχει αρκετές αναφορές από το βιβλίο *"Theory and Problems of Operations Research"* του Bronson [10]. Το βιβλίο αυτό παρέχει μια αποτελεσματική ανασκόπηση (κάτι σαν εγχειρίδιο) γύρω από ιδέες επιχειρησιακής έρευνας. Κάποιες άλλες ιδέες προέρχονται από το βιβλίο *"Operations Research: Applications and Algorithms"* του W. I. Winston [9]. Εδώ γίνεται μια πιο σε βάθος προσέγγιση, με έμφαση στα κίνητρα και τις εφαρμογές των διάφορων μεθόδων και εργαλείων. Για όσους ενδιαφέρονται ιδιαίτερα για την θεωρία της αναμονής, μια σε βάθος προσέγγιση παρέχεται στο βιβλίο *"Fundamentals of Queuing Theory"* [11] των Gross και Harris.

Το τμήμα που αναφέρεται στα έμπειρα συστήματα προσαρμόστηκε από το βιβλίο του P. H. Winston *"Artificial Intelligence"* [12], μια σαφής και ευανάγνωστη περιγραφή των τεχνικών της τεχνητής νοημοσύνης. Η αντιμετώπιση σε αυτό το βιβλίο είναι αναλυτική με έμφαση στις εφαρμογές διάφορων μεθόδων και εργαλείων. Αν και τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν σχετικά πρόσφατα σαν εργαλεία που υποστηρίζουν πρακτικές εφαρμογές, στο βιβλίο *"Neurocomputing"* της Hecht-Nielsen [15] μπορούμε να βρούμε μια περιληπτική αναφορά στις διάφορες εξελίξεις στον τομέα μέχρι σήμερα. Επίσης τα πρακτικά του ετήσιου *"IEEE International Conference On Neural Networks"* μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες για όλες τις τελευταίες εξελίξεις στον χώρο από θεωρητική αλλά και εφαρμοσμένη άποψη.

Τέλος θεωρητικά και πρακτικά θέματα προσομοίωσης καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό στο βιβλίο *"Simulation Modeling and Analysis"* των Law και Kelton [19]. Στο βιβλίο αυτό δίνεται έμφαση στις εφαρμογές της προσομοίωσης στα συστήματα παραγωγής.

Βιβλιογραφία

1. Primrose, P.I. and R. Leonard, "The Use of a Conceptual Model to Evaluate Financially Flexible Manufacturing System Projects," *Flexible Manufacturing Systems Current Issues and Models* (1986). Choobineh, F. and R. Suri, Editors. Industrial Engineering and Management Press. Atlanta, Georgia, pp. 282-288.
2. Williamson. I.P ., "Justification in a Strategic Context," *International Conference on Factory 2000* (1988), pp. 413-419.
3. Choobineh. F ., " Justification of Flexible Manufacturing Systems," *Flexible Manufacturing Systems Current Issues and Models* (1986). Choobineh. F. and R. Suri, Editors. Industrial Engineering and Management Press, Atlanta, GA, pp. 269-281.
4. Primrose, P.I. and R. Leonard, "Conditions Under Which Flexible Manufacturing is Financially Viable," *Proceedings of the Third International Conference on Flexible Manufacturing Systems* (1984), pp. 121-132.
5. Son, Y.K. and Chan S.P ., "Quantifying Opportunity Costs Associated With Adding Manufacturing Flexibility ," *International Journal of Production Research* (vol. 28, No. 7, 1990), pp. 1183-1194.
6. Muther, R., *Systematic Planning of Industrial Facilities*, Management and Industrial Publications, Kansas City, Missouri, 1979.
7. Muther, R. and E.J. Phillips. "Facility Planners Cite Clear Objectives And Proper Input Data As Main Success Factors." *Industrial Engineering* (March 1983), pp. 44-48.
8. Tompkins, J.A. and J.D. Spain, "Utilization Of Spine Concept Maximizes Modularity In Facilities Design," *Industrial Engineering* (March 1983), pp. 34-42.
9. Winston, W.I., *Operations Research: Applications and Algorithms*. Duxbury Press, Boston, 1987.
10. Bronson, R., *Schaum 's Outline of Theory and Problems of Operations Research*, McGraw-Hill. New York, 1982.
11. Gross, D. and C.M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, John Wiley & Sons, New York, 1985.
12. Winston, P.H., *Artificial Intelligence*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
13. Kohonen, T., *Self-Organization and Associative Memory*, Springer Verlag, Berlin, 1984.
14. Lippmann, R.P., "An Introduction to Computing with Neural Nets," *IEEE ASSP Magazine* (April 1987).
15. Hecht-Nielsen, R., *Neurocomputing*, Addison- Wesley , Reading, Massachusetts, 1990.
16. Dutta, S.,and S. Shekhar, "Bond Rating: A Non-Conservative Application of Neural Networks," *IEEE International Conference on Neural Networks* (Vol. 2, 1988), pp. 443-450.
17. Soulie, F.F ., P .Gallinari, Y .Le Cun, and S. Thina, "Evaluation of Neural Network Architectures on Test Learning Tasks," *IEEE International Conference on Neural Networks* (Vol. 2, 1987), pp. 653-660.
18. Rumelhart, D.E., G.E. Hinton and R.J. Williams, "Learning Internal Representation by Error Propagation," in Rumelhart, D.E. and J.L. McClelland, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* (Vol. 1, 1986), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 318-362.
19. Law, A.M. and W.D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.
20. Phadke, M.S., *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
21. Law, A., "Introduction to Simulation: A Powerful Tool for Analyzing Complex Manufacturing Systems," *Industrial Engineering* (Vol. 5, 1986), pp. 46-59.
22. Law, A.M. and M.G. McComas, "Pitfalls to Avoid in the Simulation of Manufacturing Systems," *Industrial Engineering* (Vol. 5, No. 5, 1989), pp. 28.
23. Miller, D.M., and R.P. Davis, "The Machine Requirements Problem," *International Journal of Production Research* (Vol. 15, 1977), pp. 219.
24. Shubin, J.A. and H. Madeheim, *Plant Layout*, Prentice-Hall, New York, 1951.
25. Apple, J.M., *Plant Layout and Material Handling*, The Ronald Press Company , New York, 1950.
26. Francis, R.L. and J.A. White, *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*, Prentice-Hall, New York, 1974.
27. Morris, W.T., "Facilities Planning," *Journal of Industrial Engineering* (vol. 9, 1958).
28. Reed, R., Jr., *Plant Layout: Factors, Principles, and Techniques*, R. D. Irwin, Homewood, Illinois, 1961.

29. Miller, D.M., and R.P. Davis, "A Dynamic Resource Allocation Model for a Machine Requirements Problem," *AIEE Transactions* (vol. 10, No. 3, 1978), pp. 237-243.
30. Kusiak, A., "The Production Equipment Requirements Problem," *International Journal of Production Research* (vol. 25, No. 3, 1987), pp. 319-325.
31. Ueno, N., S. Sotojima, and J. Takeda, "Simulation-Based Approach to Design a Multi-Stage Flow-Shop in Steel Works," *Proceedings of the 24th Annual Simulation Symposium* (1991). IEEE Computer Society Press, Los Angeles, California. pp. 332-337.
32. Suh, R. and R.R. Hildebrandt, "Modelling Flexible Manufacturing Systems Using Mean Value Analysis," *Journal of Manufacturing Systems* (vol. 3, No. 1, 1984), pp. 27-38.
33. Lawler, E.L., "The Quadratic Assignment Problem," *Management Science* (vol. 9, 1963), pp. 586.
34. Gavett, J.W. and N.v. Plyter, "The Optimal Assignment of Facilities to Locations by Branch and Bound," *Operations Research* (vol. 14, 1966), pp. 210.
35. Graves, G.W. and A.B. Whinston, "An Algorithm for the Quadratic Assignment Problem," *Management Science* (vol. 17, 1970), pp. 453.
36. Kaufmann, L. and F. Broeckx, "An Algorithm for the Quadratic Assignment Problem Using Benders' Decomposition," *European Journal of Operations Research* (Vol. 2, 1978), pp. 204.
37. Bazaraa, M.S. and H.D. Sherali, "Bender's Partitioning Scheme Applied to a New Formulation of the Quadratic Assignment Problem," *Naval Research Logistics Quarterly* (Vol. 27, 1980), pp. 29.
38. Sahni, S. and T. Gonzalez, "P-Complete Approximation Problems," *Journal of the Association of Computing Machinery* (Vol. 23, No. 3, 1976), p. 555-565.
39. Liggett, R.S., "The Quadratic Assignment Problem: An Experimental Evaluation of Solution Strategies" *Management Science* (Vol. 27, No. 4, April 1981), pp. 442-458.
40. Evans, G.W., M.R. Wilhelm, and W. Karwowski, "A Layout Design Heuristic Employing the Theory of Fuzzy Sets," *International Journal of Production Research* (Vol. 25, No. 10, 1987), pp. 1431-1450.
41. Seehof, J.M. and W.O. Evans, "Automated Layout Design Program," *The Journal of Industrial Engineering* (Vol. 18, No. 12, 1967), pp. 690-695.
42. Lee, R.C. and J.M. Moore, "CORELAP -Computerized Relationship Layout Planning," *Journal of Industrial Engineering* (Vol. 18, 1967), p. 194.
43. Heragu, S. and A. Kusiak, "Knowledge Based System for Machine Layout (KBML)," 1988 *International Industrial Engineering Conference Proceedings*, pp. 159-164.
44. Wilhelm, M.R. and G.W. Evans, "The State-of-the-Art in AGV System Analysis and Planning", *Proceeding of the AGVS '87* (October 1987), Pittsburgh, Pennsylvania.
45. Gaskins, R.J. and J.M.A. Tanchoco, "Flow Path Design for Automated Guided Vehicle Systems," *International Journal of Production Research* (Vol. 25, No. 5, 1987), pp. 667-676.
46. Usher, J.S., G.W. Evans, and M.R. Wilhelm, "AGV Flow Path Design and Load Transfer Point Location," 1988 *International Industrial Engineering Conference Proceedings*, pp. 174-179.
47. Rabeneck, C.W., J.S. Usher, and G.W. Evans, "An Analytical Models for AGVS Design," 1989 *International Industrial Engineering Conference & Societies' Manufacturing and Productivity Symposium Proceedings*, pp. 191-195.
48. Jafari, M.A. and J.G. Shanthikumar, "Determination of Optimal Buffer Storage Capacities and Optimal Allocation in Multistage Automatic Transfer Lines," *IIE Transactions* (Vol. 21, No. 2, 1989), pp. 130-135.
49. Bulgak, A.A. and J.L. Sanders, "Integrating a Modified Simulated Annealing Algorithm with the Simulation of a Manufacturing System to Optimize Buffer Sizes in Automatic Assembly Systems," *Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference*, pp. 684-690.
50. Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt Jr., and M.P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science* (vol. 220, 1983), pp. 671-680.
51. Chryssolouris, G. and M. Lee, "Use of Neural Networks for the Design of Manufacturing Systems," *Manufacturing Review* (vol. 3, No. 3, Sept. 1990), pp. 187-194.

6 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (The Operation of Manufacturing Systems)

6.1 Εισαγωγή

Η λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής είναι η πολύπλοκη διαδικασία του προγραμματισμού της ροής πληροφορίας και των υλικών μέσα στο σύστημα. Η σωστή ροή του υλικού είναι αυτή, που δίδει την δυνατότητα σ' ένα σύστημα παραγωγής να παράγει προϊόντα μέσα σε προκαθορισμένο χρόνο και σε ικανοποιητικές ποσότητες και είναι άμεση συνέπεια της ροής πληροφορίας μέσα στο σύστημα: Οι πληροφορίες, που *σχετίζονται* με τις εντολές προγραμματισμού και προέρχονται από τους υπεύθυνους παραγωγής ή από ένα λογισμικό προγραμματισμού παραγωγής, καθορίζουν την ροή υλικού μέσα στο σύστημα, ενώ οι πληροφορίες από την παρακολούθηση (sensory information) της κατάστασης των παραγωγικών πόρων του συστήματος χρησιμοποιούνται για την λήψη των καταλλήλων αποφάσεων. Η θεμελιώδης δραστηριότητα στην λειτουργία των συστημάτων παραγωγής είναι επομένως εκείνη, η οποία προσδιορίζει τις εντολές που περιγράφουν την ροή υλικού μέσα στο σύστημα παραγωγής.

Οι εντολές που, προσδιορίζουν την ροή της πληροφορίας και των υλικών, μπορούν να οργανωθούν σε δυο επίπεδα. Οι «υψηλού επιπέδου» εντολές προσδιορίζουν την ροή υλικού *μέσα* στο σύστημα παραγωγής. Επομένως, προσδιορίζουν το πρόγραμμα παραγωγής του συστήματος, δηλαδή την ποσότητα ανά τύπο προϊόντος, η οποία πρέπει να παραχθεί σε κάθε χρονική περίοδο. Αυτές οι χρονικές περίοδοι είναι τυπικά μεγάλες –της τάξης ημερών ή και εβδομάδων. Γι' τον λόγο αυτό, η δραστηριότητα της λήψης αποφάσεων με σκοπό την δημιουργία εντολών υψηλού επιπέδου ονομάζεται *μακροπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής*. Κατά τον μακροπρόθεσμο προγραμματισμό λαμβάνεται υπ' όψη ο *συνολικός χρόνος παραγωγής* – δηλαδή, πότε θα παραχθεί τι και σε ποιες ποσότητες.

Οι εντολές χαμηλού επιπέδου προσδιορίζουν την ροή των υλικών *μέσα* και στην *έξοδο* από το σύστημα παραγωγής. Ο ρόλος των εντολών χαμηλού επιπέδου είναι η διευθέτηση του τρόπου διάθεσης των παραγωγικών μονάδων του

συστήματος, προσδιορίζοντας τους παραγωγικούς πόρους οι οποίοι πρέπει να διατεθούν για την κατεργασία κάθε εξαρτήματος καθώς και τον χρόνο εκτέλεσης κάθε κατεργασίας. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την εκτέλεση των εργασιών, που εμφανίζονται διαδοχικά σε ένα σύστημα παραγωγής σαν αποτέλεσμα του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού. Εφ' όσον οι εντολές χαμηλού επιπέδου ελέγχουν ξεχωριστές διεργασίες, πρέπει να παράγονται με μεγαλύτερη συχνότητα από τις εντολές υψηλού επιπέδου. Ο χρόνος μεταξύ των εντολών είναι τυπικά της τάξης των δευτερολέπτων ή λεπτών. Γι' αυτόν τον λόγο, η δραστηριότητα λήψης αποφάσεων χαμηλού επιπέδου ονομάζεται *βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός (short term dispatching)*. Ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός έχει ως αντικείμενο την λεπτομερή ανάθεση των εργασιών στους παραγωγικούς πόρους του συστήματος.

Συλλογικά, ο μακροπρόθεσμος και βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής αναφέρονται σαν "χρονοπρογραμματισμός παραγωγής".

6.2 Η Πανεπιστημιακή Έρευνα έναντι των Βιομηχανικών Απαιτήσεων

Η ακαδημαϊκή έρευνα σχετικά με τον χροοπρογραμματισμό της παραγωγής αρχικά βασίστηκε στις τεχνικές επιχειρησιακής έρευνας (ειδικότερα στον μαθηματικό προγραμματισμό). Οι πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες χρησιμοποίησης των δυνατοτήτων της "τεχνητής νοημοσύνης" δεν είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή τους στην βιομηχανία, επειδή οι ερευνητικές προσεγγίσεις κάνουν παραδοχές, οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Το περιβάλλον της παραγωγής είναι εξαιρετικά μεταβλητό και συνήθως δεν μπορεί να ταξινομηθεί αυστηρά όπως στα μοντέλα χρονικού προγραμματισμού παραγωγής, τα οποία χρησιμοποιούνται στην επιστημονική έρευνα.

Οι οντότητες, οι οποίες πρόκειται να χρονοπρογραμματισθούν, τυπικά αναφέρονται σαν εργασίες (jobs). Οι επί μέρους παραγωγικές διεργασίες της παραγωγής, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται σε μία εργασία (job), αναφέρονται σαν tasks. Τα κλασσικά προβλήματα χρονοπρογραμματισμού μπορούν να χωρισθούν σε κατηγορίες με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Δημιουργία απαιτήσεων.
- Πολυπλοκότητα επεξεργασίας.
- Κριτήρια χρονοπρογραμματισμού.
- Περιβάλλον χρονοπρογραμματισμού.

Οι απαιτήσεις προσδιορίζονται είτε άμεσα, από τις παραγγελίες των πελατών, είτε έμμεσα, από αποφάσεις ανεφοδιασμού της αποθήκης. Αυτή η διάκριση προσδιορίζει ένα σύστημα ως open shop ή closed shop. Σ' ένα open shop, όλες

οι εργασίες προσδιορίζονται από τον πελάτη και δεν υπάρχει απόθεμα στην αποθήκη. Ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής ανάγεται σε πρόβλημα αλληλουχίας, στο οποίο οι παραγωγικές διαδικασίες (tasks), που αντιστοιχούν στις απαιτούμενες εργασίες (jobs), ανατίθενται στους παραγωγικούς πόρους. Σ' ένα closed shop, όλες οι απαιτήσεις του πελάτη ικανοποιούνται από το απόθεμα και οι εργασίες είναι γενικά το αποτέλεσμα της απόφασης ανεφοδιασμού της αποθήκης. Σε ένα closed shop, ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής συμπεριλαμβάνει αποφάσεις, που συνδυάζουν την διαδικασία ανεφοδιασμού της αποθήκης με το πρόβλημα του βραχυπρόθεσμου χρονοπρογραμματισμού.

Ανάλογα με το πώς προσδιορίζονται ή προκύπτουν στο σύστημα παραγωγής οι απαιτήσεις, τα συστήματα μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν ντετερμινιστικά ή στοχαστικά αντίστοιχα. Για παράδειγμα, σ' ένα open shop, ο χρόνος επεξεργασίας για κάθε υπεργασία (task) μιας εργασίας (job) μπορεί να είναι γνωστός ή να είναι μια τυχαία μεταβλητή με συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Ομοίως, σ' ένα closed shop, η ζήτηση των πελατών η οποία οδηγεί στην απόφαση ανεφοδιασμού της αποθήκης, μπορεί να είναι ντετερμινιστική ή στοχαστική.

Η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας έχει σχέση με τον αριθμό των υπεργασιών (tasks), που περιέχονται σε κάθε εργασία (job) και συχνά ταξινομείται όπως παρακάτω:

- Ένας σταθμός, ένας επεξεργαστής (one stage, one processor).
- Ένας σταθμός, παράλληλοι επεξεργαστές (one-stage, parallel processors).
- Πολλοί σταθμοί, flow shop (multistage).
- Πολλοί σταθμοί, job shop (multistage).

Στην περίπτωση "one stage, one processor", η οποία είναι επίσης γνωστή σαν "one machine problem", όλες οι εργασίες αποτελούνται από μια υπεργασία, η οποία πρέπει να υλοποιηθεί στη μια διαθέσιμη μηχανή. Η περίπτωση "one-stage, parallel processors" είναι ίδια με την προηγούμενη, εκτός του γεγονότος ότι οι εργασίες, οι οποίες επίσης περιέχουν μια απλή υπεργασία, μπορούν να υλοποιηθούν σε οποιονδήποτε από τους παράλληλους επεξεργαστές. Στην περίπτωση "multistage", κάθε εργασία απαιτεί επεξεργασία σε μια ομάδα συγκεκριμένων πόρων, όπου υπάρχει μια αυστηρή αλληλουχία εκτέλεσης των υπεργασιών, για κάθε ξεχωριστή εργασία. Η περίπτωση flow shop, δέχεται σαν δεδομένο, ότι όλες οι εργασίες θα εκτελεστούν στην ίδια ομάδα με ίδια προτεραιότητα για το σύνολο των υπεργασιών.

Τα κριτήρια του χρονοπρογραμματισμού είναι μέτρα, με βάση τα οποία αξιολογείται ο χρονοπρογραμματισμός. Μπορούν να χωρισθούν σε κριτήρια κόστους και κριτήρια επίδοσης. Τα κριτήρια κόστους περιλαμβάνουν:

- Κόστος αποθήκευσης πρώτων υλών.

- Κόστος χρονοπρογραμματισμού και παρακολούθησης της εξέλιξής του.
- Σταθερά κόστη σχετικά με το χρόνο προετοιμασίας των μηχανών (set-ups) και τις αλλαγές στην παραγωγική διαδικασία.
- Μεταβλητά κόστη παραγωγής
- Επί πλέον κόστη για την εκτέλεση επειγόντων εργασιών
- Το κόστος παραβίασης των χρόνων παράδοσης

Τα κριτήρια επίδοσης περιλαμβάνουν:

- Το επίπεδο εκμετάλλευσης των πόρων του παραγωγικού συστήματος.
- Τα ποσοστά καθυστερημένων εργασιών.
- Την μέση ή μέγιστη τιμή του χρόνου καθυστέρησης μιας ομάδας εργασιών στο σύστημα παραγωγής.
- Την μέση ή μέγιστη τιμή του χρόνου παραμονής των εργασιών στο σύστημα παραγωγής.

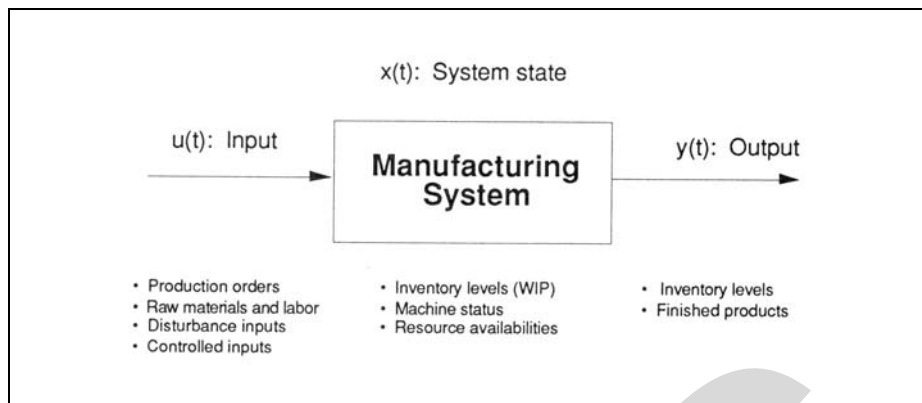
Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αξιολόγηση του χρονοπρογραμματισμού βασίζεται τόσο στα κριτήρια κόστους όσο και στα κριτήρια επίδοσης.

Το περιβάλλον του χρονοπρογραμματισμού εξαρτάται από την αβεβαιότητα και την εν γένει πληροφόρηση σχετικά με τις υπάρχουσες και μελλοντικές εργασίες και μπορεί να είναι στατικό ή δυναμικό. Σ' ένα στατικό περιβάλλον, το πρόβλημα περιέχει ένα προκαθορισμένο σύνολο από πλήρως προσδιορισμένες εργασίες. Επιπρόσθετες εργασίες εισέρχονται σ' αυτό το σύνολο και καμιά από τις εργασίες αυτού του συνόλου δεν μεταβάλλεται. Σ' ένα δυναμικό περιβάλλον, το πρόβλημα περιέχει όχι μόνο το αρχικό σύνολο των γνωστών εργασιών, αλλά και επιπρόσθετες εργασίες, οι οποίες φθάνουν σε μελλοντικές χρονικές περιόδους. Το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού στον χώρο της παραγωγής είναι τις περισσότερες φορές στοχαστικό και δυναμικό. Ωστόσο, τα περισσότερα μοντέλα σε προβλήματα χρονικού προγραμματισμού είναι ντετερμινιστικά και στατικά.

Οι μέθοδοι του χρονοπρογραμματισμού, οι οποίες είτε δίδουν κάποια εγγύηση για την μη ευαισθησία της χρονοδρομολόγησης σε μελλοντικές διαταραχές ή σαφώς αντανακλούν την αβέβαια φύση της διαθέσιμης πληροφορίας, είναι αντικείμενο της θεωρίας ελέγχου (control theory).

Η θεωρία ελέγχου επιχειρεί να ρυθμίσει την ροή των υλικών με σταθερό τρόπο, λαμβάνοντας υπ' όψη διαταραχές όπως βλάβες μηχανών, απουσίες χειριστών, ανεπάρκεια υλικών και αλλαγών της ζήτησης, καθώς επίσης την απουσία ή ανακρίβεια της πληροφορίας σχετικά με την κατάσταση του συστήματος. Η θεωρία ελέγχου αντιμετωπίζει τον χρονοπρογραμματισμό σαν μια δυναμική διαδικασία, όπου το πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού της παραγωγής είναι η κατανόηση της διαδικασίας επαναπρογραμματισμού. Το σύ-

στημα υπό έλεγχο λειτουργεί σαν αλληλουχία εισόδων $u(t)$, αποδίδοντας μια αλληλουχία εξόδων $y(t)$. Οι εξόδοι είναι σε κάθε χρονική στιγμή μια συνάρτηση της κατάστασης του συστήματος $x(t)$.



Input = Είσοδος

System state = Κατάσταση Συστήματος

Output = Εξόδος

Manufacturing System = Σύστημα Παραγωγής

Production orders = Εντολές Παραγωγής

Raw materials and labor = Πρώτες ύλες και

εργασία

Disturbance inputs = Είσοδοι διαταραχής

Controlled inputs = Ελεγχόμενοι Είσοδοι

Inventory levels (WIP) = Επίπεδα Αποθέματος

Machine status = Κατάσταση Μηχανών

Resource availabilities = Διαθεσιμότητα Μηχανών

Inventory levels = Επίπεδα αποθέματος

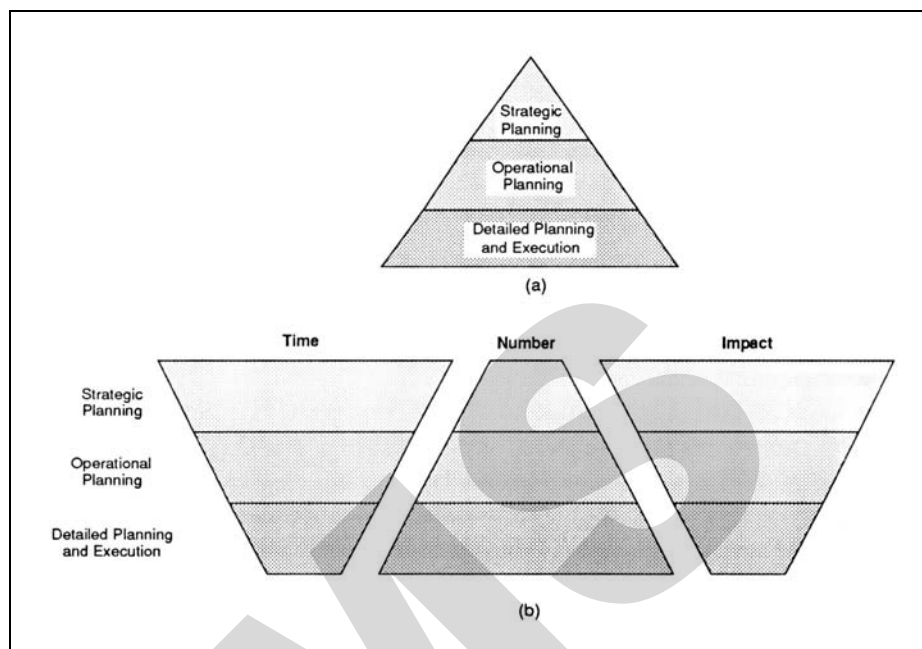
Finished products = Τελικά προϊόντα

Σχήμα 6.1 Σύστημα Παραγωγής από την άποψη της Θεωρίας Ελέγχου

Γενικό αντικείμενο του προβλήματος ελέγχου είναι να καθορίσει μια μέθοδο, που να ρυθμίζει χρονικά την κατάσταση του συστήματος και επιπλέον την έξοδό του, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του συστήματος (π.χ. μέγιστος αριθμός εργασιμών ωρών ανά βδομάδα) και ταυτόχρονα μερικά από τα κριτήρια επίδοσης. Οι εισόδοι σ' ένα σύστημα παραγωγής περιλαμβάνουν εντολές παραγωγής, πρώτες ύλες, εργαζομένους, διαταραχές και άλλες ελεγχόμενες εισόδους. Οι εντολές παραγωγής ορίζουν το μέγεθος των διαφόρων εργασιών, οι οποίες πρέπει να εκτελεστούν καθώς επίσης και τις ημερομηνίες στις οποίες πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί. Οι διαταραχές περιλαμβάνουν βλάβες μηχανών και μη διαθεσιμότητα προσωπικού, στις οποίες ο υπεύθυνος του χρονοπρογραμματισμού έχει μικρή επιρροή. Οι ελεγχόμενες εισόδοι συμπεριλαμβάνουν αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού, συντήρησης κ.λ.π., τις οποίες ο υπεύθυνος μπορεί να ρυθμίσει μέσα σε κάποια όρια. Η κατάσταση του συστήματος παραγωγής, προσδιορίζει τα επίπεδα για όλες τις ολοκληρωμένες ή μερικά ολοκληρωμένες εργασίες, την κατάσταση όλων των μηχανών (ενεργές, ανενεργές ή υπό επισκευή), την διαθεσιμότητα προσωπικού και αποθεμάτων για όλα τα υλικά. Ως εξόδοι του συστήματος παραγωγής μπορούν να ορισθούν οποιεσδήποτε μεταβλητές, που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος, π.χ. τα επίπεδα του αποθέματος για όλες τις εργασίες

που είναι έτοιμα για αποστολή σε καθορισμένη ημερομηνία. (Σχ. 6.2).

Με δεδομένο, ότι η διατύπωση του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής –χρησιμοποιώντας τη θεωρία ελέγχου– είναι σχετικά σύγχρονη, η ανάπτυξη επαρκών εργαλείων για τη λύση του εν λόγω προβλήματος αποτελεί θέμα επισταμένης έρευνας.



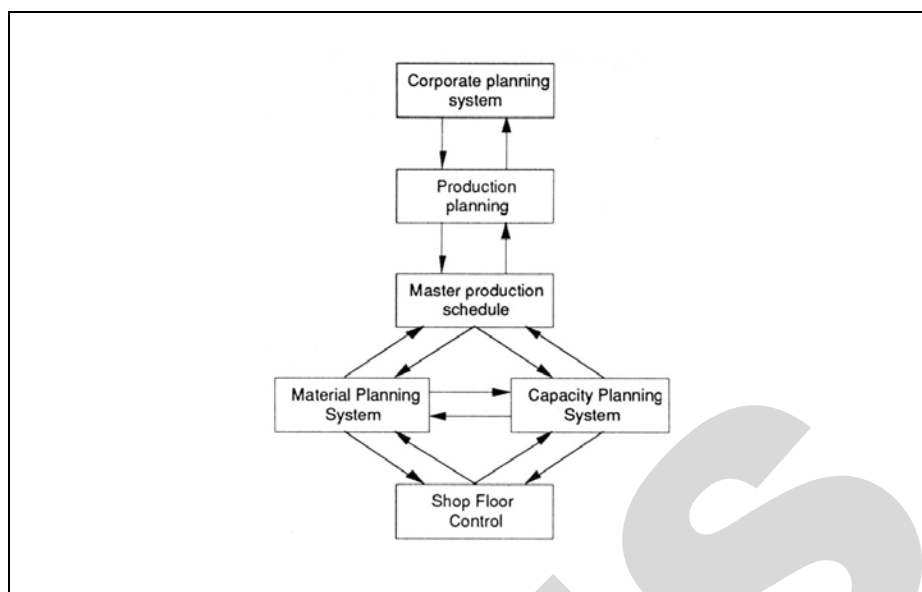
Strategic Planning = Στρατηγικός
Προγραμματισμός
Operational Planning = Επιχειρησιακός
Προγραμματισμός
Detailed Planning and Execution = Λεπτομερής

Προγραμματισμός και Εκτέλεση
Time = Χρόνος
Number = Αριθμός
Impact = Επίπτωση

Σχήμα 6.2 (α) Τα Επίπεδα Λειτουργίας των Συστημάτων Παραγωγής και (β) Τα Χαρακτηριστικά των Αποφάσεων που Λαμβάνονται σε Κάθε Επίπεδο

Οι μέθοδοι της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και συγκεκριμένα τα έμπειρα συστήματα, ήταν ένας πρόσφατος στόχος της ακαδημαϊκής έρευνας για τον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής. Τα έμπειρα συστήματα επιδιώκουν να ορίσουν γενικούς κανόνες χρονοπρογραμματισμού, οι οποίοι να είναι εφαρμόσιμοι σ' ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων. Γενικά, οι κανόνες αυτοί πρέπει να είναι προσαρμοσμένοι στις ειδικές απαιτήσεις των συστημάτων. Η γνώση σ' ένα σύστημα, βασισμένο σε κανόνες, μπορεί να ταξινομηθεί σε στατική (static knowledge) και σε δυναμική (dynamic knowledge). Η στατική γνώση περιέχει όλες τις πληροφορίες, οι οποίες αφορούν το ίδιο το σύστημα παραγωγής και τους στόχους της παραγωγής. Η δυναμική γνώση περιγράφει την διαθέσιμη

εμπειρία για τη δημιουργία εφικτού χρονοπρογραμματισμού και αποτελείται από τα ακόλουθα:



Corporate planning system = Συγκεντρωτικό Σύστημα Προγραμματισμού
 Production planning = Προγραμματισμός Παραγωγής
 Master production schedule = Βασικός Χρονοπρογραμματισμός Παραγωγής

Material Planning System = Σύστημα Προγραμματισμού Υλικών
 Capacity Planning System = Σύστημα Προγραμματισμού Δυναμικότητας Πόρων
 Shop Floor Control = Έλεγχος σε επίπεδο παραγωγής (Shop Floor)

Σχήμα 6.3 Βασικά Στοιχεία που Συνθέτουν ένα Σύστημα Σχεδιασμού Παραγωγής

- *Θεωρητική γνώση (theoretical expertise)*, η οποία αναφέρεται στις τεχνικές επιχειρησιακής έρευνας οι οποίες χρησιμοποιούνται στην διαχείριση του χρόνου και των πόρων (μηχανών).
- *Εμπειρική γνώση (empirical expertise)*, η οποία αποτελείται από εμπειρικούς κανόνες διεκπεραίωσης.
- *Πρακτική γνώση (practical dedicated expertise)*, η οποία παρέχεται από έμπειρους επιβλέποντες, οι οποίοι είναι ενήμεροι για τους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά την διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής.

Στα πλαίσια ενός έμπειρου συστήματος, αυτοί οι τύποι γνώσης μορφοποιούνται σε κανόνες. Καλούνται από κανόνες υψηλότερου επιπέδου, οι οποίοι επιλέγουν έναν συγκεκριμένο τύπο γνώσης με βάση την κατάσταση του συστήματος παραγωγής και του χρονοπρογραμματισμού, που πρέπει να εκτελε-

σθεί.

Στην *βιομηχανία*, εϊθισται να διαιρείται η λειτουργία ενός παραγωγικού συστήματος σε τρία κύρια επίπεδα:

1. Του στρατηγικού προγραμματισμού (Strategic Planning).
2. Του επιχειρησιακού προγραμματισμού (Operational Planning).
3. Του λεπτομερούς προγραμματισμού και της εκτέλεσής του (Detailed planning and execution)

Στο επίπεδο του στρατηγικού προγραμματισμού λαμβάνονται λίγες αποφάσεις αλλά κάθε απόφαση απαιτεί μεγάλο χρόνο λήψης και επηρεάζει όλη την επιχείρηση. Στο επίπεδο του λεπτομερούς προγραμματισμού και στην διαδικασία εκτέλεσής του λαμβάνονται πολλές αποφάσεις, οι οποίες απαιτούν πολύ λιγότερο χρόνο. Παρά το γεγονός, ότι η επίδραση της κάθε απόφασης είναι τοπική ως προς τον χρόνο και τον χώρο, ο μεγάλος αριθμός των αποφάσεων, θεωρούμενος συνολικά, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο σύστημα.

Τα χαρακτηριστικά των αποφάσεων στο επίπεδο του επιχειρησιακού προγραμματισμού βρίσκονται μεταξύ εκείνων από τα άλλα δύο επίπεδα (Σχ. 6.3.)

Ο στρατηγικός προγραμματισμός πραγματοποιείται από την ανώτατη διοίκηση της επιχείρησης. Αρκετές βασικές ερωτήσεις, που γίνονται σ' αυτό το επίπεδο, συμπεριλαμβάνουν: "Ποιές είναι οι επιχειρηματικές μας δραστηριότητες;" και "Πώς θα γίνουμε ανταγωνιστικοί";. Σ' αυτό το επίπεδο, η απόφαση λαμβάνεται ανάλογα με την δομή του συστήματος παραγωγής (π.χ. συστήματα τύπου κυψέλης, συστήματα τύπου job shop κλπ.), η οποία συμφωνεί με την γενική στρατηγική της επιχείρησης. Επιπλέον, καθιερώνεται ένα πρόγραμμα για τις κυριότερες δραστηριότητες της επιχείρησης όπως, π.χ. η είσοδος σε μια νέα αγορά ή η απόκτηση επιπρόσθετου παραγωγικού δυναμικού.

Τελικά, καθιερώνονται μέτρα επίδοσης για το σύστημα όπως απόδοση του κεφαλαίου, μερίδιο αγοράς, κέρδη, επίπεδα ανάπτυξης κ.α. Η γενική συλλογική στρατηγική χρησιμοποιείται για την καθοδήγηση της ανάπτυξης λειτουργικών προγραμμάτων: αρχικά το πρόγραμμα Πωλήσεων (Marketing), μετά το οικονομικό πρόγραμμα και το πρόγραμμα παραγωγής. Ο Προγραμματισμός Πωλήσεων (Marketing) προσδιορίζει τον τρόπο, με τον οποίο η επιχείρηση θα ανταγωνισθεί στην αγορά.

Στον προγραμματισμό των Πωλήσεων (Marketing) συμπεριλαμβάνονται προβλέψεις πωλήσεων σε χρηματικές μονάδες (π.χ. \$, Δρχ. κ.λ.π.), σε μονάδες προϊόντων καθώς και η περιγραφή των δικτύων διανομής. Παρομοίως, ο οικονομικός προγραμματισμός εξειδικεύει τον ρόλο που θα παίξουν τα χρηματοπιστωτικά μέσα στην συλλογική στρατηγική. Συμπεριλαμβάνεται προγραμματισμός για την ρευστότητα και τις βασικές δαπάνες. Τελικά, το πρόγραμμα παραγωγής εξειδικεύει ποιοί παραγωγικοί πόροι θα χρησιμοποιηθούν και πώς αυτοί οι πόροι θα αξιοποιηθούν. Το αποτέλεσμα του προγραμματισμού εκφράζεται σε ποσότητες παραγωγής σε ετήσια ή τριμηνιαία βάση για κάθε κύρια γραμμή παραγωγής. Το πρόγραμμα παράγει επίσης οδηγίες και πολιτικές,

εντός των οποίων αναμένεται να λειτουργήσει το σύστημα.

Στον επιχειρησιακό προγραμματισμό, οι αντικειμενικοί στόχοι του στρατηγικού προγράμματος παραγωγής μετατρέπονται σε λεπτομερή και εξειδικευμένα προγράμματα. Ένα από τα σημαντικότερα προγράμματα είναι ο *κύριος ή βασικός χρονοπρογραμματισμός παραγωγής* (Master Production Schedule–MPS). Ο MPS αναφέρεται σε εξειδικευμένες μορφές προϊόντος, ποσότητες και ημερομηνίες και συχνά είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ της διοίκησης και της παραγωγής. Είναι επίσης συνδετικός κρίκος μεταξύ της Διοίκησης Πωλήσεων (Marketing) και της παραγωγής και φέρει ισορροπία ανάμεσα στην ζήτηση της αγοράς και στους περιορισμούς της παραγωγικής δυναμικότητας.

Ο MPS αποτελεί μια από τις εισόδους στον *Προγραμματισμό Απαιτήσεων Υλικών* (Material Requirements Planning–MRP). Οι άλλοι είσοδοι του MRP συμπεριλαμβάνουν το τρέχον επίπεδο αποθέματος για κάθε τύπο του τελικού προϊόντος, τον *Πίνακα Υλικών* (Bill of Materials–BOM) καθώς και τον χρόνο παραγωγής ή χρόνο διεκπεραίωσης της παραγγελίας. Ένας πίνακας υλικών (BOM) κατηγοριοποιεί τα εξαρτήματα ή/και τα υλικά του τελικού προϊόντος και των υποπροϊόντων. Ο BOM και ο ρόλος του στον MRP θα περιγραφούν με περισσότερες λεπτομέρειες στην συνέχεια. Η έξοδος του MRP είναι ένα πρόγραμμα, το οποίο περιγράφει την απαιτούμενη ποσότητα κάθε μεμονωμένου συστατικού ή υποπροϊόντος που πρέπει να παραγγελθεί ή πρέπει να υπάρχει, ώστε να είναι δυνατή η έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας σε κάθε χρονική στιγμή. Επειδή η δημιουργία του προγράμματος υλικών απαιτεί την επεξεργασία μεγάλου αριθμού δεδομένων (στοιχείων), όπου συμπεριλαμβάνονται πολλοί τύποι εξαρτημάτων, με πιθανόν πολλά επί μέρους εξαρτήματα, χρησιμοποιούνται συνήθως υπολογιστικά προγράμματα, που καλούνται συστήματα MRP (MRP systems).

Τα συστήματα MRP υπολογίζουν απαιτήσεις υλικών στη βάση του απεριόριστου δυναμικού (infinite capacity), που σημαίνει, ότι οι χρόνοι παραγωγής και συναρμολόγησης, που λαμβάνονται για τα μεμονωμένα συστατικά και τα υποπροϊόντα, δεν περιλαμβάνουν τους χρόνους καθυστέρησης που οφείλονται στους πόρους του συστήματος.

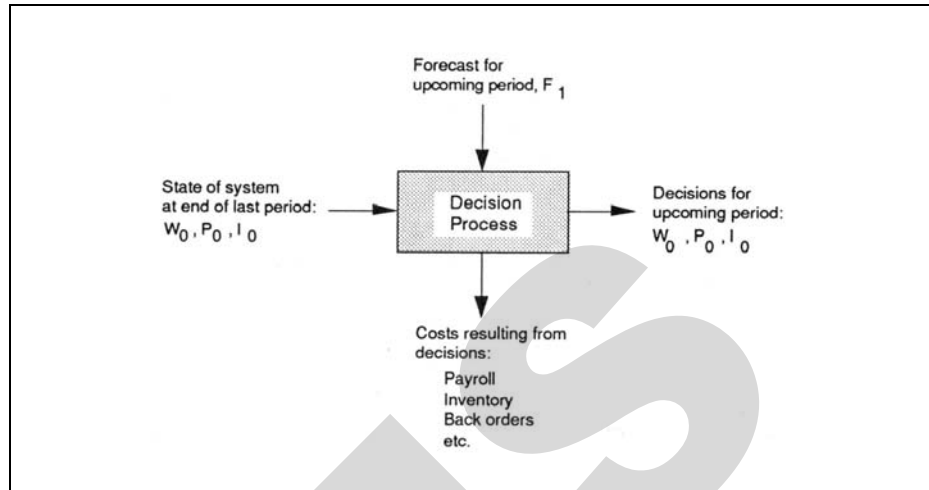
Καμμία από τις δραστηριότητες MPS και MRP δεν ενσωματώνει ζητήματα όπως η ύπαρξη επαρκούς δυναμικού στο σύστημα παραγωγής για την επίτευξη των απαιτούμενων επιπέδων παραγωγής. Αυτός είναι ο ρόλος του προγραμματισμού απαιτούμενου δυναμικού (capacity planning).

Ο προγραμματισμός (παραγωγικού) δυναμικού παρέχει απεικόνιση των αναγκών, που πηγάζουν από το προγραμματισμό των υλικών, έτσι ώστε να υλοποιηθούν έγκαιρα δραστηριότητες για την εξισορρόπηση των αναγκών δυναμικού με το διαθέσιμο δυναμικό. Γενικά, τέσσερις μεταβλητές επηρεάζουν την ισορροπία απαιτούμενου και διαθέσιμου δυναμικού:

- Επίπεδα αποθέματος.
- Αριθμός των βάρδιών (shifts).
- Η ποσότητα των πόρων που χρησιμοποιούνται στη παραγωγή.

- Ο αριθμός των παραγγελιών που έγιναν δεκτές για να παραχθούν.

Οι τρεις πρώτες μεταβλητές ρυθμίζουν το διαθέσιμο δυναμικό του συστήματος παραγωγής, ώστε τούτο να προσαρμοσθεί στο απαιτούμενο. Η τελευταία μεταβλητή δίδει το αποτέλεσμα του τροποποιημένου MPS, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό των υλικών και ρυθμίζει το απαιτούμενο δυναμικό σε σχέση με το διαθέσιμο.



Forecast for upcoming period F_1 = Προβλέψεις για την επόμενη περίοδο
 State of system at end of last period: W_0, P_0, I_0 = Κατάσταση του συστήματος στο τέλος της τελευταίας περιόδου
 Decision Process = Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων

Decisions for upcoming period: W_0, P_0, I_0 = Αποφάσεις για την επόμενη περίοδο
 Costs resulting from decisions = Κόστος που προκύπτουν από αποφάσεις για:
 Payroll = Μισθοδοσία
 Inventory = Αποθέματα
 Back orders = Καθυστερημένες παραγγελίες
 etc. = κ.λ.π.

Σχήμα 6.4 Λήψη Αποφάσεων Προγραμματισμού για σύστημα Απλής Κατάστασης μίας Φάσης (single stage) και Χρονικό Ορίζοντα μιας Περιόδου

Το τρίτο και τελευταίο επίπεδο του προγραμματισμού είναι ο λεπτομερής προγραμματισμός (detailed planning) και η εκτέλεσή του. Το σύστημα ελέγχου shop floor (shop floor control) είναι το κύριο λειτουργικό σύστημα στο επίπεδο αυτό. Το σύστημα shop floor control είναι υπεύθυνο για τον λεπτομερή προγραμματισμό της αλληλουχίας εκτέλεσης των παραγγελιών, καθώς και για την παρακολούθηση της εκτέλεσης των λεπτομερών προγραμμάτων όπως η εκμετάλλευση των μηχανών (π.χ. έλεγχος εισόδου/ εξόδου). Το σύστημα shop floor control είναι υπεύθυνο για την συλλογή δεδομένων από το shop floor και για την κατεύθυνση της ροής της πληροφορίας πίσω στο επίπεδο του επιχειρησιακού προγραμματισμού. Μετά την συγκέντρωση και ερμηνεία, η πληροφορία αυτή θα περάσει από το επιχειρησιακό επίπεδο στο στρατηγικό επίπεδο.

(Σχ. 6.4).

6.2.1 Βασικός Χρονοπρογραμματισμός Παραγωγής (Master Production Scheduling -MPS)

Ο Βασικός Χρονοπρογραμματισμός Παραγωγής (MPS) είναι ένας τύπος συγκεντρωτικού προγραμματισμού. Τυπικά ο MPS θεωρεί μόνο τα τελικά προϊόντα και όχι τα επιμέρους συστατικά από τα οποία αποτελούνται τα προϊόντα. Ο σκοπός του MPS είναι να αναπτύξει έναν συγκεντρωτικό χρονοπρογραμματισμό παραγωγής, ο οποίος θα ανταποκρίνεται σε εποχιακές απαιτήσεις για έτοιμα προϊόντα και ταυτόχρονα θα ελαχιστοποιεί το συσσωρευόμενο κόστος (incremental costs incurred). Είναι σημαντικό να προσδιορισθούν και να υπολογισθούν αυτά τα κόστη, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αξιολόγησης εναλλακτικών MPS στη βάση του ολικού κόστους. Μερικά σχετικά κόστη μπορεί να είναι:

- κόστος μισθοδοσίας
- κόστος υπερωριών, δεύτερης βάρδιας και υπεργολαβιών
- κόστος πρόσληψης και απόλυσης προσωπικού
- κόστος (backlog) πλεονάζοντος αποθέματος και καθυστερημένων εργασιών
- κόστος αλλαγών του ρυθμού παραγωγής

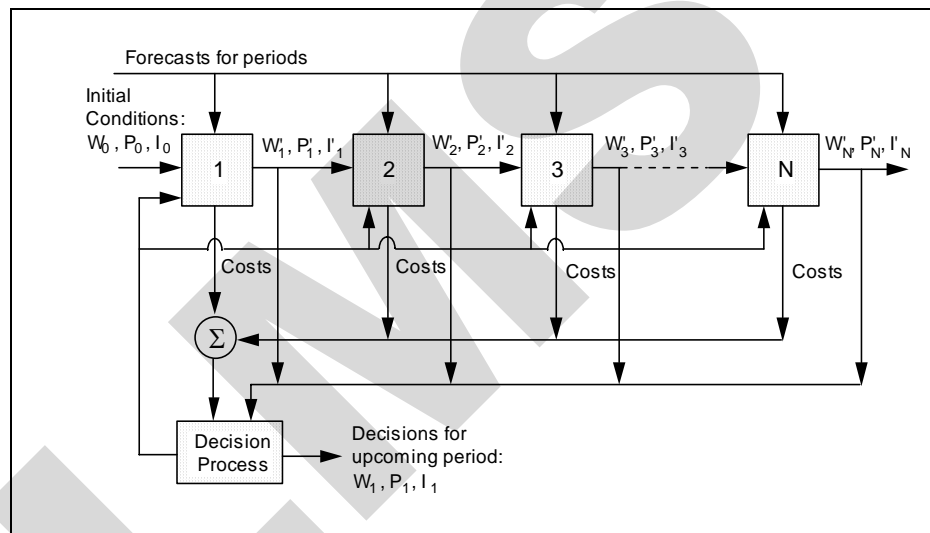
Τα κόστη, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο του συνολικού κόστους, θα πρέπει να μεταβάλλονται ανάλογα με τις αλλαγές στις μεταβλητές απόφασης. Σε ένα MPS, αυτές οι μεταβλητές απόφασης δηλώνουν συνήθως το μέγεθος του εργατικού δυναμικού που θα απασχοληθεί, τον αριθμό των υπερωριών που θα προγραμματισθούν και πόσες μονάδες από κάθε τελικό προϊόν θα παραχθούν κατά την διάρκεια ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος, μέσα σε έναν ορίζοντα προγραμματισμού. Ωστόσο, η συμπεριφορά του κόστους, σε σχέση με τις αλλαγές σε αυτές τις μεταβλητές απόφασης, δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθεί. Συχνά γίνονται προσεγγίσεις υποθέτοντας, ότι τα κόστη είναι γραμμικές ή δευτεροβάθμιες συναρτήσεις των κατάλληλων μεταβλητών απόφασης. Οι προσεγγίσεις αυτές επιτρέπουν την χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης, όπως ο γραμμικός προγραμματισμός.

Η απλούστερη δομή για το MPS παρουσιάζεται από το σύστημα απλής κατάστασης μίας φάσης (single stage), (Σχ. 6.4 [13]), στο οποίο ο ορίζοντας προγραμματισμού έχει διάρκεια μια μόνο περίοδο. Η κατάσταση του συστήματος στο τέλος της προηγούμενης περιόδου, ορίζεται από το μέγεθος του συνολικού εργατικού δυναμικού W_0 , τον ρυθμό παραγωγής P_0 και το επίπεδο των αποθεμάτων I_0 . Οι τελικές συνθήκες κατάστασης για την μία περίοδο αποτελούν τις αρχικές συνθήκες για την επόμενη περίοδο.

Μια πρόβλεψη των απαιτήσεων σε τελικά προϊόντα για την επόμενη περίοδο καταλήγει, μέσω μιας διαδικασίας, σε αποφάσεις, οι οποίες προσδιορίζουν

το μέγεθος του εργατικού δυναμικού και τού ρυθμού παραγωγής για την επόμενη περίοδο. Το υπολογιζόμενο τελικό απόθεμα σε αυτή την περίπτωση είναι $I_l = I_o + P_l - F_l$, όπου F_l είναι οι προβλεπόμενες πωλήσεις.

Ο αντικειμενικός σκοπός της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τον προγραμματισμό ενός συστήματος πολλαπλών φάσεων (multi stage) (Σχ. 6.5 [13]) είναι ο ίδιος με αυτόν του συστήματος μίας φάσης, δηλαδή να ληφθεί απόφαση σχετικά με το μέγεθος του εργατικού δυναμικού και του ρυθμού παραγωγής που απαιτούνται για την επόμενη περίοδο. Ωστόσο, η απόφαση για την επόμενη περίοδο επηρεάζεται και από τις προβλέψεις για την περίοδο αυτή και επομένως η διαδικασία λήψης αποφάσεων πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη την επίπτωση στο κόστος, που θα προκαλείται από τις διαδοχικές αποφάσεις. Οι συνδυαστικοί κρίκοι μεταξύ των διαφόρων φάσεων είναι οι τιμές των παραμέτρων W , P και I στο τέλος της μιας περιόδου και στην αρχή της επόμενης. Ο βρόγχος ανάδρασης της διαδικασίας λήψης αποφάσεων μπορεί να περιλαμβάνει μερικές επαναληπτικές ή εμπειρικές (trial and error) διαδικασίες, έτσι ώστε να προκύπτει μία λύση.



Forecasts for periods: Προβλέψεις περιόδων
Initial conditions: W_0, P_0, I_0 = Αρχικές συνθήκες:
 W_0, P_0, I_0
Costs = Κόστη

Decision Process = Διαδικασία λήψης αποφάσεων
Decisions for upcoming period: W_1, P_1, I_1 =
Αποφάσεις για την επόμενη περίοδο: W_1, P_1, I_1

Σχήμα 6.5 Λήψη Αποφάσεων Προγραμματισμού για Σύστημα Πολλαπλών Φάσεων και για Χρονικό Ορίζοντα Προγραμματισμού N Περιόδων

Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις για λήψη αποφάσεων MPS. Οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούν μια ποικιλία εργαλείων, από την επιχειρησιακή έρευνα και την τεχνητή νοημοσύνη, συμπεριλαμβανομένου του μαθηματικού προγραμματισμού, του δυναμικού προγραμματισμού και της α-

ναζήτησης [13].

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Month	Production Days	Cumulative Production Days	Expected Production Requirements	Cumulative Production Requirements	Required Buffer Inventories	Cumulative Maximum Production Requirements col.5 + col.6	Production Requirements per Production Day col.2 x col.6	Production Requirements per Production Day col.4 / col.2
January	22	22	5000	5000	2800	7800	61600	227.3
February	20	42	4000	9000	2500	11500	50000	200
March	23	65	4000	13000	2500	15500	57500	173.9
April	19	84	5000	18000	2800	20800	53200	263.2
May	22	106	7000	25000	3200	28200	70400	318.2
June	22	128	9000	34000	3500	37500	77000	409.1
July	20	148	11000	45000	4100	49100	82000	550
August	23	171	9000	54000	3500	57500	80500	391.3
September	11	182	6500	60500	3000	63500	33000	590.9
October	22	204	6000	66500	3000	69500	66000	272.7
November	22	226	5000	71500	2800	74300	61600	227.3
December	18	244	5000	76500	2800	79300	50400	277.8
							743200	

^a Average Buffer Inventory = $743200/244 = 3045.9$ units

^a Average Buffer Inventory = Μέσο αποθηκευμένο προϊόν
 Month=Μήνας
 Production days = Παραγωγικές ημέρες
 Cumulative Production days = Συνολικές παραγωγικές ημέρες
 Expected Production Requirements = Αναμενόμενες απαιτήσεις παραγωγής

Cumulative Production Requirements = Συνολικές απαιτήσεις παραγωγής
 Required Buffer Inventories = Απαιτούμενη ποσότητα αποθεμάτων
 Cumulative Maximum Production Requirements = Συνολικές μέγιστες απαιτήσεις παραγωγής
 Production requirements per Production Day = Απαιτήσεις Παραγωγής ανά ημέρα Παραγωγής

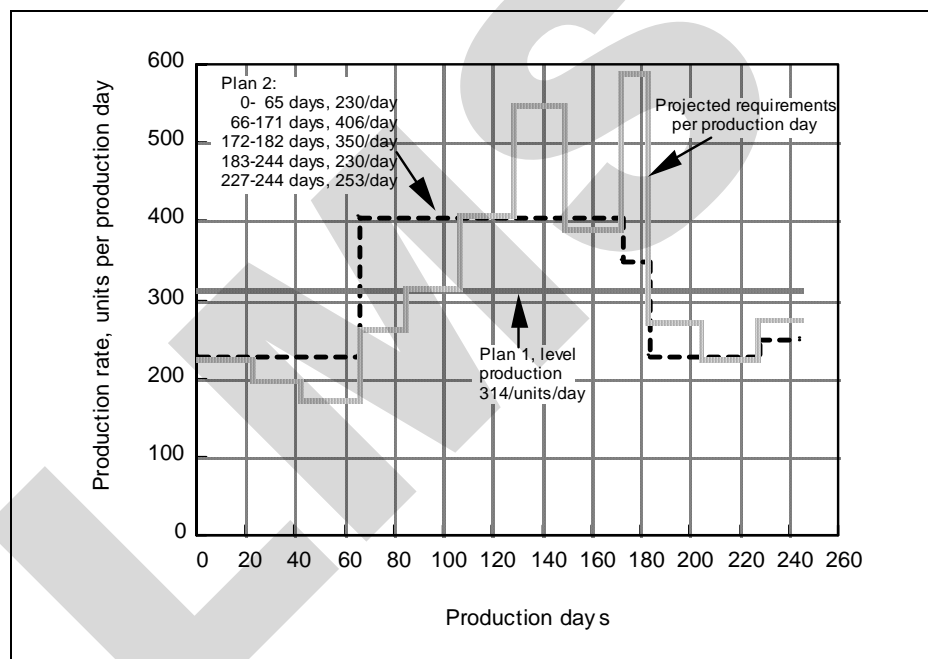
Πίνακας 6.1 Πρόβλεψη Απαιτήσεων Παραγωγής και Αποθέματος Αποθηκών: Συνολικές Απαιτήσεις, Μέσο Απόθεμα αποθηκών και Συνολικές Μέγιστες Απαιτήσεις Παραγωγής

Για την παρακολούθηση του αποτελέσματος των διαφορετικών αποφάσεων σε σχέση με τον Βασικό Χρονοπρογραμματισμό Παραγωγής, θεωρούμε ένα αριθμητικό παράδειγμα. Υποθέτουμε, ότι το προγραμματισμένο παραγωγικό δυναμικό ενός εργοστασίου είναι 350 μονάδες προϊόντος την ημέρα, ενώ μπορεί να επιτευχθεί και συμπληρωματικό δυναμικό μέχρι το μέγιστο των 410 μονάδων την ημέρα μέσω υπερωριών και με ένα επιπρόσθετο κόστος 10\$ ανά μονάδα. Η στήλη 6 του Πίνακα 6.1 δείχνει τις αποθηκευμένες ποσότητες στους ενδιάμεσους χώρους αποθήκευσης, οι οποίες αντιστοιχούν στα ελάχιστα απαιτούμενα αποθέματα. Ο σκοπός τους είναι να χρησιμοποιηθούν, όταν οι απαιτήσεις της αγοράς γίνουν μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Εάν τα αποθέματα για κάθε μήνα προστεθούν στις συνολικές απαιτήσεις παραγωγής της στήλης 5, τότε προκύπτουν, ως αποτέλεσμα, οι συνολικές μέγιστες απαιτήσεις παραγωγής, οι οποίες εμφανίζονται στην στήλη 7. Η στήλη 8 παρέχει την βάση τόσο για τον υπολογισμό των απαιτούμενων ποσοτήτων ενδιάμεσων απο-

θεμάτων με την βοήθεια των παραγωγικών ημερών, όσο και για τον υπολογισμό του μέσου όρου αποθεμάτων, που στο παράδειγμά μας είναι 3045,9 μονάδες και παρουσιάζεται στην υποσημείωση του πίνακα.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να θεωρήσουμε τα ακόλουθα τρία εναλλακτικά Βασικά Χρονοπρογράμματα Παραγωγής (MPS), τα οποία θα ονομάσουμε Πρόγραμμα 1, 2 και 3 (Plan 1, 2, 3):

Πρόγραμμα 1—Level Production. Το απλούστερο πρόγραμμα παραγωγής (production plan) προκύπτει, εάν θέσουμε ένα μέσο επίπεδο απόδοσης (output) το οποίο να ικανοποιεί τις ετήσιες απαιτήσεις παραγωγής. Οι συνολικές ετήσιες απαιτήσεις παραγωγής παρουσιάζονται στον τελευταίο αριθμό των αθροιστικών απαιτήσεων προγραμματισμού της στήλης 5 του πίνακα 6.1 και είναι 76.500 μονάδες. Εφ' όσον οι εργάσιμες ημέρες είναι 244, ένας ημερήσιος μέσος όρος της απόδοσης (output) του συστήματος, ίσος με $76.500/244=314$ μονάδες προϊόντος, θα πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις.



Production rate = Ρυθμός Παραγωγής
Units per production day = Μονάδες ανά ημέρα παραγωγής
Projected requirements per production day = Σχεδιαζόμενες απαιτήσεις ανά ημέρα

παραγωγής
Plan 1 = Πρόγραμμα 1
314/units/day 314/μονάδες/ημέρα
Production days = Παραγωγικές ημέρες

Σχήμα 6.6 Σύγκριση δύο Προγραμμάτων Παραγωγής που ικανοποιούν τις απαιτήσεις Παραγωγής

Η στρατηγική Level Production είναι απλή και συνίσταται στην συσσώρευση των εποχιακών αποθεμάτων κατά την διάρκεια μηνών με χαμηλές απαιτήσεις προϊόντων, με σκοπό την χρήση τους σε μήνες υψηλών απαιτήσεων. Το πρόγραμμα Level Production, σε σχέση με τις απαιτήσεις παραγωγής ανά ημέρα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 [13] σαν Πρόγραμμα 1 (Plan 1).

Οι απαιτήσεις αποθέματος για το Πρόγραμμα 1 έχουν υπολογισθεί στον πίνακα 6.2 [13]. Η παραγωγή για κάθε μήνα υπολογίζεται στην στήλη 3 και αθροίζεται στην στήλη 4, έτσι ώστε να παράγει ένα χρονοπρόγραμμα για τις μονάδες προϊόντος, οι οποίες θα είναι διαθέσιμες κάθε μήνα, εκκινώντας από μια αρχική ποσότητα 2800 μονάδων ως απαιτούμενη ποσότητα ενδιάμεσων αποθεμάτων για τον Ιανουάριο. Κατόπιν, συγκρίνοντας τις διαθέσιμες μονάδες προϊόντων στην στήλη 4 με το χρονοπρόγραμμα των αθροιστικών μέγιστων απαιτήσεων της στήλης 5, μπορούμε να δημιουργήσουμε το χρονοπρόγραμμα των εποχιακών αποθεμάτων στην στήλη 6. Το νόημα των αρνητικών εποχιακών αποθεμάτων είναι, ότι το πρόγραμμα απαιτεί χρήση των αποθεμάτων των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων. Τον Αύγουστο, 1006 μονάδες θα χρησιμοποιηθούν από το προγραμματισμένο απόθεμα των 3500 μονάδων, ενώ τον Σεπτέμβριο, το προγραμματισμένο απόθεμα θα ξεπερασθεί κατά 552 μονάδες. Με άλλα λόγια, το πρόγραμμα θα απαιτούσε είτε την καθυστέρηση εκτέλεσης παραγγελιών είτε αναμενόμενες απώλειες από την μη πώληση των 552 μονάδων προϊόντος τον Σεπτέμβριο. Το πρόγραμμα επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα στους επόμενους μήνες και ικανοποιεί τις συνολικές απαιτήσεις, αλλά δίνει συνολικά ετήσια ελλείμματα 7738 ($1006+3552+2664+536$) μονάδων.

Το απόθεμα των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, εφ' όσον ο αποθηκευτικός χώρος είχε σχεδιασθεί έτσι ώστε να μπορεί να απορροφήσει απρόβλεπτες αυξήσεις των πωλήσεων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν, οι αποθηκευτικοί χώροι χάνουν την λειτουργικότητά τους, δηλαδή δεν λειτουργούν για τον λόγο που σχεδιάστηκαν. Τα αρνητικά εποχιακά αποθέματα μπορούν να αντιμετωπισθούν αυξάνοντας το αρχικό απόθεμα με βάση το περισσότερο αρνητικό εποχιακό αποτέλεσμα αποθέματος, το οποίο είναι -3552 μονάδες τον Σεπτέμβριο. Αυτό το νέο αρχικό επίπεδο αποθέματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού χρονοπρογραμματισμού των αθροιστικών μονάδων προϊόντος, που είναι διαθέσιμες στην στήλη 4 του πίνακα 6.2, κατά 3552 μονάδες. Επομένως, ο μέσος όρος των εποχιακών αποθεμάτων θα αυξηθεί κατά 3552 κομμάτια.

Ο μέσος όρος των εποχιακών αποθεμάτων για το Πρόγραμμα 1 υπολογίζεται στον Πίνακα 6.2 ως 3147,6 μονάδες, σταθμισμένος με βάση τις ημέρες παραγωγής, υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούνται τα αποθέματα των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων και τα ελλείμματα διαθέσιμου προϊόντος είναι όπως στην στήλη 6. Αν αναθεωρηθεί το πρόγραμμα, έτσι ώστε τα αποθέματα των ενδιάμεσων χώρων να μη χρησιμοποιούνται, ο μέσος όρος των εποχιακών αποθεμάτων θα ήταν $3147,6 + 3552 = 6699,6$ μονάδες. Υποθέτοντας, ότι το κόστος αποθήκευσης είναι \$50 ανά μονάδα και ανά έτος, και ότι τα κόστη των ελλειμμάτων είναι 25\$ ανά μονάδα προϊόντος, μπορούν να υπολογισθούν τα

σχετικά κόστη των εναλλακτικών λύσεων του Προγράμματος 1 (Plan 1). Εάν τα αρχικά αποθέματα είναι μόνο 2800 μονάδες, τα ετήσια κόστη αποθεμάτων είναι μόνο $50 \times 3147,6 = \$157.380$ και το κόστος έλλειψης διαθέσιμου προϊόντος είναι $25 \times 7738 = \$193.450$. Σύμφωνα με αυτούς τους υπολογισμούς το συνολικό αυξητικό (incremental) κόστος είναι $\$350.830$.

Month	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Production Days	Production Rate Units/day	Production per Month col.1 x col.2	Cumulative units Available. Cumulative Production + Beg. Inventory (2800)	Cumulative Maximum Requirements. col.7 of Table 6.2	Seasonal Inventory* col.4 - col.5
January	22	314	6908	9708	7800	1908
February	20	314	6280	15988	11500	4488
March	23	314	7222	23210	15500	7710
April	19	314	5966	29176	20800	8376
May	22	314	6908	36084	28200	7884
June	22	314	6908	42992	37500	5492
July	20	314	6280	49272	49100	172
August	23	314	7222	56494	57500	-1006
September	11	314	3454	59948	63500	-3552
October	22	314	6908	66856	69500	-2644
November	22	314	6908	73764	74300	-536
December	18	314	5652	79416	79300	116

*Average seasonal Inventory (positive values in column 7/days) = $768,010/244 = 3147.6$ units.

Month = Μήνας

Production days = Παραγωγικές ημέρες

Production Rate Units/day = Ρυθμός παραγωγής σε μονάδες/ημέρα

Production per Month = Παραγωγή ανά μήνα

Cumulative units Available. Cumulative

Production +Beg. Inventory = Διαθέσιμες συνολικές μονάδες. Συνολική Παραγωγή +

Αρχικό Απόθεμα

Cumulative maximum requirements = Σύνολο μέγιστων απαιτήσεων

Seasonal Inventory = Εποχιακό Απόθεμα

Average seasonal Inventory (positive values in column 7/days) = Μέση εποχιακή απόθεμα (θετικές τιμές στη στήλη 7/ημέρες)

Πίνακας 6.2 Υπολογισμός Απαιτήσεων σε Εποχιακά Αποθέματα για το Πρόγραμμα 1 (Plan1)

Συγκριτικά, αν το απόθεμα των αποθηκευτικών χώρων δεν χρησιμοποιηθεί, ο μέσος όρος εποχιακών αποθεμάτων είναι 6699,6 μονάδες με κόστος $\$50 \times 6699,6 = \334.980 . Με τα δεδομένα αυτά για τα κόστη αποθήκευσης και έλλειψης διαθέσιμου προϊόντος, είναι προφανώς περισσότερο οικονομικό να γίνεται ο προγραμματισμός στην βάση των μεγαλύτερων αποθεμάτων. Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί να ισχύει το αντίστροφο. Αν το κόστος της έλλειψης διαθέσιμων προϊόντων είναι μόνο $\$20$ ανά μονάδα, θα ήταν ελάχιστα πιο οικονομικό να αναλάβουμε τον κίνδυνο. Εναλλακτικά, αν τα κόστη αποθήκευσης ήταν $\$62$ ανά μονάδα και έτος και τα κόστη των ελλειμμάτων ήταν $\$25$ ανά μονάδα προϊόντος, τότε το ισοζύγιο του κόστους θα ήταν επίσης υπέρ της ανάληψης του κινδύνου συσσώρευσης ελλειμμάτων διαθέσιμου προϊόντος.

Φυσικά, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, οι οποίοι εμπεριέχονται στην απόφαση που πρέπει να ληφθεί για το αν θα αναλάβουμε τον κίνδυνο έλλειψης διαθέσιμου προϊόντος, όπως το ενδεχόμενο να χαθεί μόνιμα κάποιο μερίδιο αγοράς.

Το Πρόγραμμα 1 (Plan 1) έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Κατ' αρχήν, δεν απαιτεί την πρόσληψη ή απόλυση προσωπικού. Παρέχει σταθερή απασχόληση για τους εργαζομένους και θα υποστηριζόταν από τις εργατικές οργανώσεις. Επίσης, ο προγραμματισμός είναι απλός: 314 μονάδες την ημέρα. Ωστόσο, από την άποψη του κόστους παραγωγής, το Πρόγραμμα 1, αποτυγχάνει να λάβει υπ' όψη εάν υπάρχει ή όχι οικονομικό πλεονέκτημα στον συσχετισμό των μεγάλων εποχιακών αποθεμάτων και στο κόστος της έλλειψης διαθέσιμου προϊόντος, με το κόστος υπερωριών ή/και τα κόστη που προκύπτουν από την πρόσληψη ή απόλυση προσωπικού, ώστε να ικανοποιηθούν οι εποχιακά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις παραγωγής.

Πρόγραμμα 2 (Plan 2) – Με την χρήση Πρόσληψης/Απόλυσης προσωπικού και Υπερωριών. Ας παρατηρήσουμε ότι στο Διάγραμμα 6.6 το κανονικό προγραμματισμένο δυναμικό παραγωγής επιτρέπει παραγωγή 350 μονάδων ανά ημέρα και έχει επιπλέον δυνατότητα παραγωγής 60 μονάδων ανά ημέρα, οι οποίες μπορούν να παραχθούν με την χρήση υπερωριών. Οι μονάδες προϊόντος που παράγονται κατά τις υπερωρίες έχουν, στο παράδειγμά μας, ένα επιπρόσθετο κόστος \$10 ανά μονάδα προϊόντος.

Έως το κανονικό προγραμματισμένο δυναμικό παραγωγής των 350 μονάδων την ημέρα, μπορούμε να αυξήσουμε ή να μειώσουμε την παραγωγή (output), προσλαμβάνοντας ή απολύοντας προσωπικό. Ένας εργάτης, που προσλαμβάνεται ή απολύεται, επηρεάζει την καθαρή παραγωγή με 1 μονάδα προϊόντος ανά ημέρα. Το κόστος της αλλαγής των επιπέδων παραγωγής με αυτόν τον τρόπο είναι \$200 ανά εργάτη που έχει προσληφθεί ή απολυθεί, λόγω της πρόσληψης, εκπαίδευσης, αποζημίωσης και άλλων σχετικών εξόδων.

Το Πρόγραμμα 2 (Plan 2), προσφέρει τις επιπρόσθετες εναλλακτικές λύσεις αλλαγής του βασικού ρυθμού παραγωγής και της χρήσης υπερωριών όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις. Το Πρόγραμμα 2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 και περιέχει δύο βασικά επίπεδα απασχόλησης: δηλαδή, οι εργαζόμενοι να παράγουν σε κανονικούς ρυθμούς 230 και 350 μονάδες/ημέρα. Επιπρόσθετες μεταβολές επιτυγχάνονται μέσω της χρήσης υπερωριών, όταν είναι απαραίτητο. Αυτός ο σχεδιασμός έχει το ακόλουθο χρονοπρόγραμμα:

- | | |
|---------------|---|
| 0-65 ημέρες | • Παραγωγή 230 μονάδων/ ημέρα |
| 66-171 ημέρες | • Παραγωγή 406 μονάδων/ ημέρα (πρόσληψη 120 εργατών για να αυξηθεί ο βασικός ρυθμός παραγωγής χωρίς υπερωρίες από 230 σε 350 μονάδες/ημέρα.
Παραγωγή 56 μονάδων/ημέρα από υπερωρίες. |

- 172-182 ημέρες • Παραγωγή 350 μονάδων/ ημέρα (χωρίς υπερωρίες)
- 183-226 ημέρες • Παραγωγή 230 μονάδων/ημέρα (απόλυση 120 εργατών για να μειωθεί και πάλι ο βασικός ρυθμός παραγωγής από 350 σε 230 μονάδες/ημέρα).
- 227-244 ημέρες • Παραγωγή 253 μονάδων/ημέρα (23 μονάδες/ημέρα από υπερωρίες).

Month	(1)	(2)	(3)	(4)
	Production Days	Production Rate Units/day	Units of Production Rate Change.	Units Produced at Overtime Production Rates Greater Than 350 or 230 x col. 1
January	22	230	0	0
February	20	230	0	0
March	23	230	0	0
April	19	406	120	1064
May	22	406	0	1232
June	22	406	0	1232
July	20	406	0	1120
August	23	406	0	1288
September	11	350	0	0
October	22	230	120	0
November	22	230	0	0
December	18	253	0	414
			240	6350

Production rate change costs = $240 \times 200 =$ \$48,000
 (A change in the basic rate of one unit requires the hiring or layoff of one worker at \$200 each).
 Overtime costs at \$10 extra per unit = $10 \times 6,350 =$ \$63,500
 Seasonal Inventory cost (2356.4 units at \$50 per unit per year) = $50 \times 2356.4 =$ \$117,820
 Total incremental cost = \$229,320

Month = Μήνας
 Production days = Παραγωγικές ημέρες
 Production Rate Units/day = Ρυθμός παραγωγής σε μονάδες/ημέρα
 Units of Production Rate Change = Αλλαγή του ρυθμού παραγωγής σε μονάδες
 Units Produced at Overtime Production Rates Greater Than 350 or 230 = Μονάδες που παρήχθησαν με υπερωριακή εργασία και παραγωγικό ρυθμό μεγαλύτερο από 350 ή 230 μονάδες
 Production rate change costs = Κόστος αλλαγής του ρυθμού παραγωγής

(A change in the basic rate of one unit requires the hiring or layoff of one worker at \$200 each)
 = Μία αλλαγή στο βασικό ρυθμό παραγωγής κατά μία μονάδα απαιτεί την απόλυση ή πρόσληψη ενός εργαζόμενου με κόστος 200\$
 Overtime costs at \$10 extra per unit = Κόστος υπερωρίας 10\$ επιπλέον για κάθε μονάδα προϊόντος
 Seasonal Inventory cost = Εποχιακό κόστος αποθεμάτων
 Total incremental cost = Συνολικό κόστος προσαύξησης

Πίνακας 6.3 Υπολογισμός Κόστους Προσαύξησης (incremental) για το Πρόγραμμα 2 (Plan 2)

Σαν αντιστάθμιση της μείωσης των αποθεμάτων, πρέπει να προσληφθούν 120 εργάτες τον Απρίλιο και να απολυθεί ο ίδιος αριθμός τον Οκτώβριο. Επίσης, έχει παραχθεί ένας σημαντικός αριθμός μονάδων προϊόντος με υπερωρίες από

τον Απρίλιο μέχρι τον Σεπτέμβριο, καθώς και τον Δεκέμβριο. Τα κόστη του Προγράμματος 2 αθροίζονται στον Πίνακα 6.3 [13]. Η συνολική αύξηση του κόστους του Προγράμματος 2 είναι \$229.320, το οποίο αντιστοιχεί στο 65% του Προγράμματος 1 και στο 68% του ίδιου Προγράμματος χωρίς το έλλειμμα διαθέσιμου προϊόντος.

Το Πρόγραμμα 2 είναι περισσότερο οικονομικό, αλλά απαιτεί αυξομειώσεις στο μέγεθος του εργατικού δυναμικού. Πιθανώς, μερικές από τις μεταβολές μπορεί να απορροφηθούν με την χρήση περισσότερων υπερωριών, ενώ σε μερικούς τύπους βιομηχανιών μπορεί να χρησιμοποιηθούν υπεργολαβίες για να καλύψουν τις μέγιστες απαιτήσεις.

Πρόγραμμα 3 (Plan 3). Με χρήση Υπεργολαβίας. Ένα τρίτο εναλλακτικό πρόγραμμα είναι το Πρόγραμμα 3, το οποίο περιλαμβάνει μικρότερες διακυμάνσεις του εργατικού δυναμικού χρησιμοποιώντας υπερωρίες, εποχιακά αποθέματα και υπεργολαβίες για την απορρόφηση των διακυμάνσεων των απαιτήσεων και έχει το ακόλουθο χρονοπρόγραμμα:

0- 84 ημέρες	• Παραγωγή 250 μονάδων/ημέρα
85-128 ημέρες	• Παραγωγή 350 μονάδων/ημέρα (πρόσληψη 100 εργατών για να αυξηθεί ο βασικός ρυθμός παραγωγής χωρίς υπερωρίες από 250 σε 350 μονάδες/ημέρα)
129-148 ημέρες	• Παραγωγή 410 μονάδων/ημέρα (60 μονάδες/ημέρα παράγονται από υπερωρίες, και 1700 μονάδες από υπεργολαβία)
149-171 ημέρες	• Παραγωγή 370 μονάδων/ημέρα (20 μονάδες/ημέρα παράγονται από υπερωρίες)
172-182 ημέρες	• Παραγωγή 410 μονάδων/ημέρα (60 μονάδες/ημέρα παράγονται από υπερωρίες, και 1380 μονάδες από υπεργολαβία)
183-204 ημέρες	• Παραγωγή 273 μονάδων/ημέρα (23 μονάδες/ημέρα παράγονται από υπερωρίες, απόλυση 100 εργατών για να μειωθεί το επίπεδο απασχόλησης από το βασικό ρυθμό των 350 σε 250 μονάδες/ημέρα.
205-244 ημέρες	• Παραγωγή 250 μονάδων/ημέρα

Το Πρόγραμμα 3 μειώνει τα εποχιακά αποθέματα ακόμα περισσότερο, σε έναν μέσο όρο 1.301 μονάδων. Η διακύμανση της απασχόλησης είναι ηπιότερη, περιλαμβάνοντας πρόσληψη και απόλυση μόνο 100 εργατών. Μόνο 2.826

μονάδες παρήχθησαν με την χρήση υπερωριών, ενώ ένα σύνολο 3.080 μονάδων παρήχθησαν με την χρήση υπεργολαβίας και επιπρόσθετο κόστος \$15 ανά μονάδα. Στον Πίνακα 6.4 [13] παρουσιάζονται τα κόστη και για τα τρία Προγράμματα. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, το Πρόγραμμα 3 είναι το περισσότερο οικονομικό. Τα αποθέματα των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων είναι σχεδόν ίδια για όλα τα προγράμματα και κατά συνέπεια τα κόστη τους δεν συμπεριλήφθησαν σαν προσαυξητικά (Incremental) κόστη. Παρά το γεγονός, ότι το Πρόγραμμα 3 περιλαμβάνει λιγότερες διακυμάνσεις απασχόλησης από το Πρόγραμμα 2, μπορεί να θεωρηθεί ως περισσότερο αυστηρό. Υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης και άλλων προγραμμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν λιγότερες διακυμάνσεις και ο προσδιορισμός του κόστους τους γίνεται με τον ίδιο τρόπο.

Costs	Plan 1		Plan 2 (\$)	Plan 3 (\$)
	With Shortages (\$)	Without Shortages (\$)		
Shortages ^a	193,450	—	—	—
Seasonal Inventory ^b	157,380	334,980	117,820	65,070
Labor turnover ^c	—	—	48,000	40,000
Overtime ^d	—	—	63,500	28,260
Subcontracting ^e	—	—	—	46,200
Totals	350,830	334,980	229,320	179,530

^aShortages cost \$25 per unit.

^bInventory carrying cost are \$50 per unit per year.

^cAn increase or decrease in the basic production rate of one unit requires the hiring or layoff of one employee at a hiring and training, or severance, cost of \$200 each.

^dUnits produced at overtime rates cost an additional \$10 per unit.

^eUnit subcontracted cost an additional \$15 per unit.

Plan = Πρόγραμμα

Costs = Κόστη

With Shortages = Με ελλείματα

Without Shortages = Χωρίς ελλείματα

Seasonal Inventory = Εποχιακό απόθεμα

Overtime = Υπερωρία

Subcontracting = Υπεργολαβία

Totals = Σύνολα

Shortages cost \$25 per unit = Κόστος
ελλείματος διαθέσιμου προϊόντος: \$25 ανά
μονάδα προϊόντος

Inventory carrying cost are \$50 per unit per year
= Κόστος αποθεμάτων: \$50 ανά μονάδα και
ανά έτος

An increase or decrease in the basic production

rate of one unit requires the hiring or layoff of
one employee at a hiring and training, or
severance, cost of \$200 each = Αύξηση ή
μείωση στο βασικό ρυθμό παραγωγής κατά μία
μονάδα απαιτεί την πρόσληψη ή την απόλυση
ενός εργαζόμενου, με κόστος πρόσληψης και
εκπαίδευσης, ή αποζημίωσης \$200 ανά
εργαζόμενο

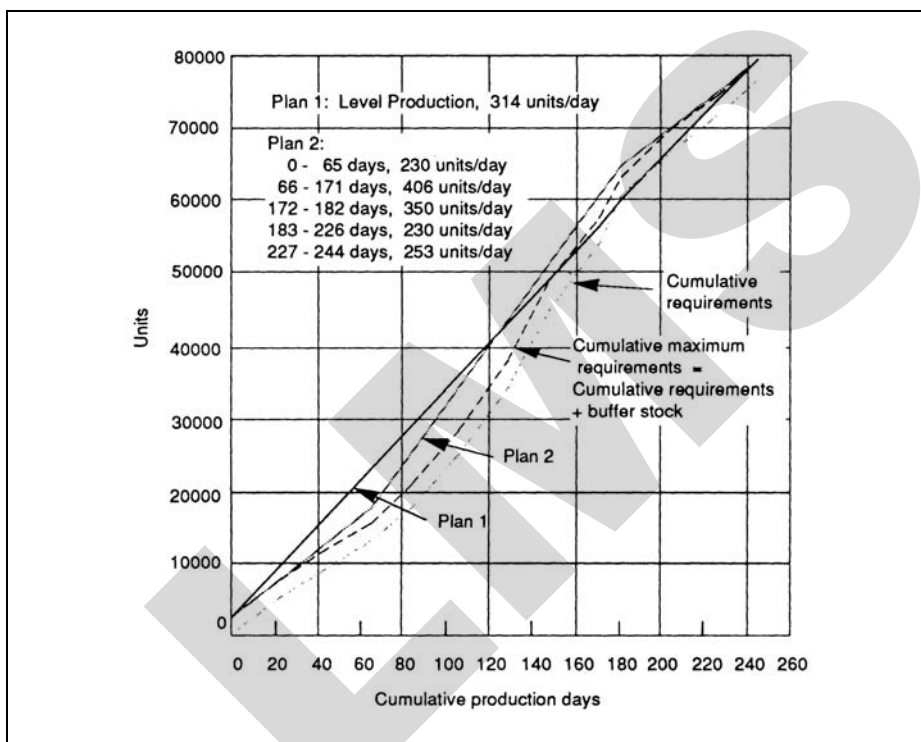
Units produced at overtime rates cost an
additional \$10 per unit = Παραγόμενες μονάδες
προϊόντος με υπερωρίες κοστίζουν επιπλέον
\$10 ανά μονάδα προϊόντος

Unit subcontracted cost an additional \$15 per unit
= Επιπρόσθετο κόστος υπεργολαβίας είναι \$15
ανά μονάδα προϊόντος

Πίνακας 6.4 Σύγκριση Κόστους Εναλλακτικών Προγραμμάτων Παραγωγής

Παρά το γεγονός ότι το Σχήμα 6.6 [13] παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αλ-

λαγών του ρυθμού παραγωγής αρκετά καθαρά, στην πράξη είναι πιο εύκολη η χρήση των αθροιστικών γραφημάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7 [13]. Η διαδικασία είναι να απεικονισθούν γραφικά πρώτα οι αθροιστικές απαιτήσεις παραγωγής. Η καμπύλη των μέγιστων αθροιστικών απαιτήσεων αντιστοιχεί τότε στην προηγούμενη καμπύλη, με την πρόσθεση των απαιτούμενων αποθεμάτων για κάθε χρονική περίοδο. Το αθροιστικό γράφημα των μέγιστων απαιτήσεων μπορεί κατόπιν να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την δημιουργία εναλλακτικών προτεινόμενων προγραμμάτων παραγωγής. Οποιοδήποτε πρόγραμμα παραγωγής, που είναι εφαρμόσιμο, πρέπει να βρίσκεται εξ' ολοκλήρου πάνω από την γραμμή των μέγιστων συνολικών απαιτήσεων. Οι κάθετες αποστάσεις μεταξύ των προτεινόμενων καμπυλών και των καμπυλών των μέγιστων συνολικών απαιτήσεων, αναπαριστούν την συσσώρευση του εποχιακού αποθέματος για κάθε πρόγραμμα παραγωγής.



Plan 1: Level Production, 314 units/day =
 Πρόγραμμα 1: Level Production, 314 μονάδες/
 ημέρα
 Units = Μονάδες
 Cumulative requirements = Άθροισμα απαιτήσεων
 [Cumulative maximum requirements = Cumulative

requirements+buffer stock] = Μέγιστο άθροισμα
 απαιτήσεων = Άθροισμα απαιτήσεων+απόθεμα
 αποθηκευτικών χώρων
 Cumulative production days = Άθροισμα
 παραγωγικών ημερών

Σχήμα 6.7 Συγκεντρωτικά Γραφήματα των Απαιτήσεων και των Εναλλακτικών προτεινόμενων Προγραμμάτων

Οι γραφικές μέθοδοι οι οποίες συζητήθηκαν παραπάνω, είναι απλές και έχουν το πλεονέκτημα, ότι επιτρέπουν την απεικόνιση εναλλακτικών προγραμμάτων μέσα σε έναν ευρύ ορίζοντα προγραμματισμού. Οι δυσκολίες με τις γραφικές μεθόδους, προσδιορίζονται στην στατική φύση του μοντέλου. Επί πλέον, η διαδικασία δεν δημιουργεί από μόνη της ικανοποιητικά προγράμματα αλλά απλά συγκρίνει τις προτάσεις, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί. Μαθηματικά μοντέλα ή/και μοντέλα αναζήτησης (search) επιχειρούν να βρουν βέλτιστους συνδυασμούς μεταξύ πηγών προμήθειας δυναμικού με μικρό ορίζοντα (short terms capacity) όπως τα εποχιακά αποθέματα, το δυναμικό από υπερωρίες και υπερβολαβίες. Σαν παράδειγμα, θα συζητήσουμε συνοπτικά τον Γραμμικό Κανόνα Απόφασης (Linear Decision Rule LDR) καθώς και μια προσέγγιση γραμμικού προγραμματισμού.

Ο Γραμμικός Κανόνας Απόφασης (LDR) βασίζεται στην ανάπτυξη μιας δευτεροβάθμιας συνάρτησης κόστους για την επιχείρηση που εξετάζουμε, η οποία περιλαμβάνει το κόστος, που οφείλεται σε κανονικές μισθοδοσίες, πρόσληψη και απόλυση προσωπικού, υπερωρίες, αποθήκευση πρώτων υλών, καθυστέρηση/αναμονή παραγγελιών (back-ordering) και προετοιμασία μηχανών. Το πρόβλημα είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του αθροίσματος του μηνιαίου συνδυασμένου κόστους ως προς το προγραμματιζόμενο μέγεθος του εργατικού δυναμικού και του ρυθμού παραγωγής για την επόμενη περίοδο. Αυτοί οι δυο κανόνες απαιτούν ως δεδομένα εισόδου την συνολική πρόβλεψη για κάθε περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού, το μέγεθος του εργατικού δυναμικού και το επίπεδο αποθεμάτων της τελευταίας περιόδου.

Το μοντέλο του Κανόνα Γραμμικής Απόφασης (LDR model) είναι:

$$\text{Minimize } C = \sum_{t=1}^N C_t \quad (6-1)$$

όπου:

$$C_t = [(C_1 W_t) \quad (\text{κανονικό κόστος μισθοδοσίας}) \quad (6-2)$$

$$+ c_2 (W_t - W_{t-1})^2 \quad (\text{κόστος πρόσληψης και απόλυσης})$$

$$+ c_3 (P_t - c_4 W_t)^2 + c_5 P_t - c_6 W_t \quad (\text{κόστος υπερωριών})$$

$$+ c_7 (I_t - c_8 - c_9 S_t)^2] \quad (\text{κόστος αποθέματος})$$

υπό τους περιορισμούς:

$$I_{t-1} + P_t - F_t = I_t \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (6-3)$$

όπου:

$$P_t = \text{Ο αριθμός των μονάδων του προϊόντος, οι οποίες θα έπρεπε να παραχθούν κατά την διάρκεια του επόμενου μήνα } t.$$

$$W_{t-1} = \text{Ο αριθμός των εργαζομένων στην αρχή του μήνα (δηλαδή στο τέλος του προηγούμενου μήνα).}$$

$$I_{t-1} = \text{Ο αριθμός των μονάδων του αποθέματος μείον}$$

- τον αριθμό των μονάδων των καθυστερημένων/σε αναμονή (back orders) παραγγελιών στην αρχή του μήνα.
- W_t = Ο αριθμός των εργαζομένων που θα απαιτηθεί για τον τρέχοντα μήνα. Ο αριθμός των εργαζομένων που θα έπρεπε να προσληφθούν είναι $W_t - W_{t-1}$.
- S_t = Μια πρόβλεψη τον αριθμού των μονάδων του προϊόντος το οποίο θα παραγγελθεί για παράδοση κατά τη διάρκεια του τρέχοντος μήνα t .

Το ολικό κόστος για N περιόδους δίδεται από την εξίσωση (6-1) και το μηνιαίο κόστος C_t , από την εξίσωση (6-2). Η εξίσωση (6-3) εκφράζει την σχέση μεταξύ του αρχικού αποθέματος, της παραγωγής και των πωλήσεων κατά την διάρκεια του μήνα και του τελικού αποθέματος. Οι κανόνες απόφασης για το επίπεδο του εργατικού δυναμικού και του ρυθμού παραγωγής προκύπτουν από την παραγωγή της εξίσωσης (6-2) ως προς κάθε μεταβλητή απόφασης.

Οι περισσότερες προσεγγίσεις *Γραμμικού Προγραμματισμού* στο θέμα του Βασικού Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής (MPS) είναι παραλλαγές του μοντέλου του Σχήματος 6.8 [13] (εξισώσεις 6-4 ως 6-8). Η αντικειμενική συνάρτηση (Εξ. 6-4) ελαχιστοποιεί, σε όλον τον ορίζοντα προγραμματισμού των T περιόδων, το άθροισμα των κανονικών (regular) εξόδων παραγωγής, του κόστους του κανονικού εργατικού δυναμικού και των υπερωριών, το κόστος αποθέματος και καθυστερημένων/σε αναμονή παραγγελιών καθώς και το κόστος αλλαγής του εργατικού δυναμικού.

Ο περιορισμός (6-5) δείχνει βασικά, ότι το τελικό απόθεμα, I_t , είναι ίσο με το αρχικό απόθεμα συν την παραγωγή κατά την διάρκεια της περιόδου, μείον την ζήτηση στην περίοδο αυτή. Η εξίσωση (6-6) δηλώνει έναν επιπλέον περιορισμό στο τελικό απόθεμα, I_t , έτσι ώστε να ληφθεί υπ' όψη και η εξισορρόπηση μεταξύ διαθέσιμων αποθεμάτων και των παραγγελιών σε εκκρεμότητα (back orders). Ο περιορισμός (6-7) δηλώνει, ότι το επίπεδο του εργατικού δυναμικού στην περίοδο t , W_t , μετρούμενο σε κανονικές ώρες, είναι ίσο με το επίπεδο της προηγούμενης περιόδου, W_{t-1} , συν οποιεσδήποτε αυξήσεις ή μειώσεις που οφείλονται σε πρόσληψη ή απόλυση προσωπικού. Ο περιορισμός (6-8) εκφράζει την απαιτούμενη εξισορρόπηση μεταξύ του συνόλου των προγραμματισμένων υπερωριών αφαιρούμενου του μη χρησιμοποιούμενου προγραμματισμένου δυναμικού παραγωγής στην περίοδο t και των ωρών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του προγραμματισμένου αριθμού μονάδων X_t , αφαιρούμενου του διαθέσιμου εργατικού δυναμικού σε ώρες. Η εξίσωση αυτή διασφαλίζει, ότι όλη η παραγωγή έλαβε χώρα στο κανονικό ωράριο ή σε υπερωρίες. Η μεταβλητή, που δηλώνει υπολειτουργία (undertime), U_t , είναι μια μεταβλητή η οποία λαμβάνει υπ' όψη το γεγονός ότι το εργατικό δυναμικό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάντα πλήρως. Τέλος, όλες οι μεταβλητές πρέπει να είναι μη αρνητικές.

Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία αναζήτησης, με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για να αξιολογηθεί συστηματικά μια συνάρτηση,

Ελαχιστοποίηση	
$Z = \sum_{t=1}^T (c_t X_t + L_t W_t + L'_t O_t + h_t I_t^+ + \pi_t I_t^- + e_t w_t^+ + e'_t w_t^-) \quad (6-4)$	
υπό τους όρους, για $t=1,2,\dots,T$	
	$I_t = I_{t-1} + X_t - S_t \quad (6-5)$
	$I_t = I_t^+ - I_t^- \quad (6-6)$
	$W_t = W_{t-1} + w_t^+ - w_t^- \quad (6-7)$
	$O_t - U_t = mX_t - W_t \quad (6-8)$
$X_t, I_t^+, I_t^-, W_t, w_t^+, w_t^-, O_t, U_t \geq 0$	
όπου:	
S_t	= Ζήτηση στην περίοδο t (σε μονάδες προϊόντος)
W_t	= Επίπεδο εργατικού δυναμικού στην περίοδο t , μετράται σε κανονικές ώρες εργασίας
w_t^+	= Αύξηση στο επίπεδο του εργατικού δυναμικού από την περίοδο $t-1$ στην περίοδο t (σε ώρες)
w_t^-	= Μείωση στο επίπεδο του εργατικού δυναμικού από την περίοδο $t-1$ στην περίοδο t (σε ώρες)
O_t	= Προγραμματισμένη υπερωριακή εργασία στην περίοδο t (σε ώρες)
U_t	= Μη χρησιμοποιούμενο κανονικό παραγωγικό δυναμικό προγραμματισμένο στην περίοδο t (σε ώρες)
X_t	= Προγραμματισμένη παραγωγή στην περίοδο t (σε ώρες)
I_t^+	= Διαθέσιμα αποθέματα προϊόντα στο τέλος της περιόδου t
I_t^-	= Back orders στο τέλος της περιόδου t
m	= Αριθμός απαιτούμενων ωρών για την παραγωγή μίας μονάδας προϊόντος
L_t	= Κόστος εργατοώρας στην περίοδο t
L'_t	= Κόστος υπερωριακής εργατοώρας στην περίοδο t
e_t	= Κόστος αύξησης του επιπέδου του εργατικού δυναμικού κατά μία ώρα στην περίοδο t
e'_t	= Κόστος μείωσης του επιπέδου του εργατικού δυναμικού κατά μία ώρα στην περίοδο t
h_t	= Κόστος αποθηκευμένων προϊόντων, ανά μονάδα αποθηκευμένου προϊόντος, από την περίοδο t έως την περίοδο $t+1$
π_t	= Back order cost, ανά μονάδα προϊόντος μεταφερόμενη από την περίοδο t έως την περίοδο $t-1$
c_t	= Μεταβλητό κόστος παραγωγής μονάδας στην περίοδο t (εκτός κόστους εργασίας)

Σχήμα 6.8 Γενικευμένο Μοντέλο Γραμμικής Βελτιστοποίησης για τον συνολικό Προγραμματισμό

με κριτήριο το κόστος ή την οφέλεια, σε σημεία δοκιμής (trial points). Κατά την χρησιμοποίηση αυτής της διαδικασίας, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί μια βέλτιστη τιμή, χωρίς αυτό να είναι απόλυτα βέβαιο. Σε μεθόδους

ευθείας αναζήτησης, η συνάρτηση κόστους αξιολογείται σε ένα σημείο, το προκύπτον αποτέλεσμα συγκρίνεται με το αποτέλεσμα προηγούμενων δοκιμών και καθορίζεται μια μετατόπιση στην βάση ενός συνόλου εμπειρικών μεθόδων (heuristics or "rules of thumb"). Στην συνέχεια, αξιολογείται το νέο σημείο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου καθορισθεί ότι δεν είναι δυνατόν να βρεθεί καλύτερη λύση, η οποία προκύπτει σαν μία βελτιωμένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ή έως ότου εξαντληθεί ο διαθέσιμος υπολογιστικός χρόνος.

Τα κόστη, τα οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, εκφράζονται σαν μια συνάρτηση των ρυθμών παραγωγής και των επιπέδων του εργατικού δυναμικού σε κάθε περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού. Επομένως, κάθε περίοδος η οποία περιλαμβάνεται στον ορίζοντα προγραμματισμού, απαιτεί την πρόσθεση δύο διαστάσεων στην κριτηριακή συνάρτηση: μια για τον ρυθμό παραγωγής και μια για το μέγεθος του εργατικού δυναμικού.

6.2.2 Προγραμματισμός Απαιτήσεων Υλικών (Material Requirements Planning - MRP)

Ο Προγραμματισμός Απαιτήσεων Υλικών (MRP) λαμβάνει ως είσοδο τις μελλοντικές απαιτήσεις για τελικά προϊόντα και τις χρησιμοποιεί μαζί με άλλες πληροφορίες, για να δημιουργήσει τις απαιτήσεις για όλα τα υποπροϊόντα, τα εξαρτήματα και τις πρώτες ύλες, οι οποίες πρόκειται να αποτελέσουν το τελικό προϊόν. Παρά το γεγονός, ότι το MRP είναι μια γενική μεθοδολογία, υλοποιείται σχεδόν πάντα μέσω λογισμικών συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών, τα οποία αποκαλούνται συστήματα MRP.

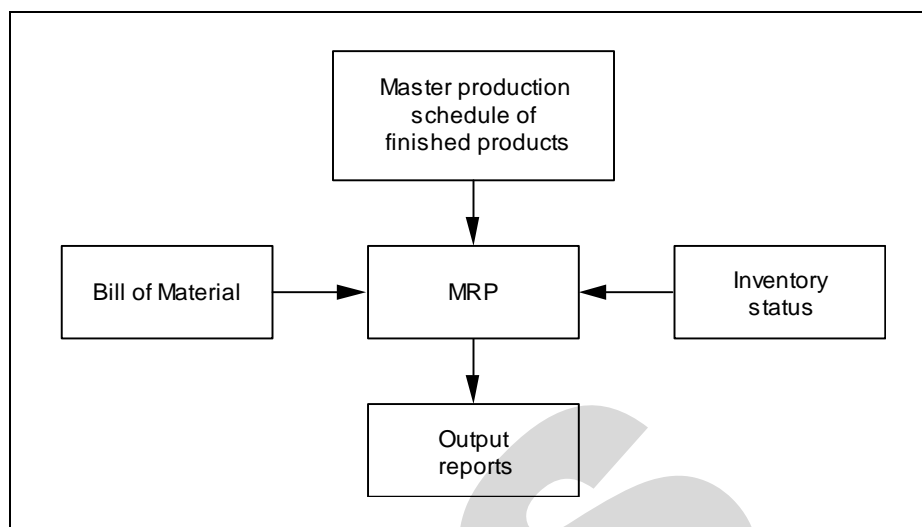
Το MRP αφορά ειδικότερα στην παραγωγή προϊόντων (assemblies) με πολλαπά εξαρτήματα και βασίζεται στο γεγονός, ότι οι απαιτήσεις για όλα τα υποπροϊόντα, τα εξαρτήματα και τις πρώτες ύλες είναι γνωστές και εξαρτώνται από την ζήτηση των τελικών προϊόντων. Τα υποπροϊόντα, τα εξαρτήματα και οι πρώτες ύλες λέγεται σε αυτήν την περίπτωση ότι έχουν "εξαρτημένη ζήτηση" (depended demand). Υπάρχουν, επίσης, ορισμένα στοιχεία, τα οποία έχουν "ανεξάρτητη ζήτηση" (independed demand), δηλαδή η ζήτηση γι' αυτά δεν εξαρτάται από την ζήτηση των άλλων στοιχείων.

Προκειμένου τα συστήματα MRP να πραγματοποιήσουν τους υπολογισμούς τους, απαιτούν τους τρεις τύπους πληροφορίας:

1. Τον Βασικό Χρονοπρογραμματισμό Παραγωγής (MPS) για τα τελικά προϊόντα,
2. Τον Πίνακα Υλικών (BOM), ο οποίος περιέχει πληροφορίες για το ποιες πρώτες ύλες, εξαρτήματα και υποπροϊόντα χρησιμοποιούνται για να κατασκευασθούν τα τελικά προϊόντα,
3. Πληροφορίες, που αφορούν την κατάσταση όλων των υλικών, που υπάρχουν σε απόθεμα.

Έχοντας εκτελέσει τους υπολογισμούς του, το MRP παράγει αναφορές, η

πλειοψηφία των οποίων αφορά στο «τι» και «πότε» πρέπει να παραχθεί ή να παραγγελθεί (Σχ. 6.9).



Master production schedule of finished products = Βασικό χρονοπρόγραμμα παραγωγής τελικών προϊόντων
 Bill of Material = Πίνακας υλικών
 MRP = Προγραμματισμός απαιτήσεων υλικών
 Output reports = Αναφορές
 Inventory status = Κατάσταση αποθέματος

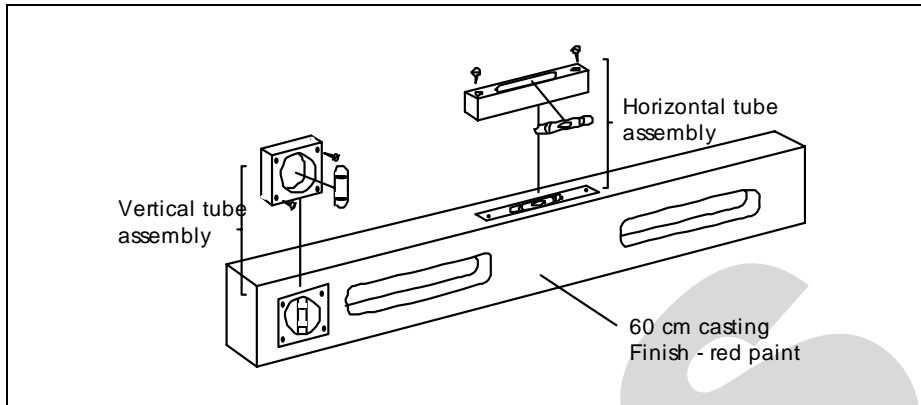
Σχήμα 6.9 Γενικό Διάγραμμα Συστήματος **MRP**

Οι Πίνακες Υλικών (*BOM*), έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στο MRP. Είναι ένα σύνολο αρχείων, τα οποία περιέχουν την "συνταγή" για κάθε τελικό προϊόν. Κάθε "συνταγή" αποτελείται από πληροφορίες, που αφορούν στα υλικά, εξαρτήματα και υποπροϊόντα, τα οποία πρέπει να συνδυασθούν για την δημιουργία ενός τελικού προϊόντος και κρατιούνται σε ένα αρχείο, που είναι γνωστό ως «αρχείο δομής προϊόντος» (*Product Structure File*). Επιπλέον όλες οι τυπικές πληροφορίες για κάθε στοιχείο όπως ο κωδικός κομματιού, η περι-γραφή, η μονάδα μέτρησης, ο χρόνος διεκπεραίωσης για την παραγωγή ή την προμήθεια κ.λ.π. υπάρχουν σε ένα αρχείο, γνωστό ως Βασικό Αρχείο Εξαρτή-ματος (*Part Master File*).

Για κάθε τελικό προϊόν δημιουργείται ένας πίνακας υλικών, με βάση την πληροφορία του σχεδιασμού και της παραγωγής. Η πληροφορία αυτή θα έχει αρχικά την μορφή των κατασκευαστικών σχεδίων (Σχ. 6.10 [14]) και των διαγραμμάτων συναρμολόγησης (Σχ. 6.11 [14]), τα οποία, μαζί με πληροφορία των σχετικών χρόνων διεκπεραίωσης, αποτελούν την βάση των πληροφοριών για τον πίνακα υλικών (Σχ. 6.12).

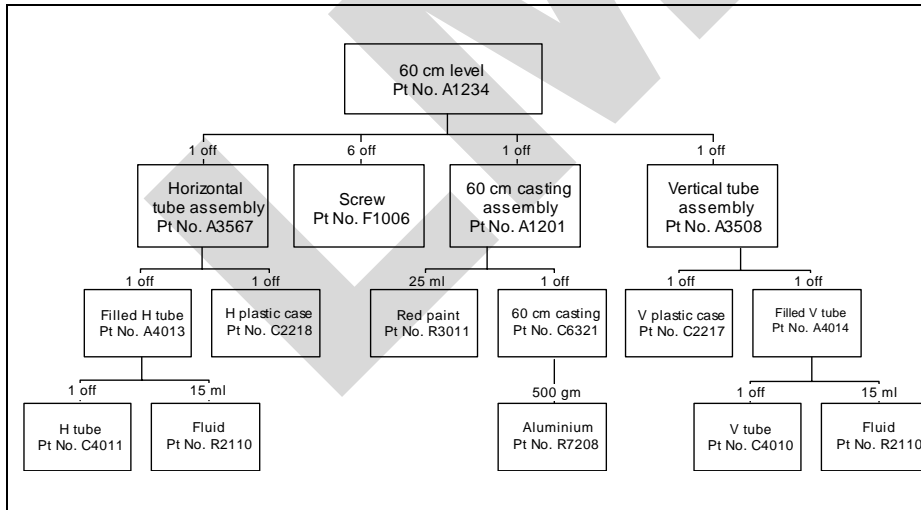
Η πληροφορία που εισάγεται στον πίνακα υλικών πρέπει να είναι ακριβής, διότι ανακρίβειες μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος κομμάτια ή στην παραγγελία λανθασμένων ποσοτήτων κομματιών. Ωστόσο, το πρόβλημα της ακρίβειας

του αρχείου είναι πολύπλοκο εξ' αιτίας του γεγονότος, ότι σε πολλά περιβάλλοντα παραγωγής συμβαίνουν συνεχείς αλλαγές στον πίνακα υλικών, με την μορφή τροποποιήσεων του προϊόντος. Αυτές οι τροποποιήσεις μπορεί να προέρχονται από πολλές αιτίες, όπως για παράδειγμα οι κανονισμοί ασφαλείας, οι αλλαγές στην παραγωγική διαδικασία ή οι βελτιώσεις του προϊόντος για εμπορικούς σκοπούς.



Vertical tube assembly = Συναρμολόγηση κάθετου σωλήνα
 Horizontal tube assembly = Συναρμολόγηση οριζόντιου σωλήνα
 60cm casting / Finish-red paint = 60 cm χύτευση / φινιρίσμα-βαφή με κόκκινο χρώμα

Σχήμα 6.10 Απλοποιημένο Κατασκευαστικό σχέδιο του Εξαρτήματος Νο A1234-Αλφάδι 60 cm



Σχήμα 6.11 Απλοποιημένο Διάγραμμα Συναρμολόγησης του Εξαρτήματος Νο A1234-Αλφάδι 60 cm

Το Σχήμα 6.12 απεικονίζει έναν πίνακα υλικών (BOM) για το εξάρτημα του σχήματος 6.10. Ονομάζεται (*Indented bill*), γιατί η εξάρτηση των κομματιών και των εξαρτημάτων υποδεικνύεται από την ποσοτικοποίηση των στοιχείων στον πίνακα. Όλοι οι αριθμοί, που προηγούνται των υλικών, υποδεικνύουν την ποσότητα του συγκεκριμένου κομματιού που απαιτείται για την παραγωγή μιας μονάδας του εξαρτώμενου κομματιού. Για παράδειγμα, κάθε οριζόντιος σωλήνας συναρμολόγησης (Part #A3567) απαιτεί 15ml υγρού (Part #R2110).

	Part #
1 60 cm spirit level	A1234
1 Horizontal tube assembly	A3567
1 Filled Horizontal tube	A4013
1 Horizontal tube	C4011
15 ml Fluid	R2110
1 Horizontal plastic case	C2218
6 Screw	F1006
1 60 cm casting assembly	A1201
25 ml Red paint	R3011
1 60 cm casting	C6321
500 gm Aluminium	R7208
1 Vertical tube assembly	A3508
1 Vertical plastic case	C2217
1 Filled vertical tube	A4014
1 Vertical tube	C4010
15 ml Fluid	R2110

Spirit level = Επίπεδο οινοπνεύματος

Horizontal tube assembly = Συναρμολόγηση οριζόντιου σωλήνα

Filled Horizontal tube = Γέμισμα οριζόντιου σωλήνα

Horizontal tube = Οριζόντιος σωλήνας

Fluid = Υγρό

Horizontal plastic case = Οριζόντια πλαστική θήκη

Screw = Κοχλίας

Casting assembly = Συναρμολόγηση με χύτευση

Red paint = Βαφή με κόκκινο χρώμα

Casting = Χύτευση

Aluminium = Αλουμίνιο

Vertical tube assembly = Συναρμολόγηση κατακόρυφου σωλήνα

Vertical plastic case = Κατακόρυφη πλαστική θήκη

Filled Vertical tube = Γέμισμα κατακόρυφου σωλήνα

Vertical tube = Κατακόρυφος σωλήνας

Σχήμα 6.12 Πίνακας υλικών για Αλφάδι 60 cm

Το αρχείο της κατάστασης του αποθέματος (*Inventory Status File*) κρατά μια εγγραφή όλων των συναλλαγών και μεταβολών του αποθέματος σε όλη την επιχείρηση. Οι συναλλαγές αυτές εμφανίζονται, κυρίως, με την μορφή αποδείξεων παραλαβών και διανομών, ξεκινώντας με την συνθήκη «υπό παραγγελία» (on order) και πιθανώς καταλήγοντας με την διανομή του ολοκληρωμένου προϊόντος εκτός του εργοστασίου. Άλλες συναλλαγές μπορεί να καταγράφουν γεγονότα όπως ακατάλληλα μετά από έλεγχο προϊόντα ή υλικά, καθώς και προσαρμογές αποθεμάτων σαν αποτέλεσμα φυσικών ελέγχων των αποθηκευμένων προϊόντων ή υλικών.

Πολλές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν τον όρο «κατάσταση αποθέματος» (stock condition) για να περιγράψουν την φάση άφιξης του υλικού, για παρά-

δειγμα: ποσότητα 500kg αλουμινίου (part #R7208) έχει επιθεωρηθεί και είναι στην αποθήκη πρώτων υλών έτοιμη για διανομή στην παραγωγική διαδικασία.

Το σύστημα MRP εκτελεί υπολογισμούς από επίπεδο σε επίπεδο, μετατρέποντας το βασικό χρονοπρόγραμμα των τελικών προϊόντων σε προτεινόμενες παραγγελίες για το σύνολο των υποπροϊόντων, των εξαρτημάτων και των πρώτων υλών. Αυτοί οι υπολογισμοί ή αλλιώς «η δημιουργία απαιτήσεων» (requirements generation runs) είναι δυνατόν να εκτελούνται κάθε μια ή δυο βδομάδες, έτσι ώστε να γίνεται τακτική ενημέρωση της κατάστασης.

Σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας συναρμολόγησης, το σύστημα MRP εκτελεί τρία βήματα στους υπολογισμούς του, πριν συνεχίσει στο επόμενο χαμηλότερο επίπεδο. Τα βήματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

1. Δημιουργεί *βασικές απαιτήσεις* (*Gross Requirements*) για το κομμάτι υπερκαλύπτοντας (exploding) τις προγραμματισμένες αρχικές ποσότητες του επόμενου υψηλότερου επιπέδου συναρμολόγησης, με αναφορά στο αρχείο δομής του πίνακα υλικών. Για παράδειγμα, μια προγραμματισμένη αρχική ποσότητα, 200 αλφαδιών (part No A1234) στην βδομάδα 15 θα υπερκαλυπτόταν με βασικές απαιτήσεις 1200 βιδών (part No F1006) στην βδομάδα 15. (Βλ. Σχ. 6.11 για ένα διάγραμμα συναρμολόγησης).
2. Οι *βασικές απαιτήσεις* τροποποιούνται σε σχέση με την ποσότητα αποθέματος του κομματιού, το οποίο αναμένεται να είναι διαθέσιμο κάθε βδομάδα (δηλαδή, διαθέσιμο και προγραμματισμένες παραλαβές). Αυτή η πληροφορία παρέχεται από το αρχείο κατάστασης αποθέματος και οι τροποποιημένες απαιτήσεις καλούνται *καθαρές απαιτήσεις* (net requirements). Π.χ. στην βδομάδα 15 ένα σύνολο 800 βιδών αναμένεται να είναι διαθέσιμο, και έτσι η απαίτηση των 1200 τροποποιείται, έτσι ώστε να δώσει μια ελάχιστη απαίτηση 400 βιδών στην βδομάδα 15.
3. Οι καθαρές απαιτήσεις αντισταθμίζονται (offset) με τον αντίστοιχο χρόνο διεκπεραίωσης, έτσι ώστε να αρχίσει η παραγωγή ή η προμήθεια του κομματιού. Π.χ. αν ο χρόνος παράδοσης για τις βίδες (Part No F1006) είναι 4 εβδομάδες, οι καθαρές απαιτήσεις των 400 βιδών στην βδομάδα 15 αντισταθμίζονται ως εξής:

Αριθμός Εβδομάδας	11	12	13	14	15	16
Καθαρές απαιτήσεις					400	
Προγραμματισμένη εκκίνηση		400				

←-----

Συνοψίζοντας, το σύστημα MRP, στην πιο απλή του μορφή, υπολογίζει τις απαιτήσεις βιδών για κάθε περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.13 [14].

Αυτός ο υπολογισμός θεωρεί ότι η μόνη χρήση της βίδας (Part No. F1006) είναι στην συναρμολόγηση του αλφαδιού 60 cm. Αν δεν ίσχυε αυτό και η χρήση της ήταν κοινή και σε άλλα συναρμολογούμενα από την εταιρεία προϊόντα, για παράδειγμα σε αλφάδια 40 cm και 80 cm, τότε οι καθαρές απαιτήσεις για τις βίδες θα ήταν οι συνολικές απαιτήσεις, που θα προέκυπταν από τις προγραμματισμένες ενάρξεις παραγωγής όλων των συναρμολογούμενων προϊ-

όντων που θα χρησιμοποιούσαν αυτή την βίδα.

<i>Pt No. A1234</i>	<i>60 cm spirit level assembly</i>						
Week No.	10	11	12	13	14	15	16
(Master schedule)	400	300	200	200	300	200	400
Planned starts							
<i>Pt No. F1006</i>	<i>Screw</i>		<i>LT = 4</i>				
Week No.	10	11	12	13	14	15	16
Gross requirements	2,400	1,800	1,200	1,200	1,800	1,200	2,400
Scheduled receipts		6,000					
Projected stock on hand	800	5,000	3,800	2,600	800	0	0
		3,200					
Net requirements						400	2,400
Planned starts	400	2,400					

Pt No. = Αριθμός κομματιού
 60 cm spirit level assembly = Συναρμολόγηση
 αφαδιού 60 cm οιοπνεύματος (υγρού)
 Week No. = Αριθμός εβδομάδος
 Master schedule = Βασικό χρονοπρόγραμμα
 Planned starts = Προβλεπόμενες ενάρξεις
 παραγωγής

Gross requirements = Βασικές απαιτήσεις
 Scheduled receipts = Προγραμματισμένες
 παραλαβές
 Projected stock on hand = Σχεδιασμένο διαθέσιμο
 απόθεμα
 Net requirements = Καθαρές απαιτήσεις

Σχήμα 6.13 Παράδειγμα Υπολογισμού MRP

Αποθέματα ασφαλείας (safety stocks) κρατούνται σε κάθε παραγωγικό σύστημα, για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας. Σε ένα σύστημα MRP η κύρια αιτία αβεβαιότητας, ως προς την μελλοντική χρήση του κομματιού, έχει ουσιαστικά εξαλειφθεί εφ' όσον έχουν παραχθεί κομμάτια, τα οποία θα πρέπει να ικανοποιήσουν το πρόγραμμα, δηλαδή το βασικό χρονοπρογραμματισμό παραγωγής. Ωστόσο, τα αποθέματα ασφαλείας είναι και σε αυτήν την περίπτωση απαραίτητα, εξ αιτίας της αβεβαιότητας των προμηθειών, που οφείλονται τόσο στην μεταβλητότητα (variation) των πραγματικών χρόνων διεκπεραίωσης της παραγγελίας, όσο και στην μεταβλητότητα των προμηθευόμενων ποσοτήτων, που προκαλείται από ελλείψεις πρώτων υλών και απόρριψη των ελαττωματικών κατά την διαδικασία ελέγχου. Θα υπάρχουν επίσης αλλαγές της ζήτησης, που προκαλούνται από επείγουσες βραχυπρόθεσμες αλλαγές στον βασικό χρονοπρογραμματισμό και μη αναμενόμενη ζήτηση για εξαρτήματα, όπως τα ανταλλακτικά.

Έχουν αναπτυχθεί, για εφαρμογή στο MRP, στατιστικές τεχνικές για τον προσδιορισμό των αποθέμων ασφαλείας. Αυτές κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: *απόθεμα ασφαλείας σταθερής ποσότητας (fixed quantity safety stock)*, *χρόνοι ασφαλείας (safety times)* και *ποσοστιαίες αυξήσεις των απαιτήσεων (percentage increase in requirements)*.

Τα αποθέματα ασφαλείας σταθερής ποσότητας εισάγονται, ενεργοποιώντας

μια καθαρή απαίτηση (net requirement), οποτεδήποτε το σχεδιασμένο (projected) διαθέσιμο απόθεμα φθάσει στο επίπεδο αποθέματος ασφαλείας. Το Σχήμα 6.14 [14] παρουσιάζει παραδείγματα από υπολογισμούς MRP, με ή χωρίς απόθεμα ασφαλείας σταθερής ποσότητας.

Ο υπολογισμός του μεγέθους της σταθερής ποσότητας αποθέματος πρέπει να συσχετίζεται με την αιτία της μη αναμενόμενης χρήσης κατά την διάρκεια διεκπεραίωσης της παραγγελίας. Για παράδειγμα, αν η μη προγραμματισμένη ζήτηση οφείλεται κυρίως σε μη προβλεπόμενη ζήτηση ανταλλακτικών για το εξάρτημα, τότε μια ιστορική ανάλυση αυτής της διαταραχής (variation) μπορεί να οδηγήσει απ' ευθείας στον προσδιορισμό ενός ικανοποιητικού επιπέδου αποθέματος ασφαλείας.

<i>Pt No. C2218</i>						
<i>H. Plastic case</i>	<i>LT = 1</i>		<i>Safety quantity = 0</i>			
Week No	13	14	15	16	17	18
Gross requirements	200	300	200	400	300	500
Scheduled receipts	--	--	--	--	--	--
Projected stock on hand 600	400	100	0	0	0	0
Net requirements	--	--	100	400	300	500
Planned starts	--	100	400	300	500	--
<i>a) Without safety stock</i>						
<i>Pt No. C2218</i>						
<i>H. Plastic case</i>	<i>LT = 1</i>		<i>Safety quantity = 150</i>			
Week No	13	14	15	16	17	18
Gross requirements	200	300	200	400	300	500
Scheduled receipts	--	--	--	--	--	--
Projected stock on hand 600	400	150	150	150	150	150
Net requirements	--	50	200	400	300	500
Planned starts	50	200	400	300	500	--
<i>b) With safety stock</i>						

Plastic case = Πλαστική θήκη

Safety quantity = Απόθεμα ασφαλείας

Week No = Αριθμός εβδομάδας

Gross requirements = Συνολικές απαιτήσεις

Scheduled receipts = Προβλεπόμενες παραλαβές

Projected stock on hand = Σχεδιασμένο διαθέσιμο απόθεμα

Net requirements = Καθαρές απαιτήσεις

Planned starts = Προβλεπόμενες ενάρξεις παραγωγής

Σχήμα 6.14 Επίδραση του Αποθέματος Ασφαλείας Σταθερής Ποσότητας

Ωστόσο, εφ' όσον στις περισσότερες περιπτώσεις οι διαταραχές (variations) στην χρήση και στην προμήθεια θα μπορούσε να είναι το αποτέλεσμα πολλών παραγόντων και με δεδομένο, ότι δεν υπάρχουν "επιστημονικές" μέθοδοι προσδιορισμού του αποθέματος ασφαλείας στα συστήματα MRP, έχουν

εφαρμοσθεί εμπειρικές προσεγγίσεις (rules of thumb). Για παράδειγμα, μπορεί να είναι ικανοποιητικό αρχικά να ορισθεί το επίπεδο αποθέματος ασφαλείας ως η μέση απαίτηση σε μια εβδομάδα ή ως η μέγιστη απαίτηση μιας εβδομάδας. Ωστόσο, είναι σημαντικό η χρήση του αποθέματος ασφαλείας να παρακολουθείται και το επίπεδο του να ρυθμίζεται ανάλογα. Π.χ. πολύ υψηλή συχνότητα χρήσης του αποθέματος θα οδηγούσε στην ανάγκη υψηλότερου επιπέδου ασφαλείας, ενώ χαμηλότερη συχνότητα χρήσης θα οδηγούσε στην ανάγκη χαμηλότερου επιπέδου αποθέματος.

Η προσέγγιση με την μέθοδο του «χρόνου ασφαλείας», για τον προσδιορισμό των περιθωρίων ασφαλείας (safety margins), ουσιαστικά είναι «ο προγραμματισμός, ώστε να υπάρχουν διαθέσιμα εξαρτήματα νωρίτερα από την χρονική στιγμή που θα ζητηθούν». Η εισαγωγή των χρόνων ασφαλείας σημαίνει ακριβώς ότι οι καθαρές απαιτήσεις αντισταθμίζονται από τον χρόνο διεκπεραίωσης της παραγγελίας συν τον χρόνο ασφαλείας για την προγραμματισμένη έναρξη της παραγωγής. Το Σχήμα 6.15 [14] δείχνει παράδειγμα υπολογισμών MRP, με και χωρίς χρόνους ασφαλείας.

<i>Pt No. C2218</i>							
<i>H. Plastic case</i>		<i>LT = 1</i>		<i>Safety Time = 0</i>			
Week No		13	14	15	16	17	18
Gross requirements		200	300	200	400	300	500
Scheduled receipts		--	--	--	--	--	--
Projected stock on hand 600		400	100	0	0	0	0
Net requirements		--	--	100	400	300	500
Planned starts		--	100	400	300	500	--
<i>a) Without safety time</i>							
<i>Pt No. C2218</i>							
<i>H. Plastic case</i>		<i>LT = 1</i>		<i>Safety Time = 1</i>			
Week No		13	14	15	16	17	18
Gross requirements		200	300	200	400	300	500
Scheduled receipts		--	--	--	--	--	--
Projected stock on hand 600		400	200	400	300	500	0
Net requirements		--	--	100	400	300	500
Planned starts		100	400	300	500	--	--
<i>b) With safety time</i>							

Plastic case = Πλαστική θήκη
 Safety quantity = Ποσότητα ασφαλείας
 Week No = Αριθμός εβδομάδας
 Gross requirements = Βασικές απαιτήσεις
 Scheduled receipts = Προγραμματισμένες παραλαβές

Projected stock on hand = Σχεδιασμένο διαθέσιμο απόθεμα
 Net requirements = Καθαρές απαιτήσεις
 Planned starts = Προγραμματισμένες ενάρξεις παραγωγής

Σχήμα 6.15 Επίδραση του Χρόνου Ασφαλείας

Η επιλογή του χρόνου ασφαλείας, θα μπορούσε, ίσως, να συσχετισθεί με την μεταβλητότητα του χρόνου διεκπεραίωσης της παραγωγής ή της προμήθειας του εξαρτήματος που εξετάζεται. Ωστόσο, εφ' όσον άλλοι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν την χρήση του αποθέματος ασφαλείας που δημιουργείται με την μέθοδο του «χρόνου ασφαλείας», είναι απαραίτητος ένας αυθαίρετος προσδιορισμός του χρόνου ασφαλείας και μεταγενέστερη ρύθμιση του, βασισμένη στην παρακολούθηση της χρήσης του αποθέματος ασφαλείας.

Η δημιουργία περιθωρίων ασφαλείας, με την μέθοδο "των ποσοστιαίων αυξήσεων των απαιτήσεων", είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τον χειρισμό των διαταραχών (variations) στις προμήθειες, που προκαλείται από απορρίμματα (scrap) ή απώλειες κατά την επεξεργασία. Τα περιθώρια αυτά, συχνά, αναφέρονται σαν "συντελεστές απορριμμάτων" (scrap factors) ή "συντελεστές μείωσης" (shrinkage factors). Αυτός ο τύπος των περιθωρίων ασφαλείας εισάγεται μέσω της αύξησης των ελάχιστων απαιτήσεων κατά ένα συντελεστή, ώστε να πραγματοποιηθούν οι προγραμματισμένες ενάρξεις παραγωγής. Ένα σχετικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16 [14].

Pt No. C2218 H. Plastic case		LT = 1		Scrap factor = 0.05			
Week No		13	14	15	16	17	18
Gross requirements		200	300	200	400	300	500
Scheduled receipts		--	--	--	--	--	--
Projected stock on hand 600		400	100	0	0	0	0
Net requirements		--	--	100	400	300	500
Planned starts		--	105	420	315	525	--

Plastic case = Πλαστική θήκη

Safety quantity = Ποσότητα ασφαλείας

Week No = Αριθμός εβδομάδας

Gross requirements = Βασικές απαιτήσεις

Scheduled receipts = Προγραμματισμένες παραλαβές

Projected stock on hand = Σχεδιασμένο διαθέσιμο απόθεμα

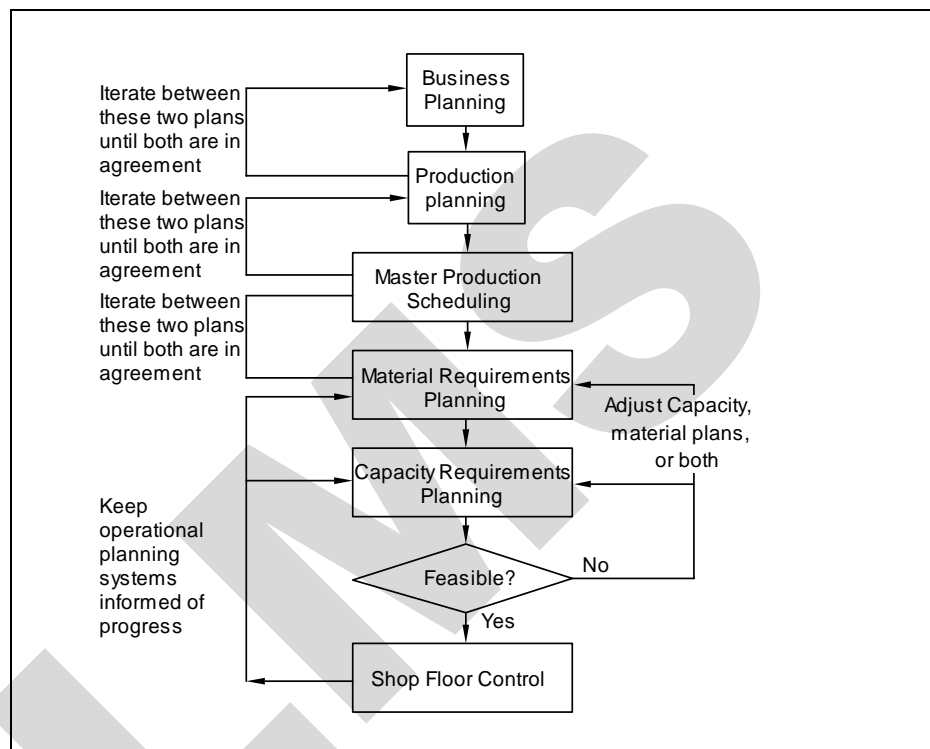
Net requirements = Καθαρές απαιτήσεις

Planned starts = Προγραμματισμένες ενάρξεις παραγωγής

Σχήμα 6.16 Επίδραση του Συντελεστή Απορριμμάτων (Scrap Factor)

Το MRP είναι μια αποτελεσματική μέθοδος δημιουργίας παραγγελιών, για καταστάσεις εξαρτημένης ζήτησης, όπου η εντολή για μια παραγγελία ή η έναρξη της παραγωγής μιας παρτίδας κομματιών καθορίζεται από το timing (συγχρονισμό) και την χρήση του κομματιού σε μια μεταγενέστερη φάση της παραγωγικής διαδικασίας. Εφ' όσον οι αποφάσεις MRP για μια φάση παραγωγής («τι» να παραχθεί, «πόσα» και «πότε») εναρμονίζονται με άλλες αποφάσεις για την παραγωγική διαδικασία, είναι φυσικό να επεκταθεί το MRP για να συμπεριλάβει τον προγραμματισμό δυναμικού παραγωγής (capacity planning),

τον έλεγχο επιπέδου εργοστασίου (shop floor control) και τις προμήθειες (purchasing). Σ' αυτήν την περίπτωση, ο όρος MRP σημαίνει Προγραμματισμός Παραγωγικών Πόρων (Manufacturing Resource Planning) σε αντίθεση με τον Προγραμματισμό Απαιτήσεων Υλικών (Material Requirements Planning). Το εκτεταμένο αυτό MRP αναφέρεται ως «κλειστός βρόγχος MRP» ή «MRP II» και συνδέει τα οικονομικά και τις πωλήσεις με την παραγωγή (Σχ. 6.17 [12]). Επομένως, το MRP II παρέχει ένα μέσο για τον συντονισμό των προσπαθειών των τμημάτων παραγωγής, οικονομικών, πωλήσεων, σχεδιασμού προϊόντος και προσωπικού για την δημιουργία ενός κοινού επιχειρησιακού προγράμματος.



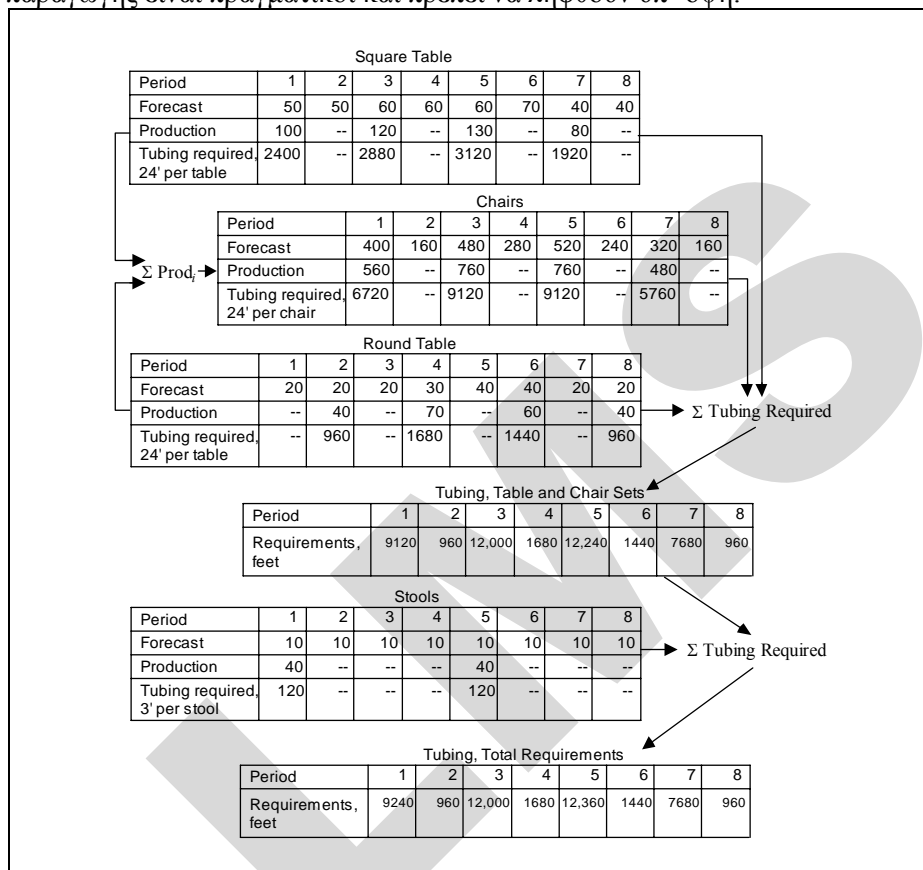
Business Planning = Προγραμματισμός
επιχείρησης
Production Planning = Προγραμματισμός
παραγωγής
Master Production Scheduling = Βασικός
Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής
Material Requirements Planning =
Προγραμματισμός απαιτήσεων υλικών
Capacity Requirements Planning =
Προγραμματισμός απαιτήσεων δυναμικού
Feasible = Εφικτό
Shop Floor Control = Έλεγχος shop Floor ή

έλεγχος επιπέδου εργοστασίου
Adjust Capacity, Material Plans or both = Ρύθμιση
προγραμματισμού δυναμικού παραγωγής, υλικών
ή και τα δύο
Iterate between these two plans until both are in
agreement = Επανάληψη μεταξύ αυτών των δύο
προγραμμάτων μέχρι να επέλθει συμφωνία
Keep operational planning systems informed of
progress = Διατήρηση των συστημάτων
επιχειρησιακού προγραμματισμού ενημερωμένων
σχετικά με την πρόοδο

Σχήμα 6.17 Προγραμματισμός Παραγωγικών Πόρων

6.2.3 Προγραμματισμός Δυναμικού Παραγωγής (Capacity Planning)

Οι μέθοδοι προγραμματισμού απαιτήσεων, οι οποίες έχουν συζητηθεί έως αυτό το σημείο, έχουν δείξει τρόπους αξιοποίησης της γνώσης όσον αφορά στην ζήτηση και την δομή του προϊόντος, με σκοπό την ανάπτυξη χρονοπρογραμμάτων για τις εντολές παραγωγής (production order schedules). Αυτά τα χρονοπρογράμματα λαμβάνουν υπ' όψη τον απαιτούμενο συγχρονισμό (timing) των εντολών παραγωγής, αλλά υποθέτουν ότι το απαιτούμενο δυναμικό παραγωγής είναι διαθέσιμο, όταν ζητηθεί. Ωστόσο, οι περιορισμοί του δυναμικού παραγωγής είναι πραγματικοί και πρέπει να ληφθούν υπ' όψη.



Period = Περίοδος
 Forecast = Πρόβλεψη
 Production = Παραγωγή
 Tubing required, 24' per table = Απαιτούμενο

μήκος σωλήνων, 24' ανά τραπέζι
 Tubing required, 3' per stool = Απαιτούμενο μήκος σωλήνων, 3' ανά σκαμνί

Σχήμα 6.18 Καθορισμός απαιτήσεων για τετράγωνα και στρογγυλά τραπέζια, καρέκλες, σκαμνιά και σωλήνες. Οι απαιτήσεις για τις καρέκλες εξαρτώνται από το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής των τραπεζιών. Οι απαιτήσεις σωλήνων εξαρτώνται από το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής και για τα τέσσερα προϊόντα.

Σαν παράδειγμα, θεωρούμε την επεξεργασία μεταλλικών ποδιών για τραπέζια, ξεκινώντας με την πληροφορία που περιέχεται στο Σχήμα 6.18 [13]. Υπάρχουν δυο τραπέζια, τα οποία χρησιμοποιούν τα ίδια πόδια και ο Πίνακας 6.5. [13] παρουσιάζει συνολικά τις απαιτήσεις για παραγωγή ποδιών από το Σχήμα 6.18. Η τελευταία σειρά του Πίνακα 6.5 δίδει τις απαιτήσεις παραγωγής για τα πόδια, αν αθροίσουμε τις μελλοντικές απαιτήσεις 4 εβδομάδων ως εντολές παραγωγής.

Επομένως, είναι απαραίτητο να παραλάβουμε παρτίδες 1320 ποδιών στην περίοδο 1 και 1240 ποδιών στη περίοδο 5. Επειδή υπάρχει ένας χρόνος διεκπεραίωσης της παραγωγής, τριών εβδομάδων, αυτές οι εντολές παραγωγής πρέπει να δοθούν στο σύστημα τρεις εβδομάδες πριν από τον χρονοπρογραμματισμό που φαίνεται στον Πίνακα 6.5.

Period, weeks	1	2	3	4	5	6	7	8
Leg requirements, square	400	--	480	--	520	--	320	--
Leg requirements, round	--	160	--	280	--	240	--	160
Total leg requirements	400	160	480	280	520	240	320	160
Production requirements	1320	--	--	--	1240	--	--	--

Period, weeks = Περίοδοι, εβδομάδες

Leg requirements, square = Απαιτήσεις σε πόδια, τετράγωνα

Leg requirements, round = Απαιτήσεις σε πόδια,

στρογγυλά

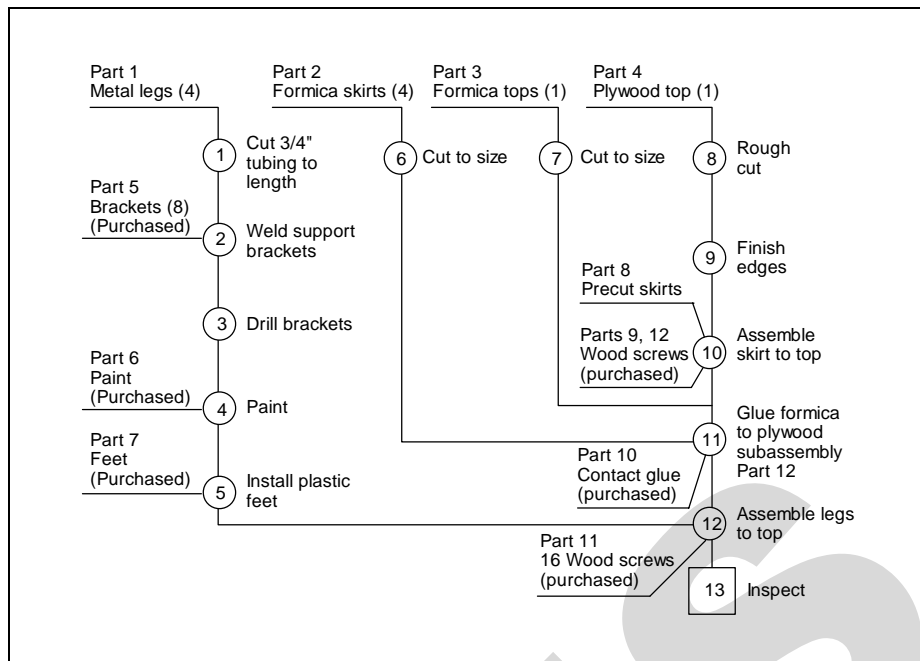
Total leg requirements = Σύνολο απαιτήσεων σε πόδια

Production requirements = Απαιτήσεις παραγωγής

Πίνακας 6.5 *Απαιτήσεις για Πόδια Τραπεζιών με βάση το Χρονοπρογραμματισμό Παραγωγής για Τετράγωνα και Στρογγυλά Τραπέζια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.18. (Χρόνος Διεκπεραίωσης Παραγωγής = 3 Εβδομάδες)*

Από το διάγραμμα των διεργασιών (operation process chart) του Σχήματος 6.19 [13], ας θεωρήσουμε μόνο τις απαιτήσεις του εργασιακού φορτίου (load requirements) για τις διεργασίες κατασκευής της (1) κοπής σε ορισμένο μήκος, (2) της συγκόλλησης των υποστηρικτικών βραχιόνων και (3) του ανοίγματος οπών στους βραχίονες. Οι απαιτήσεις σε χρόνο γι' αυτές τις τρεις κατεργασίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6 [13], για καθένα από τα δυο μεγέθη παρτίδων, τα οποία πρέπει να λάβουμε υπ' όψη μας.

Αν οι εντολές παραγωγής (production orders) έχουν δοθεί τρεις εβδομάδες πριν από την χρονική στιγμή συναρμολόγησης των ποδιών, υποθέτουμε ότι η κατεργασία κοπής είναι προγραμματισμένη για την πρώτη εβδομάδα, η κατεργασία συγκόλλησης για την δεύτερη και η κατεργασία διάτρησης και άλλες μικρότερης σημασίας κατεργασίες για την τρίτη εβδομάδα. Σ' αυτή την περίπτωση, μπορεί να υπολογισθεί το εργασιακό φορτίο σε ώρες, για κάθε μια από τις κατεργασίες όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20 [13], έτσι ώστε όλες οι κατεργασίες να ολοκληρωθούν και οι δυο παραγγελίες να είναι διαθέσιμες την πρώτη και την πέμπτη εβδομάδα.



Metal legs = Μεταλλικά πόδια
 Brackets (purchased) = Βραχίονες στήριξης (προμηθευμένοι)
 Paint (purchased) = Βαφή (προμηθευμένη)
 Feet (purchased) = Πόδια (προμηθευμένα)
 Formica skirts = Κάλυμμα από φορμάϊκα
 Cut 3/4" tubing to length = Κοπή σωληνώσεων 3/4" στο κατάλληλο μήκος
 Weld support brackets = Συγκόλληση υποστηρικτικών βραχιόνων
 Drill brackets = Διάνοιξη οπών στους βραχίονες
 Paint = Βαφή
 Install plastic feet = Εγκατάσταση πλαστικών ποδιών
 Formica tops = Κάλυμμα από φορμάϊκα
 Cut to size = Κοπή στο κατάλληλο μέγεθος

Plywood top = Κάλυμμα κοντραπλακέ
 Rough cut = Αρχική κοπή
 Finish edges = Φινίρισμα των άκρων
 Precut skirts = Κοπή καλυμμάτων
 Assemble skirt to top = Συναρμολόγηση των καλυμμάτων στο επάνω μέρος του τραπεζιού
 Wood screws (purchased) = Ξυλόβιδες (προμηθευμένες)
 Glue formica to plywood subassembly = Κόλλημα της φορμάϊκα στην υποσυναρμολόγηση του κοντραπλακέ
 Contact glue (purchased) = Επάλειψη κόλλας
 Assemble legs to top = Συναρμολόγηση ποδιών στο τραπέζι
 Inspect = Επιθεώρηση/έλεγχος

Σχήμα 6.19 Διάγραμμα Εκτέλεσης Διεργασιών (Operation Process Plan)

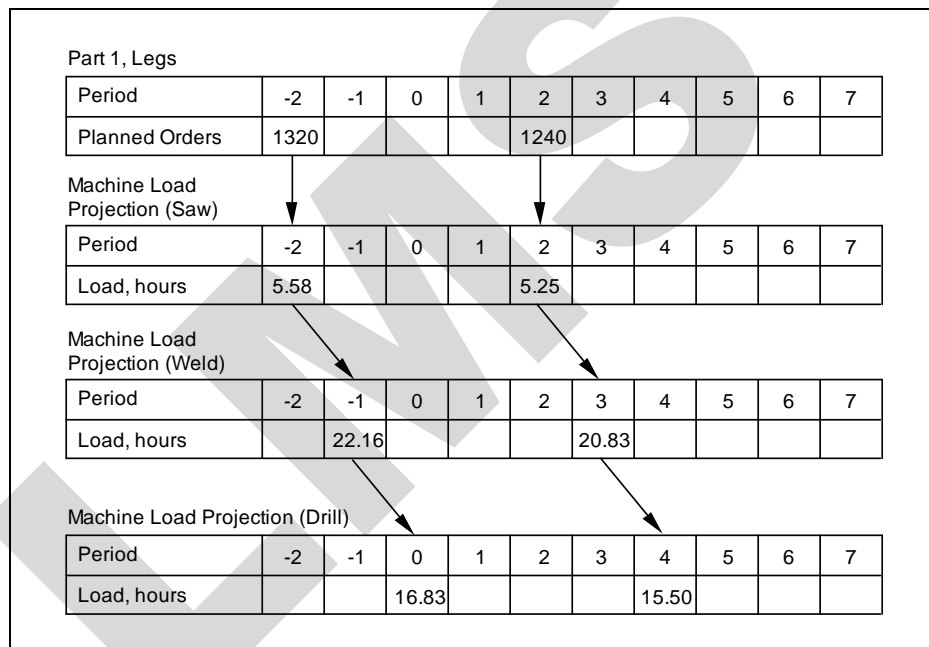
Ακολουθώντας την ίδια λογική προσδιορισμού του εργασιακού φορτίου για τις τρεις κατεργασίες που φαίνονται στο Σχ. 6.20, ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορεί να συγκεντρώσει το εργασιακό φορτίο για όλες τις παραγωγείες, όλα τα κομμάτια και τα προϊόντα στα αρχεία του προγράμματος απαιτήσεων και να δώσει σαν αποτέλεσμα ένα προβλεπόμενο (projected) φορτίο για κάθε κέντρο εργασίας. Για παράδειγμα, το προβλεπόμενο εβδομαδιαίο εργασιακό φορτίο στο κέντρο εργασίας πρεσσών διάτρησης φαίνεται στο Σχ. 6.21 [13]. Το συνολικό φορτίο εργασίας ανά εβδομάδες παρουσιάζεται σαν (released load), σε ώρες. Η δυναμικότητα για τον ορίζοντα των οκτώ εβδομά-

Process	Setup Time, Minutes	Run Time, Minutes/unit	Total Time, Hours, in Lots of	
			1320	1240
1. Cut to length	5	0.25	5.58	5.25
2. Weld brackets	10	1.00	22.16	20.83
3. Drill brackets	20	0.75	16.83	15.50
4. Paint	10	0.25	5.66	5.33
5. Install feet	5	0.10	2.28	2.15

Cut to length=Κοπή στο κατάλληλο μέγεθος
Weld brackets=Συγκόλληση βραχιόνων
Drill brackets= Διάνοιξη οπών στους βραχίονες

Paint=Βαφή
Install feet=Συναρμολόγηση ποδιών

Πίνακας 6.6 Απαιτούμενοι Χρόνοι Επεξεργασίας για τα Πόδια σε Παρτίδες των 1320 και 1240 Κομματιών



Part = Κομμάτι (εξάρτημα)

Legs = Πόδια

Period = Περίοδος

Planned Orders = Προγραμματισμένες

Παραγγελίες

Machine Load Projection = Σχεδιασμένος φόρτος
εργασίας (εργαλειο)μηχανής

Hours = Ώρες

Saw = Κοπή

Weld = Συγκόλληση

Drill = Διάτρηση

Install plastic feet = Εγκατάσταση πλαστικών
ποδιών

Σχήμα 6.20 Υπολογισμός του φόρτου εργασίας για τρεις κατεργασίες, βασισμένη στο Χρονοπρόγραμμα Παραγωγής για τα Πόδια. Οι

Απαιτήσεις Χρόνου προέρχονται από τον Πίνακα 6.6

δων εμφανίζεται ως 80 ώρες, που είναι το ισοδύναμο δύο διαθέσιμων μηχανών. Οι διαθέσιμες ώρες στο Σχ. 6.21, δείχνουν αν υπάρχουν ή όχι προβλήματα δυναμικού παραγωγής. Στις περιόδους 4, 5 και 6, έχουν σχεδιασθεί/προγραμματισθεί εργασιακά φορτία μεγαλύτερα από το διαθέσιμο δυναμικό του συστήματος. Με δεδομένη αυτήν την πληροφορία μπορεί να επιθυμούμε να προλάβουμε το πρόβλημα, αλλάζοντας την χρονική περίοδο παραγωγής ορισμένων παραγγελιών, να ικανοποιούμε την αυξημένη ζήτηση παραγωγικού δυναμικού του συστήματος με την χρήση υπερωριών ή να χρησιμοποιούμε υπεργολαβίες για την παραγωγή κάποιων κομματιών. Στο παράδειγμα του Σχήματος 6.21 προβλέπεται σημαντικό πλεόνασμα παραγωγικού δυναμικού για τις περιόδους 3 και 7, έτσι ώστε θα ήταν πιθανό να εξομαλυνθεί η κατανομή του εργασιακού φορτίου, αρχίζοντας νωρίτερα την εκτέλεση ορισμένων παραγγελιών.

Projected weekly machine load report		Date: 02/01/80							
Work Center 21, Drill Presses									
Period	1	2	3	4	5	6	7	8	
Released load, hours	65	71	49	90	81	95	48	62	
Capacity, hours	80	80	80	80	80	80	80	80	
Available hours	15	9	31	-10	-1	-15	32	18	

Projected weekly machine load report = Αναφορά
προγραμματισμένου εβδομαδιαίου φόρτου
εργασίας (εργαλειο)μηχανής
Work Center = Κέντρο Εργασίας
Date = Ημερομηνία

Period = Περίοδος
Released load = Υλοποιηθείς φόρτος εργασίας
Capacity = Δυναμικότητα
Available = Διαθέσιμες
Hours = Ώρες

Σχήμα 6.21 Παράδειγμα Αναφοράς Προβλεπόμενου Εργασιακού Φορτίου για ένα Κέντρο Εργασίας

6.2.4 Έλεγχος σε επίπεδο εργοστασίου (shop floor control)

Τα βιομηχανικά συστήματα προγραμματισμού, που έχουν εξετασθεί έως τώρα, είναι υπεύθυνα για τον μακροχρόνιο προγραμματισμό. Αντίθετα, τα συστήματα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου (shop floor control) υλοποιούν τις διαδικασίες του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού (short-term dispatching). Τα συστήματα ελέγχου επιπέδου εργοστασίου είναι υπεύθυνα για την κατανομή των παραγωγικών πόρων, που εμφανίζονται με την μορφή εργατικού δυναμικού, εργαλείων και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στις διάφορες παραγ-

γελίες σε επίπεδο παραγωγής. Τα συστήματα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου, χρησιμοποιούν την πληροφορία, που παρέχεται από τα συστήματα προγραμματισμού, για να προσδιορίσουν τις παραγγελίες για τις οποίες πρέπει να αναληφθεί κάποια ενέργεια [12].

Τα συστήματα ελέγχου επιπέδου εργοστασίου (shop floor control) συμπληρώνουν άλλα συστήματα προγραμματισμού, όπως τα συστήματα προγραμματισμού απαιτήσεων υλικών και προγραμματισμού απαιτήσεων παραγωγικού δυναμικού. Αυτά τα συστήματα προγραμματισμού προσδιορίζουν τους παραγωγικούς πόρους που απαιτούνται από το σύστημα ελέγχου επιπέδου εργοστασίου και θέτουν τους στόχους, που πρέπει αυτό το σύστημα να ικανοποιήσει. Το σύστημα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου είναι στην συνέχεια υπεύθυνο για την χρησιμοποίηση των πόρων αυτών με τέτοιο τρόπο, ώστε να πετύχει με αποτελεσματικό και αποδοτικό τρόπο τους στόχους του. Ο ρόλος του συστήματος ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου είναι να κλείσει τον κύκλο μεταξύ των φάσεων του προγραμματισμού και της υλοποίησης μέσα στο σύστημα παραγωγής, μέσω της ανατροφοδότησης των συστημάτων προγραμματισμού με πληροφορίες, που αφορούν στο επίπεδο εργοστασίου.

Εντολή παραγωγής (Shop Order)

Ένα κεντρικό σημείο, για κάθε σύστημα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου, αποτελεί η εντολή παραγωγής, η οποία μεταφέρεται για υλοποίηση (release) από το σύστημα προγραμματισμού στο επίπεδο εργοστασίου (shop floor). Όλες οι δραστηριότητες, που αναλαμβάνει το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου, έχουν ως σκοπό να διασφαλίσουν την σωστή από άποψη χρόνου και απόδοσης, ολοκλήρωση της κάθε εντολής παραγωγής.

Η εντολή παραγωγής είναι μια εξουσιοδότηση, που δίδεται από το σύστημα προγραμματισμού προς το επίπεδο εργοστασίου, για την παραγωγή μιας προκαθορισμένης ποσότητας από ένα συγκεκριμένο είδος (όπως αυτό προσδιορίζεται από τον κωδικό του κομματιού) και η οποία πρέπει να βρίσκεται στον αποθηκευτικό χώρο την προκαθορισμένη χρονική στιγμή (π.χ. στην ημερομηνία ολοκλήρωσης της παραγγελίας). Η εντολή παραγωγής επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου να κατανέμει τους απαιτούμενους φυσικούς πόρους (π.χ. αποθέματα, μηχανές, εργασία και εργαλεία) με τέτοιο τρόπο, ώστε να εκτελεσθεί η εντολή παραγωγής.

Υπάρχουν δυο ροές που συνοδεύουν την εντολή παραγωγής και τις οποίες πρέπει να διαχειρισθεί το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου. Η πρώτη αφορά στην ροή του προϊόντος και στην φυσική κατανομή των πόρων. Η δεύτερη ροή, είναι η ροή της πληροφορίας. Καθώς η εντολή παραγωγής εξελίσσεται μέσω των διαφόρων φάσεων επεξεργασίας, δημιουργεί πληροφορίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της προόδου της εκτέλεσης της εντολής. Αυτή η ροή πληροφορίας χρησιμοποιείται τόσο από το σύστημα προγραμματισμού, όσο και από το σύστημα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου. Είναι η ίδια ροή πληροφορίας, που επιτρέπει στο σύστημα ελέγ-

χου επιπέδου εργοστασίου να τερματίσει τον κύκλο των επαναλήψεων που έχουν αρχίσει από το σύστημα προγραμματισμού.

Αρχικά, η εντολή παραγωγής είναι μια «εντολή πρόθεσης» (statement of

LMS

intent). Δηλαδή, περιγράφει την τελική μορφή του κομματιού που φθάνει για επεξεργασία στο επίπεδο εργοστασίου. Αυτή η μορφή περιγράφεται με βάση ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως η ποσότητα, ο κωδικός κομματιού και η ημερομηνία ολοκλήρωσης. Καθώς η εντολή παραγωγής εξελίσσεται μέσω των διαφόρων φάσεων επεξεργασίας μέσα στον χώρο παραγωγής, υφίσταται μια διαδικασία φυσικού μετασχηματισμού. Σε κάθε στάδιο, η προσθήκη εξαρτημάτων, εργασίας, εργαλείων, και δυναμικού των μηχανών αλλάζει την εντολή παραγωγής, πλησιάζοντας στην απαιτούμενη τελική μορφή. Σε κάθε στάδιο πρέπει να ληφθεί μια απόφαση σχετικά με τον μελλοντικό χειρισμό της εντολής. Αυτή η απόφαση βασίζεται στην σύγκριση της πραγματικής εξέλιξης της εντολής σε σχέση με αυτή που είχε προγραμματισθεί.

Οι κυριότεροι παραγωγικοί πόροι (The Major Resources)

Το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου διαχειρίζεται την ροή των εντολών παραγωγής και κατανέμει τις κύριες ποσότητες τεσσάρων ειδών παραγωγικών πόρων στην εντολή παραγωγής. Οι πόροι αυτοί είναι:

- *Ανθρώπινο Παραγωγικό Δυναμικό (ManPower)*. Αυτός ο παραγωγικός πόρος περιλαμβάνει όλο το προσωπικό, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο επίπεδο εργοστασίου (shop floor), για την εκτέλεση των προγραμμάτων παραγωγής που του έχουν αποδεσμευθεί για υλοποίηση (release). Το ανθρώπινο δυναμικό μπορεί να εμφανίζεται με διάφορες μορφές όπως υπερωρίες, μεταφορά εργαζομένων από άλλα τμήματα, μερική απασχόληση. Το ανθρώπινο δυναμικό περιλαμβάνει τόσο το άμεσο όσο και το έμμεσο εργατικό δυναμικό.
- *Εργαλεία (Tooling)*. Περιλαμβάνει όλον τον εξοπλισμό και τα ειδικά εργαλεία, που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της προετοιμασίας και της λειτουργίας μιας μηχανής ή κατά την διαδικασία συναρμολόγησης.
- *Παραγωγικό Δυναμικό Μηχανών (Machine Capacity)*. Είναι η συνολική ποσότητα του παραγωγικού δυναμικού, που παρέχεται από τον διαθέσιμο εξοπλισμό.
- *Υλικά (Material)*. Είναι το συνολικό απόθεμα των εξαρτημάτων, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ολοκλήρωση των εντολών παραγωγής.

Το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου δεν καθορίζει το επίπεδο χρήσης κάθε παραγωγικού πόρου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για αυτήν την λειτουργία είναι κυρίως υπεύθυνο το σύστημα προγραμματισμού. Το σύστημα προγραμματισμού προσδιορίζει την συνολική ποσότητα του διαθέσιμου υλικού και επίσης προσδιορίζει τον αριθμό των ανθρωποωρών, που είναι διαθέσιμες σε κάθε μια χρονική περίοδο. Από την άποψη αυτήν, το σύστημα προγραμματισμού περιορίζει το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου, τοποθετώντας ένα ανώτατο όριο για την διαθεσιμότητα αυτών των παραγω-

γικών πόρων.

Το σύστημα ελέγχου στο επίπεδο εργοστασίου πρέπει να λειτουργεί μέσα σε αυτούς τους περιορισμούς. Είναι υπεύθυνο για την διανομή των διαφόρων πόρων στις κύριες εντολές παραγωγής, ελέγχει και παρακολουθεί την χρησιμοποίηση των πόρων αυτών μετά την διαθεσή τους.

Οι κύριες δραστηριότητες ενός συστήματος ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου (shop floor control)

Οι δραστηριότητες που ελέγχονται από ένα σύστημα shop floor control χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες, οι οποίες είναι:

- Ελεγχος/αποδέσμευση για υλοποίηση της εντολής (order review/release)
- Λεπτομερής διάθεση (detailed assignment)
- Συλλογή/Παρακολούθηση των δεδομένων
- Ανάδραση/Διορθωτικές κινήσεις
- Απόσυρση της εντολής παραγωγής (order disposition)

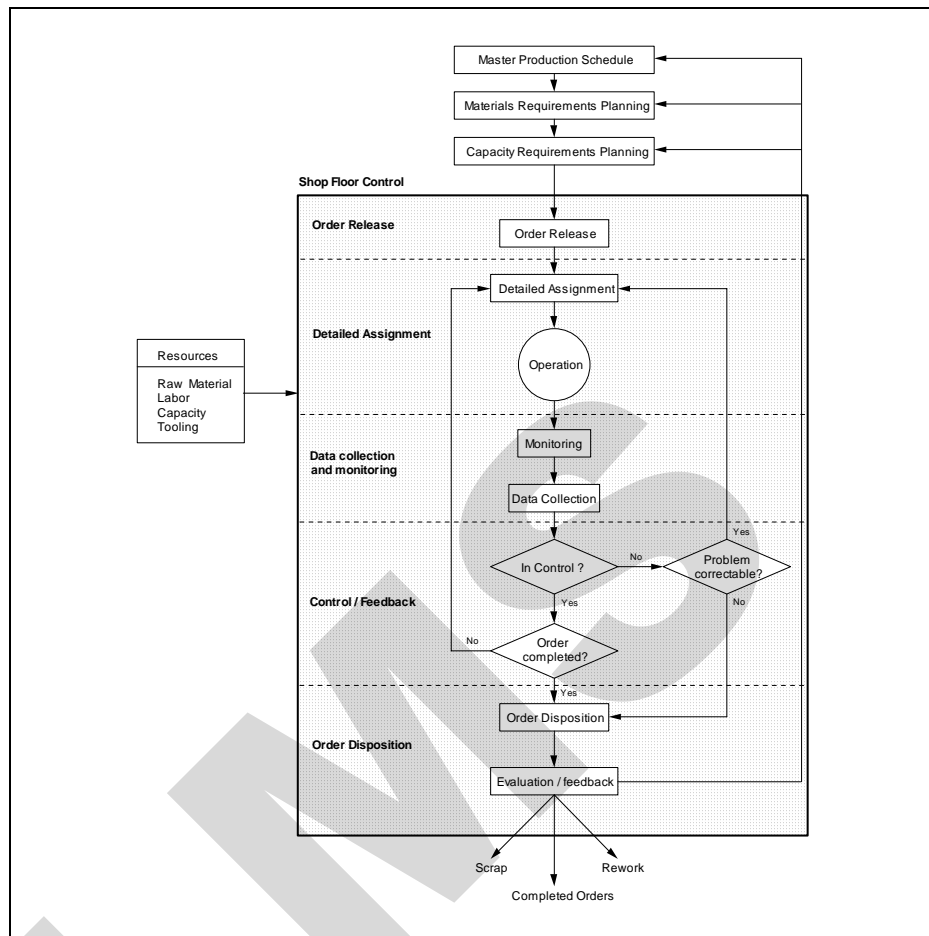
Αυτές οι πέντε κατηγορίες δραστηριοτήτων (Σχ. 6.22 [12]) περιλαμβάνουν όλη την διαδικασία μετασχηματισμού μιας προγραμματισμένης εντολής σε ολοκληρωμένη εντολή, η οποία είναι στην συνέχεια διαθέσιμη να υποστηρίξει τις επόμενες δραστηριότητες του συστήματος προγραμματισμού.

Ελεγχος/μεταφορά για υλοποίηση της εντολής (order review/release): Περιλαμβάνει εκείνες τις δραστηριότητες, που πρέπει να πραγματοποιηθούν πριν μια εντολή παραγωγής αποδεσμευθεί (release) για υλοποίηση στο επίπεδο παραγωγής. Αυτές οι δραστηριότητες είναι απαραίτητες για τον έλεγχο της ροής πληροφορίας και των εντολών παραγωγής, οι οποίες διέρχονται από το σύστημα προγραμματισμού προς το σύστημα υλοποίησης της παραγωγής και επίσης για να διασφαλίζουν, ότι οι εντολές αυτές έχουν μια λογική πιθανότητα να ολοκληρωθούν μέσα στα προκαθορισμένα χρονικά όρια και στις ποσότητες που απαιτούνται. Η πρώτη από τις ενέργειες του ελέγχου της εντολής παραγωγής είναι η τεκμηρίωση της.

Μια εντολή παραγωγής μπορεί να θεωρηθεί σαν μια έγκριση για την παραγωγή ορισμένης ποσότητας από ένα συγκεκριμένο είδος και μέσα σε προκαθορισμένα χρονικά πλαίσια. Οι ενέργειες τεκμηρίωσης των εντολών παραγωγής παρέχουν πληροφορίες, που δεν προέρχονται από το σύστημα προγραμματισμού, αλλά που είναι απαραίτητες για το επίπεδο εργοστασίου. Συνήθως, σε αυτή την φάση, προστίθενται στην παραγγελία οι ακόλουθες πληροφορίες:

- *Αναγνώριση της εντολής (order identification):* Σε κάθε εντολή δίδεται ένας αριθμός ή ένας κωδικός, ο οποίος διευκολύνει την ανίχνευση της εντολής μέσα στο επίπεδο παραγωγής και την ανάκτηση των απαραίτητων πληροφοριών για την εντολή (π.χ. χρόνος επεξεργασίας ή επόμενη διεργασία). Η αναγνώριση της εντολής (που μπορεί να είναι

διαφορετική από τον κωδικό του κομματιού) συνδέει το επίπεδο εργοστασίου με το σύστημα προγραμματισμού.



Master Production Schedule = Βασικό Χρονοπρόγραμμα Παραγωγής
 Materials Requirements Planning = Προγραμματισμός απαιτήσεων υλικών
 Capacity Requirements Planning = Προγραμματισμός απαιτήσεων παραγωγικού δυναμικού
 Order Release = Αποδέσμευση παραγγελίας για υλοποίηση
 Detailed assignment = Λεπτομερής διάθεση
 Operation = Λειτουργία
 Monitoring = Παρακολούθηση
 Data Collection = Συλλογή δεδομένων
 In Control = Υπό έλεγχο
 Problem correctable = Το πρόβλημα

επιδιορθώνεται
 Order completed = Ολοκλήρωση εντολής παραγωγής
 Order disposition = Απόσυρση εντολής
 Evaluation/Feedback = Αξιολόγηση/Ανάδραση
 Scrap = Απόρριμματα
 Completed Orders = οκληρωμένες εντολές παραγωγής
 Rework = Επανεπεξεργασία
 Resources = Παραγωγικοί πόροι
 Raw Material = Πρώτες ύλες
 Labor = Εργατικό δυναμικό
 Capacity = Παραγωγικό Δυναμικό
 Tooling = Εργαλεία

Σχήμα 6.22 Έλεγχος σε Επίπεδο Παραγωγής: Ολοκληρωμένο Πλαίσιο

- *Ακολουθία διεργασιών (Routings)*: Μια εντολή περιγράφεται με βάση τις κύριες διεργασίες, από τις οποίες πρέπει να περάσει προκειμένου να ολοκληρωθεί. Η ακολουθία των διεργασιών (routing) βοηθά επίσης στον προσδιορισμό των απαιτήσεων της εντολής σε παραγωγικούς πόρους.
- *Time standards*: Η εντολή παραγωγής περιγράφεται σε σχέση με τους παραγωγικούς πόρους (μηχανές και εργατικό δυναμικό), που απαιτούνται σε κάθε φάση του μετασχηματισμού της σε τελικό προϊόν. Οι πληροφορίες αυτές είναι σημαντικές για δραστηριότητες όπως ο προσδιορισμός της αλληλουχίας/προγραμματισμού εκτέλεσης των εντολών παραγωγής (sequencing/dispatching), η παρακακολούθηση και η διαχείριση του παραγωγικού δυναμικού.
- *Απαιτήσεις Υλικών*: Η εντολή περιγράφεται με βάση τις πρώτες ύλες και τα εξαρτήματα, που απαιτούνται καθώς επίσης και την φάση παραγωγής όπου αυτά τα εξαρτήματα είναι απαραίτητα.
- *Απαιτήσεις Εργαλείων (Tooling requirements)*: Οι εντολές καθώς εξελίσσονται μέσα στις διάφορες φάσεις παραγωγής, μπορεί να απαιτούν ειδικά εργαλεία. Τα εργαλεία, που απαιτούνται καθώς και η αντίστοιχη φάση, πρέπει να προσδιορίζονται και οι πληροφορίες αυτές να μεταβιβάζονται στην εντολή παραγωγής. Αυτές οι πληροφορίες σχηματίζουν την βάση για την έκδοση εντολών για εργαλεία.
- *Άλλα*: Άλλες πληροφορίες, που παρέχονται στο στάδιο αυτό μπορεί να είναι αναφορές, ημερομηνίες ολοκλήρωσης, καθώς επίσης και ειδικές απαιτήσεις σχετικά με τον χειρισμό των υλικών.

Αυτές οι πληροφορίες λαμβάνονται από ένα σύνολο αρχείων, που μπορεί να είναι είτε τοποθετημένα κεντρικά (με την μορφή μιας απλής βάσης δεδομένων) είτε διασκορπισμένα στα διάφορα τμήματα της επιχείρησης. Στην δεύτερη περίπτωση, για παράδειγμα, πληροφορίες, που αφορούν στις ακολουθίες των διεργασιών (routings) και στην τυποποίηση των χρόνων, προέρχονται από τα αρχεία, που περιέχουν κατασκευαστικές πληροφορίες (engineering files).

Ένα άλλο τμήμα της δραστηριότητας ελέγχου/αποδέσμευσης προς υλοποίηση της εντολής (order review/release) ελέγχει την κατάσταση του αποθέματος των εξαρτημάτων και των πρώτων υλών, που απαιτούνται από την εντολή παραγωγής, ώστε να εξασφαλισθεί ότι θα είναι διαθέσιμα σε ικανοποιητικές ποσότητες στην κατάλληλη χρονική στιγμή.

Η διαθεσιμότητα των αποθεμάτων, από μόνη της, είναι αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για την επιτυχή ολοκλήρωση μιας εντολής παραγωγής. Μια άλλη απαίτηση είναι η διαθεσιμότητα του παραγωγικού δυναμικού. Κατά την δραστηριότητα αξιολόγησης του παραγωγικού δυναμικού, το απαιτούμενο δυναμικό από την εντολή παραγωγής συγκρίνεται με το διαθέσιμο παραγωγικό δυναμικό του συστήματος. Σε αυτή την φάση πρέπει να αποφασισθεί αν το δυναμικό είναι επαρκές ή όχι. Αν δεν είναι επαρκές, τότε ίσως πρέπει να καθυστερήσει η αποστολή της εντολής για υλοποίηση, έως ότου γίνει διαθέσιμο το απαραίτητο παραγωγικό δυναμικό. Η υπερφόρτωση του συστήματος,

που θα έχει ως συνέπεια τις αυξανόμενες ουρές αναμονής και την επιμήκυνση των χρόνων διεκπεραίωσης, μπορεί να αποφευχθεί με την αξιολόγηση του παραγωγικού δυναμικού.

Η τελευταία δραστηριότητα, που ανατίθεται στην διαδικασία ελέγχου/αποδέσμευσης για υλοποίηση (review/release), είναι η εξισορρόπηση του εργασιακού φορτίου (load leveling). Οι εντολές, που πρέπει να αποδεσμεύονται για υλοποίηση από το σύστημα προγραμματισμού, δεν αποδεσμεύονται αμέσως στα περισσότερα συστήματα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου. Αντιθέτως, συσσωρεύονται για ένα μικρό χρονικό διάστημα, ώστε να εξομαλυνθεί το φορτίο εργασίας στο επίπεδο εργοστασίου μέσω του ελέγχου του ρυθμού με τον οποίο αποδεσμεύονται οι εντολές στην παραγωγή για υλοποίηση. Αυτή η δραστηριότητα [15, 16] επιδιώκει να διασφαλίσει την αυξημένη χρήση του παραγωγικού δυναμικού, μέσω της εξομάλυνσης των μέγιστων και των ελάχιστων τιμών του φορτίου εργασίας στα κέντρα εργασίας.

Οι διάφορες δραστηριότητες των εντολών ελέγχου/αποδέσμευσης για υλοποίηση των εντολών παραγωγής είναι δραστηριότητες βραχύχρονου προγραμματισμού. Δεν είναι απαραίτητο, ότι οι πόροι που απαιτούνται για τις κύριες εντολές να δεσμεύονται πραγματικά. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα αυτών των πόρων έχει αξιολογηθεί, για να προσδιορισθεί εάν είναι ικανοποιητική, ώστε να δικαιολογεί την αποδέσμευση των εντολών. Η πραγματική δέσμευση των παραγωγικών πόρων σε μια δεδομένη εντολή είναι το κύριο σημείο εστίασης της δεύτερης ομάδας δραστηριοτήτων ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου, που αποκαλείται λεπτομερής διάθεση.

Λεπτομερής Διάθεση (Detailed assignment): Το σύστημα ελέγχου του επιπέδου παραγωγής πραγματοποιεί την διανομή τεσσάρων κύριων παραγωγικών πόρων, που είναι διαθέσιμοι σε αυτό:

- Υλικά
- Εργατικό δυναμικό
- Εργαλεία
- Δυναμικό μηχανών

Οι πόροι αυτοί πρέπει να χρησιμοποιούνται για να ικανοποιούν όχι μόνο την ζήτηση των ανταγωνιστικών εντολών παραγωγής, αλλά για να υποστηρίξουν και άλλες δραστηριότητες, που απαιτούνται για την διατήρηση της διαθεσιμότητας τους (π.χ. προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση). Οι δραστηριότητες, που περιλαμβάνονται στην διαδικασία "λεπτομερούς διάθεσης", αναλαμβάνουν να αντιστοιχίσουν το απόθεμα των πόρων του επιπέδου εργοστασίου με την ανταγωνιστική ζήτηση, που αναφέρεται σε αυτούς τους πόρους. Οι αποφάσεις διάθεσης, που παίρνονται με βάση τα προηγούμενα συσχετίζοντας το απόθεμα με την ζήτηση, πρέπει να είναι αρκετά λεπτομερείς, ώστε να ικανοποιούν τα ακόλουθα:

1. Τύποι των παραγωγικών πόρων (Type of Resources): Η διαδικασία διάθεσης των παραγωγικών πόρων πρέπει να αναγνωρίζει τον ειδικό

- τύπο του κάθε πόρου, ο οποίος θα διατεθεί.
2. Ποσότητα των παραγωγικών πόρων: Η ποσότητα των παραγωγικών πόρων, που θα χρησιμοποιηθούν, πρέπει να προσδιορίζεται σε όρους κατανοητούς για τις διαθέσεις. Για παράδειγμα, το εργατικό δυναμικό, που θα χρησιμοποιηθεί, μπορεί να περιγραφεί σε κανονικές εργασιακές ώρες.
 3. Η χρονική στιγμή (Timing) διάθεσης των παραγωγικών πόρων: Η χρονική στιγμή, στην οποία γίνεται η διάθεση των πόρων, πρέπει επίσης να προσδιορίζεται, περιλαμβάνοντας την αναμενόμενη χρονική στιγμή, στην οποία οι παραγωγικοί πόροι πρόκειται να διατεθούν και την αναμενόμενη χρονική στιγμή, στην οποία οι πόροι θα αποδεσμευθούν (released).
 4. Η τοποθέτηση των πόρων μέσα στον χώρο παραγωγής: Εάν υπάρχουν περισσότεροι του ενός όμοιοι παραγωγικοί πόροι σε διαφορετικά σημεία, τότε η διαδικασία ανάθεσης των εργασιών θα πρέπει να προσδιορίζει, για μια συγκεκριμένη εντολή, ποιος από αυτούς τους πόρους θα διατεθεί στην εντολή αυτή.
 5. Προτεραιότητα επεξεργασίας: Το τελευταίο χαρακτηριστικό της διαδικασίας ανάθεσης των εντολών είναι ο προσδιορισμός της αλληλουχίας, με την οποία οι ανταγωνιστικές εντολές θα επιτρέπεται να ανατεθούν στους περιορισμένους πόρους του συστήματος.

Τρεις κύριες δραστηριότητες συμπληρώνουν την διαδικασία λεπτομερούς ανάθεσης εργασιών. Αυτές είναι οι (1) η αλληλουχία εκτέλεσης/διεκπεραίωσης των εντολών, (2) η προγραμματισμένη συντήρηση και (3) άλλες εντολές διάθεσης.

Όταν μια εντολή παραγωγής προωθείται στο επίπεδο παραγωγής, πρέπει να ανταγωνισθεί με άλλες εντολές παραγωγής για πρόσβαση στους πόρους στο επίπεδο εργοστασίου. Αυτές οι εντολές συχνά διαφοροποιούνται ως προς τα χαρακτηριστικά τους, όπως οι ημερομηνίες ολοκλήρωσης, ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας, ο χρόνος που απομένει μέχρι την ημερομηνία παράδοσης της παραγγελίας και ο αριθμός των διεργασιών που απομένουν έως ότου ολοκληρωθεί η εντολή παραγωγής. Η διαδικασία διάθεσης των παραγωγικών πόρων στις εντολές παραγωγής καλείται αλληλουχία εκτέλεσης/διεκπεραίωσης (sequencing / dispatching) των εντολών.

Η κύρια εργασία της διαδικασίας sequencing/dispatching είναι ο προσδιορισμός της σειράς προτεραιότητας εκτέλεσης των εντολών. Μια πρόχειρη μέθοδος προσδιορισμού της σειράς προτεραιότητας εκτέλεσης των εντολών χρησιμοποιεί κανόνες διεκπεραίωσης όπως την συντομότερη ημερομηνία παράδοσης (earliest due date EDD), τον μικρότερο χρόνο επεξεργασίας (shortest processing time SPT), κ.λ.π. Μια τέτοια προέγγιση ταξινομεί τις εργασίες, που βρίσκονται σε αναμονή σε μια ουρά, με βάση την εφαρμογή κάποιου από τους κανόνες διεκπεραίωσης και επιλέγει έναν από τους διαθέσιμους παραγωγικούς πόρους του συστήματος. Η πρώτη εργασία από την ταξινομημένη ουρά αναμονής, που αναφέραμε προηγουμένως, ανατίθεται στον πόρο που

επιλέχθηκε. Η προσέγγιση αυτή χαρακτηρίζεται από το γεγονός, ότι το πρόβλημα διάθεσης των εργασιών χωρίζεται σε δύο μέρη, τα οποία είναι: η επιλογή ενός από τους πολλούς διαθέσιμους πόρους και η επιλογή της εργασίας, που θα ανατεθεί στον πόρο αυτό. Επομένως, οι πόροι και οι εργασίες δεν λαμβάνονται υπ' όψη ταυτόχρονα αλλά *σειριακά* σε ένα σημείο απόφασης. Γενικά, ένας κανόνας ή ένας συνδυασμός κανόνων διεκπεραίωσης μπορεί να βελτιστοποιεί κάποιο επί μέρους χαρακτηριστικό του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη και ένας αριθμός άλλων χαρακτηριστικών, που μπορεί να αλλάζουν δυναμικά. Η εφαρμογή τέτοιων κανόνων απαιτεί μια μέθοδο δοκιμής-λάθους, όπου το σύστημα προσομοιώνεται με την χρήση ενός κανόνα. Στην συνέχεια το αποτέλεσμα εξετάζεται, κατόπιν ένας άλλος κανόνας εφαρμόζεται και πάλι εξετάζεται το αποτέλεσμα, κ.λπ. έως ότου επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ χρονοβόρα και επομένως δεν είναι πρακτική, όταν το περιβάλλον αλλάζει δυναμικά.

Οι παραγωγικοί πόροι εκτός από τις εντολές παραγωγής μπορεί να διατεθούν και σε άλλες δραστηριότητες όπως η προληπτική συντήρηση, η προγραμματισμένη συντήρηση και έμμεσες παραγωγικές δραστηριότητες (indirect labour activities). Οι δραστηριότητες αυτές πραγματοποιούνται, προκειμένου να εξομαλύνουν το τρέχον επίπεδο εκμετάλευσης του παραγωγικού δυναμικού (στην περίπτωση της προγραμματισμένης συντήρησης) ή για να χρησιμοποιηθεί το δυναμικό, που είναι διαθέσιμο αλλά που δεν απαιτείται, από τις εντολές στο επίπεδο εργοστασίου (στην περίπτωση μεταφοράς εργατικού δυναμικού στις έμμεσες παραγωγικές δραστηριότητες).

Συλλογή/Παρακολούθηση των Δεδομένων (Data collection/monitoring). Οι πληροφορίες συνδέουν το σύστημα προγραμματισμού με το σύστημα εκτέλεσης των εργασιών. Οι πληροφορίες, που παρέχονται από το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου (shop floor), είναι το κύριο μέσο για την καταγραφή της φυσικής ροής από το σύστημα προγραμματισμού. Η συλλογή, η καταγραφή και η ανάλυση αυτών των πληροφοριών γίνεται μέσω της διαδικασίας συλλογής/παρακολούθησης σε επίπεδο εργοστασίου. Η πρώτη εργασία αυτής της διαδικασίας περιλαμβάνει την συλλογή των πληροφοριών, που αφορούν στην πραγματική εξέλιξη της εντολής καθώς κινείται μέσα στο σύστημα. Οι πληροφορίες, που συλλέγονται, περιλαμβάνουν:

- Την παρούσα θέση της εντολής παραγωγής
- Την παρούσα κατάσταση υλοποίησης της εντολής παραγωγής
- Τους πραγματικούς πόρους, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διεργασία
- Τους πραγματικούς πόρους, που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες διεργασίες
- Όλες τις απρογραμματίστες καθυστερήσεις που σημειώθηκαν.

Έλεγχος/Ανάδραση. Στις περιπτώσεις, που η πραγματική εξέλιξη μιας εντολής παραγωγής, υπερβαίνει τα προκαθορισμένα περιθώρια απόκλισης από την προγραμματισμένη εξέλιξη της εντολής, τότε απαιτούνται ορισμένες διορθω-

τικές παρεμβάσεις από τους υπεύθυνους. Η εξέλιξη μπορεί να παρακολουθείται ως προς διάφορες διαστάσεις: στάδιο ολοκλήρωσης, κόστος, απορρίμματα που παρήχθησαν ή την χρονική απόσταση στην ημερομηνία ολοκλήρωσης.

Ο έλεγχος του παραγωγικού δυναμικού αναφέρεται στις διορθωτικές ενέργειες, που επιχειρούν να λύσουν τα προβλήματα μέσω των πολύ βραχυπρόθεσμων ρυθμίσεων στους διαθέσιμους πόρους στο επίπεδο παραγωγής. Παραδείγματα τέτοιων βραχυπρόθεσμων ρυθμίσεων είναι:

- Αλλαγές στον ρυθμό εργασίας
- Χρησιμοποίηση υπερωριών ή μερική απασχόληση εργατών
- Χρήση παραγωγικού δυναμικού ασφαλείας
- Εναλλακτικές ακολουθίες διεργασιών (alternative routings)
- Διάσπαση των παρτίδων (Lot splitting)
- Ανάθεση σε υπεργολάβους της επιπρόσθετης εργασίας

Απόσυρση (disposition) των εντολών. Η πέμπτη και τελευταία ομάδα δραστηριοτήτων, που περιλαμβάνονται στο σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου, είναι η διαδικασία απόσυρσης των εντολών. Οι δραστηριότητες απόσυρσης της εντολής είναι αυτές, που απαιτούνται, για να μεταφερθεί εκτός ευθύνης του συστήματος ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου μια εντολή, η οποία είχε αποδεσμευτεί για υλοποίηση. Δύο από τις προϋποθέσεις, που απαιτούν τέτοια μεταφορά, είναι: (1) η ολοκλήρωση των εντολών (2) τα απορρίμματα (scrap).

Στην πρώτη περίπτωση η εντολή παραγωγής έχει υλοποιηθεί, δεν αποτελεί πλέον μέρος του συστήματος ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου και η πληροφορία σχετικά με τα αποθέματα ενημερώνεται αντίστοιχα. Η ευθύνη για την ολοκληρωμένη εντολή παραγωγής περνά από το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου στο σύστημα ελέγχου των αποθεμάτων.

Στη δεύτερη περίπτωση τα απορρίμματα μεταφέρονται από το σύστημα ελέγχου του επιπέδου παραγωγής, επειδή δεν μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν από αυτό. Οι σχετικές βάσεις δεδομένων ενημερώνονται, ώστε να αντανακλούν τις αλλαγές της κατάστασης των διαφόρων ειδών (items) (από καλά κομμάτια σε απορρίμματα).

Ως μέρος της διαδικασίας απόσυρσης, η ποσότητα, που παραλαμβάνεται από το επίπεδο εργοστασίου (shop floor), καταγράφεται και έτσι αξιολογείται η απόδοση του συστήματος. Η αξιολόγηση της απόδοσης περιλαμβάνει την καταγραφή της πραγματικής απόδοσης του επιπέδου εργοστασίου κατά την ολοκλήρωση της εντολής. Οι μετρήσεις απόδοσης, που συλλέγονται, μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Τον αριθμό των απαιτούμενων εργατοωρών
- Την κατανομή μεταξύ των προγραμματισμένων εργατοωρών και των υπερωριών
- Τα υλικά που απαιτούνται από την εντολή
- Τον αριθμό των ωρών, που απαιτείται για την προετοιμασία των μηχανών

- Τα εργαλεία (tooling) που απαιτούνται
- Την ημερομηνία ολοκλήρωσης της εντολής παραγωγής
- Το ποσό των κομματιών προς επανεπεξεργασία ή των απορριμμάτων, που δημιουργούνται από την εντολή παραγωγής
- Τον αριθμό των μηχανοωρών που απαιτούνται

Οι πληροφορίες αυτές είναι διαθέσιμες, για να χρησιμοποιηθούν και από άλλα τμήματα της επιχείρησης και αποτελούν την βάση διαφόρων εκθέσεων κοστολόγησης. Επίσης, επιτρέπουν την αξιολόγηση του συστήματος ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου, συγκρίνοντας την πραγματική απόδοση με την προγραμματισμένη. Τέλος, οι πληροφορίες, που συλλέγονται κατά την διαδικασία απόσυρσης (disposition) των εργασιών, χρησιμοποιούνται για να προσδιορίζουν και να λύνουν μακροπρόθεσμα προβλήματα του επιπέδου εργοστασίου (π.χ. έλλειψη παραγωγικού δυναμικού), καθώς και για να τροποποιούν τις τυποποιημένες παραμέτρους κόστους και χρόνου, που χρησιμοποιούνται από το σύστημα προγραμματισμού.

Αλληλεπιδράσεις των Κυριότερων Δραστηριοτήτων του Ελέγχου σε Επίπεδο Εργοστασίου (Shop Floor)

Οι πέντε κύριες δραστηριότητες ενός συστήματος ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ούτε πραγματοποιούνται όλες ταυτόχρονα. Αντιθέτως, αυτές οι λειτουργίες είναι αλληλοσυσχετιζόμενες και συνεχόμενες. Για παράδειγμα, ως θεωρήσουμε τις διαδικασίες της λεπτομερούς διάθεσης, της συλλογής/παρακολούθησης των δεδομένων και του ελέγχου/ανάδρασης. Σε κάθε στάδιο της διαδικασίας επεξεργασίας της εντολής, το προσωπικό του επιπέδου παραγωγής πρέπει να αποφασίσει εάν η εντολή έχει ολοκληρωθεί και μπορεί να προχωρήσει στα επόμενα στάδια ή χρειάζεται ειδική ή συμπληρωματική επεξεργασία. Ο προσδιορισμός της κατάστασης της εντολής είναι συνάρτηση των διαδικασιών συλλογής/παρακολούθησης δεδομένων και ελέγχου/ανάδρασης. Στην περίπτωση που η εντολή είναι έτοιμη για το επόμενο στάδιο, θα κληθούν και πάλι οι διαδικασίες λεπτομερούς διάθεσης. Επίσης, οι διαδικασίες στο επίπεδο παραγωγής, καθώς συσχετίζονται με τις διαδικασίες συλλογής/παρακολούθησης δεδομένων και ελέγχου/ανάδρασης, επηρεάζουν τις διαδικασίες ελέγχου/αποδέσμευσης για υλοποίηση της εντολής παραγωγής.

Χαρακτηριστικά ενός Συστήματος Ελέγχου του Επιπέδου Εργοστασίου (Shop Floor Control)

Υπάρχουν τέσσερα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου: το επίπεδο λεπτομέρειας, το περιθώριο λήψης αποφάσεων (Decision making latitude, το οποίο εκφράζει το πλήθος των εναλλακτικών κατά την διαδικασία λήψης αποφάσεων), ο χρονικός ορίζοντας λήψης αποφάσεων, και το επίπεδο αβεβαιότητας. Αυτά τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από

τους διαφορετικούς τύπους συστημάτων παραγωγής (Σχ. 6.23 [12]).

Type of Manufacturing Process	System Characteristics			
	Level of Detail	Decision Making Latitude	Time Horizon	Level of Uncertainty
Repetitive or Continuous	Low	Low	Long	Low
Batch	↕	↕	↕	↕
Project	High	High	Short	High

System Characteristics = Χαρακτηριστικά συστήματος
 Type of Manufacturing Process = Είδος παραγωγικής διεργασίας
 Repetitive or Continuous = Επαναληπτική ή συνεχής
 Batch = Παρτίδα

Project = Έργο
 Level of Detail = Επίπεδο λεπτομέρειας
 Decision Making Latitude = Το μέγεθος του προβλήματος λήψης αποφάσεων
 Time Horizon = Χρονικός Ορίζοντας
 Level of Uncertainty = Επίπεδο αβεβαιότητας

Σχήμα 6.23 Χαρακτηριστικά Συστημάτων Ελέγχου Επιπέδου Εργοστασίου

Το επίπεδο λεπτομέρειας αναφέρεται στην ποσότητα των λεπτομερών πληροφοριών, που απαιτούνται από το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου. Σε ένα περιβάλλον παραγωγής όπου η παραγωγή γίνεται σε παρτίδες ή σε ένα περιβάλλον παραγωγής τύπου project shop, οι λεπτομερείς πληροφορίες, που λαμβάνονται υπ' όψη από το σύστημα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου, είναι πάρα πολλές. Η ημερομηνία ολοκλήρωσης, η αλληλουχία των διεργασιών (routing), ο πίνακας των υλικών και όλες οι εντολές των μηχανολογικών αλλαγών είναι μόνο μερικές από τις λεπτομερείς πληροφορίες. Οι περισσότερες εντολές παραγωγής, σε ένα σύστημα τύπου job shop, διαμορφώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις των πελατών και αυτό απαιτεί όλες οι πληροφορίες για την εντολή να είναι διαθέσιμες στο σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου. Στα υψηλότερα επίπεδα του συστήματος προγραμματισμού μπορεί να γίνει μόνο ένα πολύ μικρό φιλτράρισμα των πληροφοριών.

Σε ένα περιβάλλον παραγωγής, όπου γίνονται πολλές επαναληπτικές διεργασίες, το επίπεδο των λεπτομερειών στο σύστημα ελέγχου χώρου παραγωγής μειώνεται σημαντικά. Τα συστήματα προγραμματισμού υψηλότερου επιπέδου προσδιορίζουν κοινές αλληλουχίες διεργασιών, τυποποιημένους πίνακες υλικών, και ελάχιστες εντολές μηχανολογικών αλλαγών. Το σύστημα ελέγχου σε επίπεδο εργοστασίου, σε αυτή την περίπτωση, δίδει έμφαση στην εκτέλεση και πολύ λίγο στον προγραμματισμό.

Ίσως ο καλύτερος τρόπος για να εξετάσουμε το επίπεδο των λεπτομερειών

είναι να το θεωρήσουμε συνεχές, με το χαμηλό επίπεδο λεπτομερειών (στο επαναληπτικό κατασκευαστικό περιβάλλον) από την μια πλευρά, το υψηλό επίπεδο λεπτομερειών (σε ένα περιβάλλον τύπου project shop) από την άλλη και ενδιάμεσο επίπεδο λεπτομερειών (σε περιβάλλον παραγωγής σε παρτίδες) μεταξύ αυτών των δύο άκρων.

Τα “περιθώρια της διαδικασίας λήψης αποφάσεων” (*Decision Making Latitude*) αναφέρονται στον αριθμό των εναλλακτικών, που είναι διαθέσιμες στον υπεύθυνο για την διαδικασία λήψης αποφάσεων. Σε μερικά συστήματα ελέγχου επιπέδου εργοστασίου (shop floor control), τα περιθώρια αυτά είναι πολύ μεγάλα, ενώ σε άλλα τα περιθώρια είναι μικρά. Το μέγεθος του “Decision Making Latitude” εξαρτάται από το περιβάλλον της παραγωγής.

Σε ένα επαναληπτικό/συνεχές περιβάλλον παραγωγής, το σύστημα προγραμματισμού υψηλότερου επιπέδου λαμβάνει τις κυριότερες αποφάσεις, αφήνοντας το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου με μικρότερα περιθώρια. Σε ένα περιβάλλον παραγωγής τύπου project shop, το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου έχει μεγάλα περιθώρια (*Decision Making Latitude*), όσον αφορά στην λήψη αποφάσεων, λόγω της αβεβαιότητας ως προς τις εργασίες και της μεγάλης ποσότητας λεπτομερών πληροφοριών. Στο περιβάλλον παραγωγής σε παρτίδες (batch), τα περιθώρια λήψης αποφάσεων (*Decision Making Latitude*) βρίσκονται μεταξύ αυτών των δυο οριακών καταστάσεων.

Ο *χρονικός ορίζοντας της λήψης αποφάσεων* περιλαμβάνει το χρονικό διάστημα, το οποίο έχει στην διάθεσή του ο υπεύθυνος για την λήψη απόφασης, αλλά και τον χρόνο επίδρασης αυτών των αποφάσεων. Το εύρος των πιθανών χρονικών οριζόντων ποικίλει από μικρό έως μεγάλο. Σε έναν μικρό χρονικό ορίζοντα ο διαθέσιμος χρόνος για την διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι αρκετά μικρός και η πιθανή επίδραση κάθε μιας απόφασης είναι επίσης μικρή. Σε ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα, ο διαθέσιμος χρόνος για την λήψη αποφάσεων είναι μεγάλος και η πιθανή επίδραση κάθε μιας απλής απόφασης είναι μεγάλη.

Σε ένα περιβάλλον παραγωγής τύπου project, το σύστημα πρέπει να παίρνει συχνές και βραχυπρόθεσμες αποφάσεις. Ο διαθέσιμος χρόνος για την λήψη αποφάσεων είναι μικρός και η επίδραση κάθε μιας απόφασης είναι επίσης μικρή. Στο περιβάλλον αυτό ο χρονικός ορίζοντας λήψης αποφάσεων είναι μικρός.

Σε ένα επαναληπτικό/συνεχές (repetitive/continuous) περιβάλλον παραγωγής, οι αποφάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος. Μερικές συνήθειες αποφάσεις είναι: «ποιό θα πρέπει να είναι το τυπικό προϊόν» και «ποιός είναι ο βέλτιστος κύκλος παραγωγής (cycle time) για κάθε κέντρο εργασίας»;

Γι' αυτούς τους τύπους των αποφάσεων υπάρχει διαθέσιμος αρκετός χρόνος για την λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, η επίδραση κάθε τέτοιας απόφασης στο επίπεδο εργοστασίου και συνολικά στην επιχείρηση είναι μεγάλη. Αυτοί οι τύποι των αποφάσεων δεν λαμβάνονται, συνήθως, σε επίπεδο εργοστασίου.

Σε ένα περιβάλλον συστήματος παραγωγής σε παρτίδες (batch), ο χρονικός ορίζοντας λήψης αποφάσεων βρίσκεται σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο. Στο περιβάλλον αυτό υπάρχουν και βραχυπρόθεσμες αποφάσεις όπως "στην συγ-

κεκριμένη χρονική στιγμή ποιά μηχανή είναι η περισσότερο κατάλληλη για την εργασία αυτή;" και μακροπρόθεσμες αποφάσεις, π.χ. "ποιούς τύπους μηχανών θα έπρεπε να προμηθευθούμε εάν συνεχίσουμε να λαμβάνουμε τέτοιους τύπους παραγγελιών;". Ακόμα μια φορά, το σύστημα ελέγχου επιπέδου εργοστασίου για περιβάλλον παραγωγής σε παρτίδες βρίσκεται μεταξύ των άλλων δύο.

Παρά το γεγονός ότι οι μεμονωμένες αποφάσεις μπορεί να έχουν μόνο βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις, η επίδοση στο επίπεδο του εργοστασίου καθορίζεται από το σύνολο αυτών των βραχυπρόθεσμων αποφάσεων. Εάν οι βραχυπρόθεσμες αποφάσεις είναι σταθερά λανθασμένες, τότε η επίδοση στο επίπεδο του εργοστασίου θα είναι μικρή, επομένως και η επίδοση όλης της επιχείρησης θα είναι μειωμένη. Όλες οι αποφάσεις, που λαμβάνονται στο επίπεδο του εργοστασίου, είτε έχουν βραχυπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα είτε μακροπρόθεσμο πρέπει να είναι "καλές" αποφάσεις.

Το μέγεθος της αβεβαιότητας συσχετίζεται τόσο με το μέγεθος της γνωστής πληροφορίας όσο και με τα εργαλεία, που είναι διαθέσιμα για χρήση στον υπεύθυνο για την διαδικασία λήψης αποφάσεων. Εάν τα συστήματα προγραμματισμού, που βρίσκονται πάνω από το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου, χειρίζονται το μεγαλύτερο μέρος της αβεβαιότητας, τότε η αβεβαιότητα στο σύστημα ελέγχου επιπέδου εργοστασίου θα είναι μειωμένη. Από την άλλη πλευρά, εάν τα συστήματα προγραμματισμού ανωτέρου επιπέδου δεν απομακρύνουν ή δεν έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν την αβεβαιότητα, τότε το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου πρέπει να αντιμετωπίσει την μεγάλη αβεβαιότητα και τις συνέπειές της.

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα τρία χαρακτηριστικά, το περιβάλλον παραγωγής τύπου project και το επαναληπτικό/συνεχόμενο περιβάλλον παραγωγής βρίσκονται στα δυο αντίθετα άκρα του φάσματος, ενώ το περιβάλλον παραγωγής σε παρτίδες βρίσκεται στο μέσον. Στο περιβάλλον παραγωγής project, με τις συνεχείς αλλαγές των εργασιών και την μεγάλη ποικιλία των απαιτήσεων σε διεργασίες, το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου πρέπει να έχει την δυνατότητα χειρισμού μεγάλης αβεβαιότητας. Σε ένα επαναληπτικό/συνεχές περιβάλλον παραγωγής, που περιλαμβάνει τυποποιημένες εργασίες και τυποποιημένη αλληλουχία διεργασιών routing), το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου πρέπει να μπορεί να χειρίζεται μικρότερο ποσοστό αβεβαιότητας. Καθώς το περιβάλλον εξελίσσεται από περιβάλλον παραγωγής τύπου project σε επαναληπτικό/συνεχές, το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου πρέπει προσαρμόζεται, ώστε να ανταποκρίνεται στις αλλαγές των αναγκών και των απαιτήσεων [12].

Το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου (shop floor control), που περιγράφηκε προηγουμένως παρουσιάστηκε στην «ιδανική» λειτουργικότητα του. Στην πραγματικότητα όμως, μόνο ορισμένα μέρη του συστήματος αυτού υπάρχουν στην βιομηχανία. Στην πράξη τα συστήματα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου είναι μερικώς αυτόματα και μερικώς χειριζόμενα από ανθρώπους. Το αντικείμενο του Ολοκληρωμένου Συστήματος Παραγωγής με Η/Υ (Computer Integrated Manufacturing-CIM), είναι εκτός των άλλων η μηχανή

νοργάνωση του συστήματος ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου και η ολοκλήρωση του με τις υπόλοιπες λειτουργίες προγραμματισμού.

6.2.5 Η Διαδικασία Παραγωγής Just In Time (JIT)

Στην διαδικασία παραγωγής JIT, ένα κέντρο εργασίας δεν πραγματοποιεί ένα βήμα παραγωγής εάν δεν κληθεί από το επόμενο κέντρο εργασίας. Κατά αυτόν τον τρόπο το σύστημα παραγωγής αντιδρά (ή σύρεται-pulled) στην ζήτηση για τελικά προϊόντα. Η προσέγγιση αυτή διαφέρει από τις τυπικές προσεγγίσεις προγραμματισμού, όπου τα τελικά προϊόντα, τα υποπροϊόντα και τα εξαρτήματα κατασκευάζονται με βάση την μελλοντική ζήτηση. Μια κάρτα (ή Kanban) είναι ένας «δείκτης-marker», ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ρυθμού (pace) των εργασιών μέσω διαδοχικής επεξεργασίας (Σχ. 6.24).

From:	Part Number		
	Part Name	Part Type	Card No.
To:	Quantity per Parent	Cart No.	Work Station

Part Number = Αριθμός κομματιού
Part Name = Όνομα κομματιού
Part Type = Τύπος κομματιού
Card No = Αριθμός καρτέλας

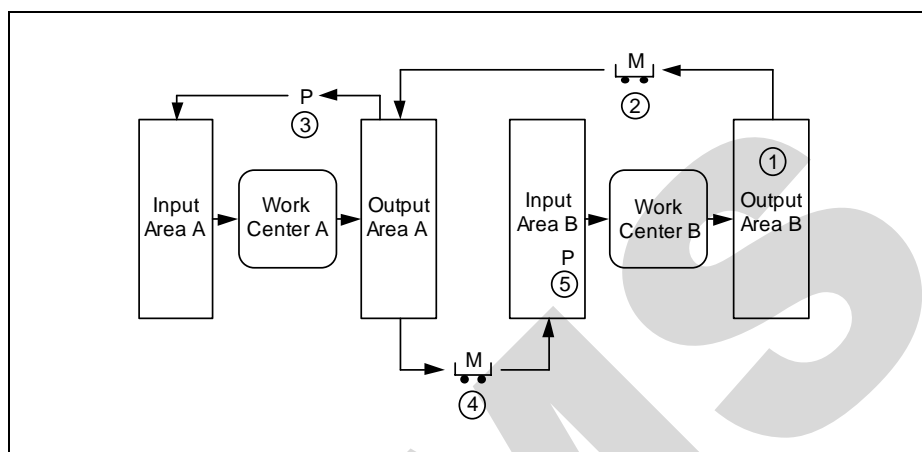
Quantity per Parent = Ποσότητα ανά προηγούμενη κατεργασία
Cart No. = Αριθμός οχήματος
Work Station = Σταθμός εργασίας

Σχήμα 6.24 Η Διαμόρφωση μιας Καρτέλας Kanban

Ο μηχανισμός του JIT μπορεί να απεικονισθεί μέσω ενός συστήματος παραγωγής με δύο κέντρα εργασίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.25. Σ' αυτό εκτελούνται οι ακόλουθες διαδικασίες:

1. Μια εντολή είναι ολοκληρωμένη, όταν ένα έτοιμο προϊόν μεταφερθεί από ένα όχημα (cart) στην περιοχή εξόδου Β. Μια καρτέλα κίνησης "move" τοποθετείται στο όχημα.
2. Το άδειο όχημα, με την καρτέλα κίνησης, μεταφέρεται από την περιοχή εξόδου Β στην περιοχή εξόδου Α. Η καρτέλα κίνησης αντικαθίσταται με καρτέλα "παραγωγής" (produce).
3. Η καρτέλα "παραγωγής" δείχνει ότι το κέντρο εργασίας Α πρέπει να πάρει υλικά από την περιοχή εισόδου Α, ώστε να παράξει ένα κομμάτι.

- τι. Το κομμάτι τοποθετείται σε ένα άδειο όχημα στην περιοχή εξόδου A και συνοδεύεται από μια κάρτα "κίνησης".
4. Το γεμάτο όχημα μεταφέρεται από την περιοχή εξόδου A στην περιοχή εισόδου B. Η καρτέλα "κίνησης" αντικαθίσταται από μια καρτέλα "παραγωγής".
 5. Η καρτέλα "παραγωγής" δείχνει στο κέντρο εργασίας B, ότι πρέπει να πάρει ένα κομμάτι από το όχημα και να κατασκευάσει από αυτό ένα τελικό προϊόν. Το τελικό προϊόν τοποθετείται στο όχημα στην περιοχή εξόδου B.



Input Area A = Περιοχή Εισόδου A
Work Center A = Κέντρο εργασίας A
Output Area A = Περιοχή εξόδου A

Input Area B = Περιοχή εισόδου B
Work Center B = Κέντρο εργασίας B
Output Area B = Περιοχή εξόδου B

Σχήμα 6.25 Σχηματική αναπαράσταση ενός JIT με Διπλό Σύστημα Kanban

Σε αυτή την ιδανική περίπτωση, δυο οχήματα μπορούν να μετακινηθούν ταυτόχρονα στο σύστημα, ώστε να κρατούν και τα δυο κέντρα εργασίας απασχολημένα. Το κάθε κέντρο εργασίας δεν θα επεξεργασθεί κομμάτι, έως ότου να λάβει μια κάρτα "παραγωγής". Ο ρυθμός παραγωγής των τελικών προϊόντων καθορίζεται από το κέντρο εργασίας με τον μικρότερο ρυθμό παραγωγής.

Η διαδικασία παραγωγής JIT έχει τους ακόλουθους στόχους:

- *Μείωση του μεγέθους των παρτίδων (lot size reduction)* –Ιδανικά το σύστημα θα έπρεπε να λειτουργεί με μέγεθος παρτίδας 1.
- *Μηδενικό Απόθεμα (zero inventory)* –Ελαχιστοποιεί το απόθεμα κομματιών υπό επεξεργασία–work in process, (στο παράδειγμα τα κομμάτια στην περιοχή εξόδου A και στην περιοχή εισόδου B).
- *Μηδέν ελαττωματικά* –Η απόρριψη ενός κομματιού σε ένα κέντρο ερ-

γασίας εξ αιτίας χαμηλής ποιότητας θα καθυστερήσει όλο το σύστημα, διότι δεν υπάρχουν αποθήκες.

Η διαδικασία παραγωγής JIT υποθέτει, ότι το κόστος παραγγελίας και προετοιμασίας των μηχανών είναι αμελητέο σε σύγκριση με το κόστος παραγωγής, κάτι το οποίο οδηγεί σε ένα βέλτιστο μέγεθος παρτίδας για τα συστατικά, το οποίο είναι ίσο με εκείνο που απαιτείται για την συναρμολόγηση μιας μονάδας τελικού προϊόντος. Η υπόθεση αυτή ισχύει, μόνο εάν οι εργασίες παραγωγής είναι επαναληπτικές και καλά καθορισμένες, τα υλικά είναι τυποποιημένα και μπορούν να επιτευχθούν ευέλικτα προγράμματα παραδόσεων με τους προμηθευτές υλικών. Το JIT είναι ένα σύστημα «αντίδρασης» (η παραγωγή αντιδρά στην ζήτηση), επομένως, μόνο βραχυπρόθεσμος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής μπορεί να επιτευχθεί (σε καθημερινή βάση). Επομένως, ο προγραμματισμός της ζήτησης δεν πρέπει να έχει σημαντικές διακυμάνσεις, αλλιώς το σύστημα παραγωγής μπορεί να αντιμετωπίζει έλλειμμα ή περίσσειμα δυναμικού. Η παραγωγή JIT δεν πρέπει να επιτρέπει, στα ελαττωματικά κομμάτια να μετακινούνται μεταξύ των διαφορετικών σταδίων της παραγωγής. Καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για να προσδιορισθούν τα ελαττωματικά κομμάτια, να βελτιωθούν οι διαδικασίες επανεπεξεργασίας και να προσδιορισθούν και να διορθωθούν οι αιτίες δημιουργίας των ελαττωμάτων. Αυτή η προσπάθεια περιλαμβάνει τόσο την χρήση εξοπλισμού όσο και την εκπαίδευση των εργαζομένων.

Η διαδικασία ελέγχου/αποδέσμευσης για υλοποίηση των εντολών είναι πολύ σημαντική στην επιτυχημένη εφαρμογή του JIT. Η παραγωγή χωρίς αποθέματα απαιτεί την προσεκτική ρύθμιση του εργασιακού φορτίου σε επίπεδο εργοστασίου. Οι εντολές, που μεταφέρονται στο σύστημα για υλοποίηση πρέπει να μην υπερβαίνουν το διαθέσιμο παραγωγικό δυναμικό σε επίπεδο εργοστασίου. Οι αναμονές (queues) και οι χρόνοι διεκπεραίωσης των παραγγελιών διατηρούνται μικροί μέσω της σωστής ρύθμισης του εργασιακού φορτίου (loading) σε επίπεδο εργοστασίου.

Στην διαδικασία παραγωγής JIT, οι δραστηριότητες ελέγχου/αποδέσμευσης για υλοποίηση μιας εντολής (review/release), είναι μέρος του προγραμματισμού της παραγωγής. Όταν οι εντολές μεταφέρονται στο σύστημα για υλοποίηση, όλα τα απαραίτητα συστατικά καλούνται από τα (parent assemblies). Κατά την διαδικασία παραγωγής JIT, η λεπτομερής ανάθεση εντολών μπορεί να γίνει αρκετά αποτελεσματικά στο επίπεδο εργοστασίου. Υπάρχει όμως και κάποια πολυπλοκότητα, η οποία εισάγεται από το JIT. Εξ αιτίας της αυξημένης σημασίας που έχει η διαδικασία προληπτικής συντήρησης, πρέπει να περιλαμβάνεται στο σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου ως μια εργασία, που πρέπει να προγραμματίζεται σε κανονική βάση. Η προληπτική συντήρηση θα απορροφήσει παραγωγικούς πόρους βραχυπρόθεσμα αλλά μακροπρόθεσμα θα αυξήσει το παραγωγικό δυναμικό, βελτιώνοντας την συνολική λειτουργία του εξοπλισμού.

Η διαδικασία παραγωγής JIT μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στις μεθόδους, που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή και παρακολούθηση της εξέ-

λιξης των εργασιών στο επίπεδο εργοστασίου. Μια από τις αλλαγές είναι αποτέλεσμα της χρήσης παρτίδων μικρού μεγέθους (lot size). Καθώς τα μεγέθη των παρτίδων μειώνονται, ο αριθμός των εντολών παραγωγής αυξάνει, δημιουργώντας περισσότερες εντολές, που θα πρέπει να καταγράφονται (track) και να παρακολουθούνται από το σύστημα ελέγχου του επιπέδου εργοστασίου. Τελικά η τυπική καταγραφή των μεμονωμένων εντολών παραγωγής μπορεί να εγκαταλειφθεί ολοκληρωτικά, όπως στην περίπτωση πολλών επαναληπτικών συστημάτων παραγωγής.

Η παρακολούθηση γίνεται μια συνεχόμενη διαδικασία, στην οποία κάθε εργαζόμενος είναι υπεύθυνος να διασφαλίζει, ότι όλα τα κομμάτια, που πέρασαν από την δική του θέση εργασίας, είναι αποδεκτής ποιότητας. Αυτή η παρακολούθηση θα αφορά όχι μόνο τις εντολές παραγωγής αλλά τον εξοπλισμό και τα εργαλεία. Η παρακολούθηση του συστήματος είναι πολύ σημαντική, επειδή πρέπει να διασφαλίζει ότι όλο το σύστημα λειτουργεί με αποδεκτό επίπεδο ποιότητας και αποτελεσματικότητας.

6.3 Μέθοδοι και Εργαλεία

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει στον αναγνώστη ορισμένες μεθόδους και εργαλεία, που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική λειτουργία των Συστημάτων Παραγωγής. Εκτός από τα εργαλεία, που ήδη παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 5, θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο αυτό η Ανάλυση Δικτύων (Network Analysis), η Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων (Decision Making), οι Εμπειρικοί Κανόνες Διεκπεραίωσης (Dispatching Heuristics), τα Διαγράμματα Gantt και τα Κριτήρια Επίδοσης (Performance Measures). Το κεφάλαιο αυτό έχει ως σκοπό, να δώσει στον αναγνώστη μια γενική εικόνα αυτών των μεθοδολογιών. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα πιο πάνω θέματα ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην εξειδικευμένη βιβλιογραφία.

6.3.1 Ανάλυση Δικτύων (Network Analysis)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται, για να περιγράψει τις πολύπλοκες σχέσεις αλληλουχίας (precedence relationships) μεταξύ των δραστηριοτήτων ενός μεγάλου έργου (project). Η περιγραφή, που προκύπτει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό ενός χρονοδιαγράμματος των δραστηριοτήτων και για να προβλέψει την ημερομηνία ολοκλήρωσης του έργου. Στην παραγωγή, η εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Δικτύων αφορά, κυρίως, έργα, που πραγματοποιούνται μια φορά (one-time projects), όπως η κατασκευή ενός νέου τμήματος εργοστασίου. Συνεχείς λειτουργίες, που γίνονται σε καθημερινή βάση απευθύνονται, συνήθως, σε τεχνικές, που περιγράφονται στο Κεφ. 6.2. Παραδείγματα μεθόδων σχεδιασμού δικτύων (ή μεθόδων προγραμματισμού έργων) είναι η Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method—CPM) και

τέλος η Τεχνική Εκτίμησης της Επίδοσης και Αναθεώρησης (Performance Evaluation and Review Technique—PERT). Οι μέθοδοι PERT και CPM στηρίζονται στις ίδιες βασικές ιδέες. Η μέθοδος PERT στηρίζεται, συνήθως, στις πιθανοθεωρητικές εκτιμήσεις του χρόνου των δραστηριοτήτων, που προκύπτουν από μια πιθανοθεωρητική διαδρομή διαμέσου ενός δικτύου δραστηριοτήτων και ενός πιθανοθεωρητικού χρόνου ολοκλήρωσης του έργου. Η μέθοδος CPM υποθέτει, συνήθως, ντετερμινιστικούς χρόνους δραστηριοτήτων. Η ανάπτυξη ενός δικτύου έργου μπορεί να χωριστεί σε: (1) ανάλυση δραστηριοτήτων, (2) σχεδίαση των σχέσεων/διαγραμμάτων (arrow diagramming) και (3) αρίθμηση των κόμβων.

Ανάλυση των Δραστηριοτήτων (Activity Analysis)

Η ελάχιστη μονάδα παραγωγικής προσπάθειας, που πρέπει να προγραμματισθεί, να σχεδιασθεί και να ελεγχθεί, ονομάζεται *δραστηριότητα*. Για μεγάλα έργα είναι πιθανό να παραβλέψουμε ορισμένες δραστηριότητες εξ αιτίας της μεγάλης πολυπλοκότητάς τους.

Activity Code	Description	Immediate Predecessor Activity	Time, Weeks
A	Organize sales office	-	6
B	Hire salespeople	A	4
C	Train salespeople	B	7
D	Select advertising agency	A	2
E	Plan advertising campaign	D	4
F	Conduct advertising campaign	D	10
G	Design package	-	2
H	Set up packaging facilities	G	10
I	Package initial stocks	H,J	6
J	Order stock from manufacturer	-	13
K	Select distributors	A	9
L	Sell to distributors	C, K	3
M	Ship stock to distributors	I,L	5

Activity Code = Κωδικός δραστηριότητας
 Description = Περιγραφή
 Organize Sales office = Οργάνωση Γραφείου Πωλήσεων
 Hire salespeople = Πρόσληψη πωλητών
 Train salespeople = Εκπαίδευση πωλητών
 Select advertising agency = Επιλογή διαφημιστικής εταιρείας
 Plan advertising campaign = Σχεδίαση διαφημιστικής εκστρατείας
 Conduct advertising campaign = Διεξαγωγή διαφημιστικής εκστρατείας
 Design package = Σχεδίαση της συσκευασίας

Set up packaging facilities = Προετοιμασία των συσκευαστικών μέσων
 Package initial stocks = Συσκευασία αρχικού αποθέματος
 Order stock from manufacturer = Παραγγελία αποθέματος από τον κατασκευαστή
 Select distributors = Επιλογή διανομέων
 Sell to distributors = Πώληση στους διανομείς
 Ship stock to distributors = Αποστολή αποθέματος στους διανομείς
 Immediate Predecessor Activity = Αμέσως προηγούμενη δραστηριότητα

Πίνακας 6.7 Διάγραμμα Αλληλουχίας (Precedence Chart,) το οποίο δείχνει τις Απαιτούμενες Δραστηριότητες, την απαιτούμενη σειρά και την απαιτούμενη διάρκειά τους, για το έργο "Είσοδος Νέου Προϊόντος στην Αγορά"

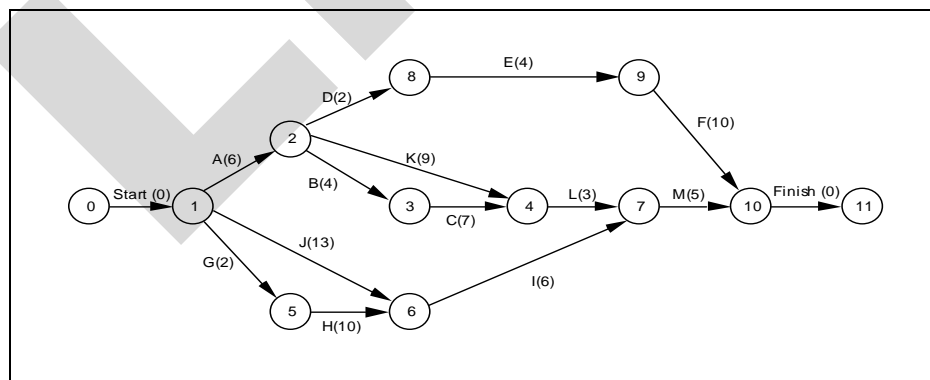
Επομένως, παρά το γεγονός ότι, συνήθως, χρησιμοποιείται εξειδικευμένο προσωπικό προγραμματισμού, η δημιουργία της λίστας των δραστηριοτήτων πραγματοποιείται σε συνεδριάσεις και συζητήσεις στρογγυλής τραπέζης, όπου συμμετέχει και διοικητικό και τεχνικό προσωπικό. Ο Πιν. 6.7 [13] παρουσιάζει μια λίστα δραστηριοτήτων για την εισαγωγή ενός νέου προϊόντος.

Σχεδίαση Δικτύων (Network Diagramming)

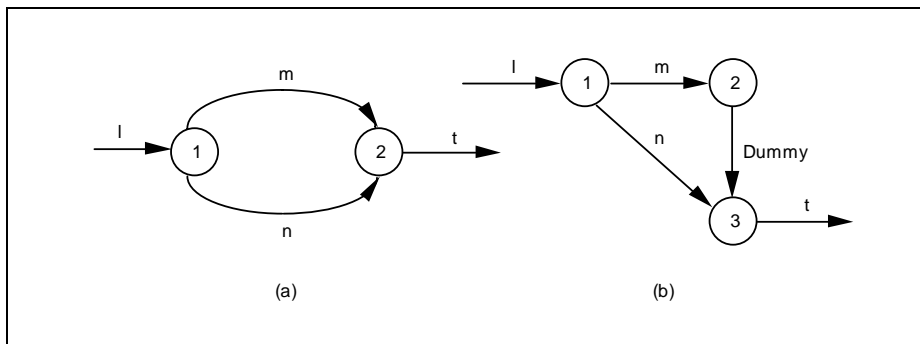
Το διάγραμμα ενός δικτύου περιγράφει τις σχέσεις αλληλουχίας (precedence relationships) μεταξύ των δραστηριοτήτων. Πρέπει να βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη, έγκυρη και εγκεκριμένη λίστα δραστηριοτήτων. Οι σημαντικές πληροφορίες, που απαιτούνται για την δημιουργία αυτών των δικτύων, προκύπτουν από τις ακόλουθες τρεις ερωτήσεις:

1. Ποιες δραστηριότητες πρέπει να έχουν ήδη ολοκληρωθεί πριν την έναρξη κάθε μιας δραστηριότητας;
2. Ποιες δραστηριότητες μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτοχρόνως;
3. Ποιες δραστηριότητες διαδέχονται αμέσως άλλες δραστηριότητες;

Η κοινή πρακτική είναι απλώς να ακολουθήσουμε προς τα πίσω (backwards) την λίστα των δραστηριοτήτων, δημιουργώντας τις αμέσως προηγούμενες (predecessors) δραστηριότητες για κάθε δραστηριότητα, που αναφέρεται στην λίστα. Το διάγραμμα του δικτύου (Σχ. 6.26) μπορεί να δημιουργηθεί, ώστε να αναπαριστά τις απαιτήσεις λογικής αλληλουχίας του Πίν. 6.7. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή αναπαράσταση των πραγματικών απαιτήσεων αλληλουχίας στο διάγραμμα του δικτύου. Μια «πλασματική» (dummy) δραστηριότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει ένα αναμφίβολο γεγονός ή κόμβο αρχής και τέλους για κάθε δραστηριότητα. Για παράδειγμα, μια λειτουργικά σωστή σχέση μπορεί να παρουσιασθεί μέσω του Σχήματος 6.27α [13], όπου δύο δραστηριότητες έχουν τον ίδιο κόμβο αρχής και τέλους.



Σχήμα 6.26 Διάγραμμα Δικτύου για το έργο «Εισαγωγή Νέου Προϊόντος στην Αγορά»



Σχήμα 6.27 (α) Οι Δραστηριότητες m και n μπορούν να υλοποιηθούν παράλληλα, αλλά αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα ίδια γεγονότα αρχής και τέλους. (β) Η χρήση "Πλασματικής" Δραστηριότητας δίνει την δυνατότητα διαχωρισμού των αριθμών των γεγονότων τέλους.

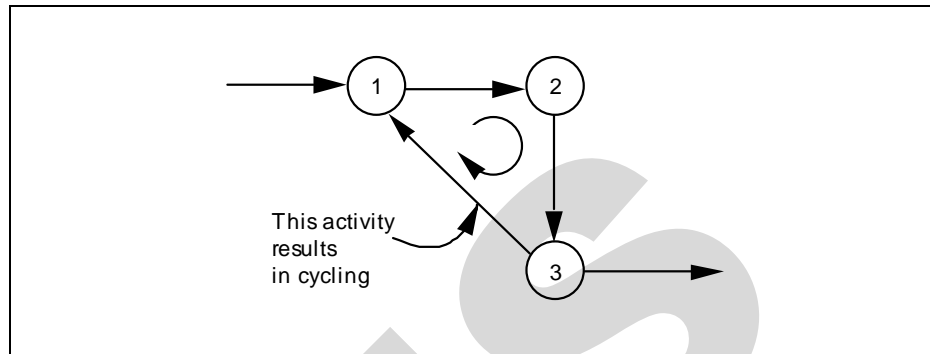
Ωστόσο, αν χρησιμοποιούσαμε το Σχ. 6.27α, δε θα ήταν δυνατόν να προσδιορίσουμε κάθε δραστηριότητα με βάση τα προηγούμενα και τα επόμενα γεγονότα, γιατί και οι δύο δραστηριότητες m και n αρχίζουν και τελειώνουν με τους ίδιους αριθμούς κόμβων. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό σε διαγράμματα μεγάλων δικτύων, τα οποία υλοποιούνται με την βοήθεια προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο υπολογιστής προγραμματίζεται να αναγνωρίζει κάθε δραστηριότητα με ένα ζεύγος αριθμών, που αντιστοιχεί σε κόμβους. Το πρόβλημα λύνεται με την εισαγωγή μιας πλασματικής δραστηριότητας (dummy activity), όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 6.27β. Η λειτουργική σχέση είναι ίδια, γιατί η πλασματική δραστηριότητα απαιτεί μηδενικό χρόνο, αλλά σε αυτή την περίπτωση οι δραστηριότητες m και n αναγνωρίζονται από διαφορετικά ζεύγη αριθμών κόμβων.

Αρίθμηση των Κόμβων (Node Numbering)

Η αρίθμηση των κόμβων, που φαίνεται στο Σχ. 6.26, έχει γίνει με έναν συγκεκριμένο τρόπο. Κάθε διάνυσμα αναπαριστά μια δραστηριότητα. Εάν προσδιορίσουμε κάθε δραστηριότητα από τον αριθμό της ουράς (i) και της κορυφής (j), οι κόμβοι αριθμούνται με τέτοιο τρόπο ώστε, για κάθε δραστηριότητα, το i είναι πάντα μικρότερο από το j , $i < j$. Οι αριθμοί για κάθε διάνυσμα αυξάνουν προοδευτικά και δεν επιτρέπεται μέσα στο δίκτυο κίνηση προς τα πίσω. Αυτή η συμφωνία είναι αποτελεσματική, στην περίπτωση χρήσης προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών για την ανάπτυξη των λογικών σχέσεων του δικτύου και την αποφυγή δημιουργίας κύκλων ή κλειστών βρόγχων (closed loops).

Ένας κλειστός βρόγχος θα μπορούσε να εμφανισθεί, εάν μια δραστηριότητα επέστρεφε πίσω στο χρόνο. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχ. 6.28 [13], που είναι απλώς η δομή του Σχήματος 6.27β με την δραστηριότητα n να έχει αντί-

στροφη κατεύθυνση. Η δημιουργία κυκλικών κινήσεων σε ένα δίκτυο μπορεί να προέρχεται από ένα λάθος ή, όταν, αναπτύσσοντας το διάγραμμα των δραστηριοτήτων, προσπαθούμε να δείξουμε την επανάληψη μιας δραστηριότητας πριν την εκκίνηση της επόμενης. Η επανάληψη μιας δραστηριότητας πρέπει να παρουσιάζεται με επιπρόσθετες ξεχωριστές δραστηριότητες, προσδιορισμένες από τους δικούς τους μοναδικούς αριθμούς κόμβων. Ένας κλειστός βρόγχος θα προκαλέσει κυκλικές επαναλήψεις χωρίς τέλος στα υπολογιστικά προγράμματα, που δεν έχουν ενσωματωμένες ρουτίνες για την ανίχνευση και αναγνώριση των κλειστών βρόγχων.



This activity results in cycling = Αυτή η δραστηριότητα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ανακύκλωσης

Σχήμα 6.28 Παράδειγμα Κλειστού Βρόγχου σε Διάγραμμα Δικτύου

Προγραμματισμός της Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Scheduling)

Με το κατάλληλα κατασκευασμένο διάγραμμα δικτύου, είναι πιθανό να αναπτυχθούν δεδομένα προγραμματισμού για κάθε δραστηριότητα αλλά και για το σύνολο του έργου. Τα δεδομένα, που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση του έργου, οι κρίσιμες δραστηριότητες που δεν μπορούν να καθυστερήσουν ή να παραταθούν και ο ταχύτερος (earliest) και αργότερος (latest) χρόνος έναρξης και ολοκλήρωσης των δραστηριοτήτων. Εάν θεωρήσουμε ως χρόνο έναρξης του έργου την χρονική στιγμή μηδέν, τότε για κάθε δραστηριότητα υπάρχει ένας ταχύτερος χρόνος έναρξης (earliest start time), ES, σε σχέση με τον χρόνο έναρξης του έργου. Αυτός είναι ο ταχύτερος χρόνος, στον οποίο η δραστηριότητα μπορεί να ξεκινήσει, υποθέτοντας, ότι όλες οι προηγούμενες δραστηριότητες από τις οποίες εξαρτάται, αρχίζουν επίσης στους αντίστοιχους χρόνους ES. Τότε για την δραστηριότητα αυτή, ο ταχύτερος χρόνος ολοκλήρωσης (earliest finish time), EF, είναι ES συν τον χρόνο διάρκειας της δραστηριότητας.

Υποθέτουμε, ότι ο στόχος μας είναι να ολοκληρώσουμε το έργο "όσον το δυνατόν γρηγορότερα". Ο στόχος αυτός καλείται ο «αργότερος χρόνος ολο-

κλήρωσης του έργου» και της αντίστοιχης δραστηριότητας ολοκλήρωσης (latest finish time), LF. Για την δραστηριότητα ολοκλήρωσης, το LF θα είναι ίσο με τον ταχύτερο χρόνο ολοκλήρωσης της, EF. Ο αργότερος χρόνος έναρξης, LS, είναι ο αργότερος χρόνος κατά τον οποίο μια δραστηριότητα μπορεί να ξεκινήσει προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος. Επομένως, το LS, για μια δραστηριότητα είναι LF μείον τον χρόνο διάρκειας της δραστηριότητας.

Τα υπάρχοντα υπολογιστικά προγράμματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν, για να υπολογίσουμε αυτόματα αυτά τα δεδομένα και απαιτούν σαν εισόδους τις δραστηριότητες, τις απαιτήσεις σε χρόνους υλοποίησης και τις σχέσεις αλληλουχίας που υπάρχουν μεταξύ των δραστηριοτήτων. Το υπολογιστικό αποτέλεσμα μπορεί να είναι παρόμοιο με αυτό του Σχ. 6.29 [13], που δείχνει τα στατιστικά προγραμματισμού για όλες τις δραστηριότητες.

THE CRITICAL PATH IS

START -> A -> B -> C -> L -> M -> FINISH

THE LENGTH OF THE CRITICAL PATH IS 25

NODE	DURATION	EARLY START	EARLY FINISH	LATE START	LATE FINISH	TOTAL SLACK	FREE SLACK
START	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	0.00
B	4.00	6.00	10.00	6.00	10.00	0.00	0.00
C	7.00	10.00	17.00	10.00	17.00	0.00	0.00
D	2.00	6.00	8.00	9.00	11.00	3.00	0.00
E	4.00	8.00	12.00	11.00	15.00	3.00	3.00
F	10.00	12.00	22.00	15.00	25.00	3.00	3.00
G	2.00	0.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00
H	10.00	2.00	12.00	4.00	14.00	2.00	1.00
I	6.00	13.00	19.00	14.00	20.00	1.00	1.00
J	13.00	0.00	13.00	1.00	14.00	1.00	0.00
K	9.00	6.00	15.00	8.00	17.00	2.00	2.00
L	3.00	17.00	20.00	17.00	20.00	0.00	0.00
M	5.00	20.00	25.00	20.00	25.00	0.00	0.00
FINISH	0.00	25.00	25.00	25.00	25.00	0.00	0.00

The critical path is = Η κρίσιμη διαδρομή είναι

Start = Αρχή

Finish = Τέλος

The length of the critical path is 25 = Το μήκος της κρίσιμης διαδρομής είναι 25

Node Start = Έναρξη κόμβου

Duration = Διάρκεια

Early Start = Ταχύτερη έναρξη

Early finish = Ταχύτερη ολοκλήρωση

Late start = Καθυστερημένη έναρξη

Late finish = Καθυστερημένη ολοκλήρωση

Total slack =

Free slack =

Σχήμα 6.29 Παράδειγμα Αποτελέσματος από Υπολογιστή για το Χρονικό Πρόγραμμα των Δραστηριοτήτων και την Κρίσιμη Διαδρομή για το έργο "Είσοδος Νέου Προϊόντος στην Αγορά"

Ο συνολικός slack time, TS, για μια δραστηριότητα είναι η διαφορά μεταξύ του υπολογισμένου αργότερου χρόνου έναρξης και του ταχύτερου χρόνου έναρξης, ($TS = LS - ES$), ή η διαφορά μεταξύ του υπολογισμένου αργότερου χρόνου ολοκλήρωσης και νωρίτερου χρόνου ολοκλήρωσης, ($TS = LF - EF$). Ο συνολικός slack time, TS, προσδιορίζει τον μέγιστο χρόνο, που μια δρα-

στηριότητα μπορεί να καθυστερήσει χωρίς να καθυστερήσει ο χρόνος ολοκλήρωσης του έργου. Πρέπει να σημειωθεί, ότι όλες οι κρίσιμες δραστηριότητες έχουν μηδενικό slack time κατά τον προγραμματισμό τους. Όλες οι άλλες δραστηριότητες έχουν μεγαλύτερο του μηδενός slack time.

Ο free slack FS, που παρουσιάζεται στο Σχ. 6.29, δείχνει τον χρόνο, που μια δραστηριότητα μπορεί να καθυστερήσει χωρίς να καθυστερήσει το ES από οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα. Το FS υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του EF μιας δραστηριότητας και του ταχύτερου χρόνου ES όλων των επομένων δραστηριοτήτων. Για παράδειγμα, η δραστηριότητα F έχει FS=3 εβδομάδες. Εάν ο ταχύτερος χρόνος ολοκλήρωσης καθυστερήσει μέχρι και τρεις εβδομάδες δεν επηρεάζεται ο χρόνος, ES, οποιασδήποτε άλλης δραστηριότητας και ούτε και ο χρόνος ολοκλήρωσης του έργου. Ας σημειωθεί επίσης, ότι η δραστηριότητα K μπορεί να καθυστερήσει δύο εβδομάδες, χωρίς να επηρεάσει την επόμενη της δραστηριότητα L. Για να υπολογίσουμε το FS χωρίς την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, θα έπρεπε να εξετάσουμε το διάγραμμα δικτύου, προκειμένου να λάβουμε υπ' όψη τις σχέσεις αλληλουχίας.

Από την άλλη πλευρά, ο total slack time μοιράζεται με τις άλλες δραστηριότητες. Για παράδειγμα οι δραστηριότητες D, E, και F έχουν όλες TS = 3. Εάν η δραστηριότητα D έχει καθυστερήσει και επομένως καταναλώνει το slack time, τότε οι δραστηριότητες E και F δεν έχουν πλέον διαθέσιμο slack time. Οι σχέσεις αυτές φαίνονται πιο εύκολα, εξετάζοντας το διάγραμμα δικτύου, όπου οι σχέσεις αλληλουχίας φαίνονται γραφικά.

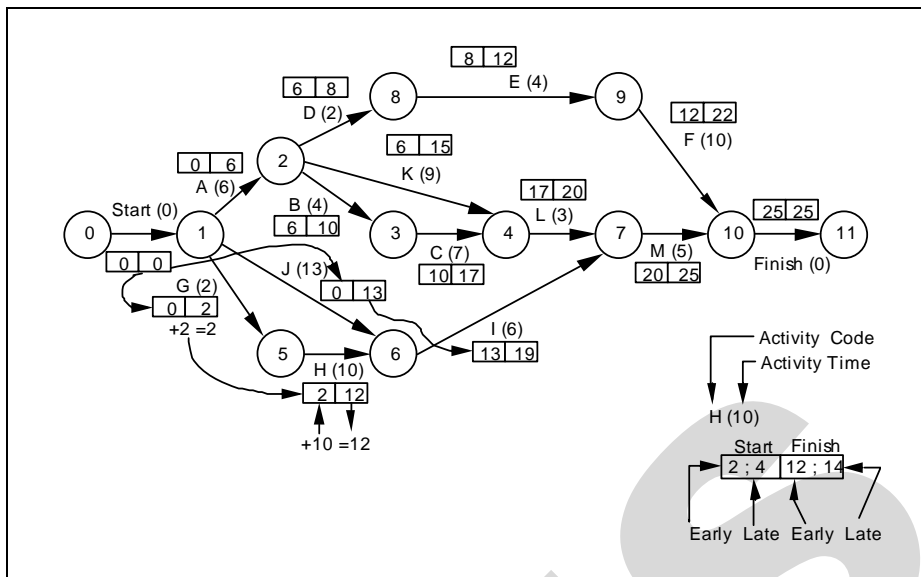
Στην πραγματικότητα υπάρχουν πέντε διαφορετικές διαδρομές από την αρχή έως το τέλος του δικτύου. Η μακρύτερη, δηλαδή η πιο περιοριστική, η οποία καλείται «κρίσιμη διαδρομή», απαιτεί 25 εβδομάδες για την αλληλουχία των δραστηριοτήτων Αρχή-A-B-C-L-M-Τέλος.

Μη αυτόματος υπολογισμός των Στατιστικών στοιχείων του Προγραμματισμού (Manual Computation of Schedule Statistics).

Ο μη αυτόματος υπολογισμός είναι κατάλληλος για μικρότερα δίκτυα και βοηθά στο να κατανοηθεί η σπουδαιότητα των στατιστικών στοιχείων του προγραμματισμού. Προκειμένου να υπολογίσουμε το ES και το EF, χωρίς την χρήση υπολογιστών, κινούμαστε προς τα εμπρός (forward) διαμέσου του δικτύου όπως, ακολούθως, παρουσιάζεται στο Σχ. 6.30 [13].

1. Θέτουμε μια τιμή στον χρόνο έναρξης του έργου, στις θέσεις ES και EF, κοντά στο τόξο της δραστηριότητας έναρξης (Σχ. 6.30). Θα υποθέσουμε σχετικές τιμές, όπως και στο υπολογιστικό αποτέλεσμα του Σχήματος 6.29, έτσι ώστε η τιμή 0 να τοποθετηθεί στο ES και στο EF για την δραστηριότητα έναρξης. (Ας σημειωθεί, ότι δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί, στο διάγραμμα PERT, η δραστηριότητα εκκίνησης με μηδενική διάρκεια. Έχει συμπεριληφθεί, εδώ, έτσι ώστε να συγκρίνουμε το παράδειγμα αυτό, ως προς την λίστα των δραστηριοτήτων του, με το αντίστοιχο παράδειγμα, "δραστηριότητες στους κόμ-

βους", του Σχήματος 6.32 [13]. Οι δραστηριότητες έναρξης και ολοκλήρωσης είναι συχνά απαραίτητες στα δίκτυα με κόμβους).



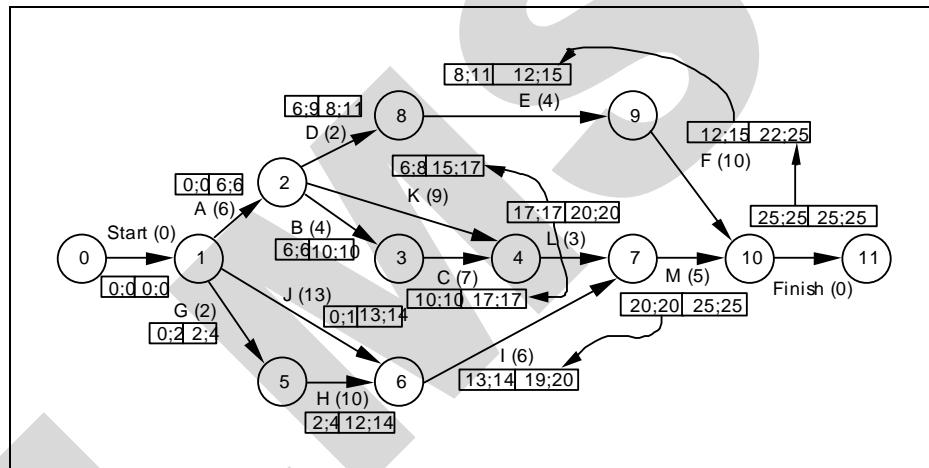
Σχήμα 6.30 Η Ροή των Υπολογισμών με Βάση τους Χρόνους Ταχύτερης Έναρξης ES και Περάτωσης EF

2. Ας θεωρήσουμε μια οποιαδήποτε νέα, μη σημειωμένη (unmarked) δραστηριότητα, για την οποία όλες οι προηγούμενες της έχουν ES και EF χρόνους. Ας σημειώσουμε την θέση ES της νέας δραστηριότητας με τον μεγαλύτερο σημειωμένο αριθμό στην θέση EF, μιας από τις αμέσως προηγούμενες δραστηριότητες της. Ο αριθμός αυτός είναι ο χρόνος ES της νέας δραστηριότητας. Για την δραστηριότητα A στο Σχ. 6.30, ο χρόνος ES είναι 0, επειδή αυτός είναι ο χρόνος EF της προηγούμενης δραστηριότητας.
3. Προσθέτουμε σε αυτόν τον αριθμό ES τον χρόνο της δραστηριότητας και ας σημειώσουμε τον χρόνο EF, που προκύπτει, στην κατάλληλη θέση. Για την δραστηριότητα A, $EF = ES + 6 = 6$.
4. Συνεχίζουμε διαμέσου όλου του δικτύου κατ' αυτόν τον τρόπο, έως ότου να σημειωθεί η "δραστηριότητα τέλους". Όπως δείξαμε στο Σχ. 6.29, ο χρόνος της κρίσιμης διαδρομής είναι 25 εβδομάδες, οπότε $ES = EF = 25$ για την δραστηριότητα τέλους.

Προκειμένου να υπολογίσουμε το LS και το LF, εργαζόμαστε στο διάγραμμα αντιστρόφως (προς τα πίσω-backwards), αρχίζοντας από την δραστηριότητα τέλους. Έχουμε, ήδη, αναφέρει ότι ο χρόνος, στον οποίο θέλουμε να ολοκληρώσουμε το έργο, είναι όσο το δυνατόν γρηγορότερα ή 25 εβδομάδες. Οπότε

LF = 25 για την δραστηριότητα ολοκλήρωσης, χωρίς να καθυστερεί το συνολικό έργο πέρα από την ημερομηνία ολοκλήρωσης που έχει καθορισθεί. Παρομοίως, ο χρόνος LS για την δραστηριότητα ολοκλήρωσης είναι LF μείον τον χρόνο διάρκειας της δραστηριότητας. Εφ' όσον η δραστηριότητα ολοκλήρωσης απαιτεί 0 χρονικές μονάδες, LS = LF. Για να υπολογίσουμε τα LS και LF, για κάθε δραστηριότητα, εφαρμόζουμε την ακόλουθη διαδικασία, αναφερόμενοι στο Σχ. 6.31 [13].

1. Σημειώνουμε τις τιμές των LS και LF στις αντίστοιχες θέσεις τους, κοντά στην δραστηριότητα ολοκλήρωσης.
2. Θεωρούμε μια νέα μη σημειωμένη δραστηριότητα, όπου όλες οι επόμενες (successors) από αυτήν δραστηριότητες έχουν σημειωθεί, και σημειώνουμε στην θέση LF για την νέα δραστηριότητα τον μικρότερο χρόνο LS, που έχει καταγραφεί για κάθε μια από τις αμέσως επόμενες δραστηριότητες. Με άλλα λόγια το LF για μια δραστηριότητα είναι ίσο με το νωρίτερο LS από τις αμέσως επόμενες δραστηριότητες.



Σχήμα 6.31 Ροή Υπολογισμών για τους χρόνους Late Start (LS) και Late Finish (LF)

3. Αφαιρούμε από αυτόν τον χρόνο LF, τον χρόνο διάρκειας της δραστηριότητας. Το αποτέλεσμα είναι το LS για την δραστηριότητα.
4. Συνεχίζουμε προς τα πίσω μέσα στο δίκτυο, έως ότου όλοι οι χρόνοι LS και LF έχουν εισαχθεί στις σωστές θέσεις στο διάγραμμα του δικτύου. Το Σχ. 6.31 δείχνει την ροή των υπολογισμών, αρχίζοντας με την δραστηριότητα ολοκλήρωσης και πηγαίνοντας προς τα πίσω μέσω των διαφόρων δραστηριοτήτων.

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, ο slack time για μια δραστηριότητα αντιπροσωπεύει τον μέγιστο χρόνο που μπορεί να καθυστερήσει πέρα από το ES, χωρίς να καθυστερήσει ο χρόνος ολοκλήρωσης όλου του έργου. Επειδή οι κρίσιμες δραστηριότητες είναι εκείνες με τον μακρύτερο χρόνο διαδρομής, συνεπάγεται ότι οι δραστηριότητες αυτές θα έχουν τον ελάχιστο πιθανό slack time. Εάν η ημερομηνία, που έχει ως στόχο το έργο, συμπίπτει με το LF της δραστηριότητας περάτωσης, όλες οι κρίσιμες δραστηριότητες θα έχουν μηδενικό νεκρό χρόνο. Εάν, ωστόσο, η ημερομηνία στόχος για την ολοκλήρωση του έργου είναι μεταγενέστερη του EF της δραστηριότητας ολοκλήρωσης, όλες οι κρίσιμες δραστηριότητες θα έχουν slack time ίσο με την χρονική αυτή διαφορά φάσης. Ο μη αυτόματος υπολογισμός του slack time είναι $(LS - ES)$ ή εναλλακτικά $(LF - EF)$. Όπως σημειώσαμε πιο πριν, ο free slack time είναι η διαφορά μεταξύ του EF μιας δραστηριότητας και του ταχύτερου χρόνου ES από όλες τις αμέσως επόμενες δραστηριότητες. Επομένως, ο ελεύθερος νεκρός χρόνος δεν επηρεάζεται από οποιαδήποτε χρονική διαφορά φάσης.

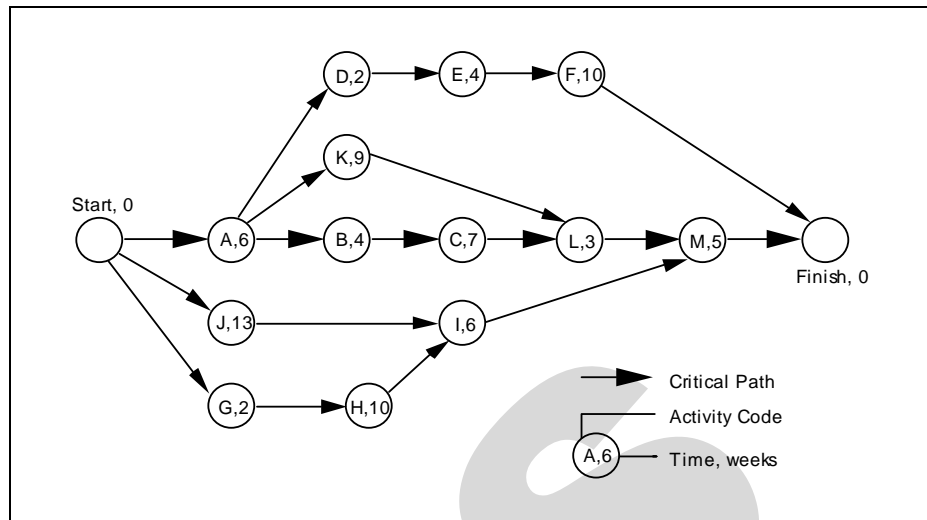
Περιληπτικά, τα προγραμματισμένα δεδομένα του έργου και των δραστηριοτήτων υπολογίζονται ως ακολούθως:

ES	=	Ο ταχύτερος χρόνος έναρξης μιας δραστηριότητας
	=	Ο ελάχιστος χρόνος από τους EF χρόνους όλων των αμέσως προηγουμένων δραστηριοτήτων
EF	=	Ο ταχύτερος χρόνος ολοκλήρωσης μιας δραστηριότητας
	=	ES + χρόνος δραστηριότητας
LF	=	Ο αργότερος χρόνος περάτωσης μιας δραστηριότητας
	=	LS + Χρόνος δραστηριότητας
TS	=	Ο συνολικός νεκρός χρόνος = $LS - ES = LF - EF$
FS	=	Ελεύθερος νεκρός χρόνος (Free slack)
	=	Ο ελάχιστος ES από όλες τις αμέσως επόμενες δραστηριότητες - EF

Δραστηριότητες στους κόμβους – Διαφορές στα Διαγράμματα Δικτύων

Έως τώρα έχουμε χρησιμοποιήσει τις "δραστηριότητες στα τόξα" (activities on arcs) σαν διαδικασίες σχεδιασμού δικτύων. Οι "δραστηριότητες στους κόμβους" (activities on nodes) έχουν ως αποτέλεσμα ένα απλούστερο δίκτυο, μέσω της αναπαράστασης των δραστηριοτήτων σαν να συμβαίνουν στους κόμβους, με τα διανύσματα να δείχνουν μόνο την αλληλουχία των απαιτούμενων δραστηριοτήτων. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι, ότι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε πλασματικές δραστηριότητες (dummy activities) προκειμένου να παρουσιάσουμε την κατάλληλη αλληλουχία των δρα-

στηριωτήτων. Το Σχ. 6.32 δείχνει το δίκτυο για το «έργο εισαγωγής νέου προϊόντος», που μπορεί να συγκριθεί με το δίκτυο "δραστηριότητες στα τόξα", που παρουσιάζεται στο Σχ. 6.26.



Start = Αρχή
Finish = Τέλος
Critical path = Κρίσιμη διαδρομή

Activity code = Κώδικας δραστηριοτήτων
Time, weeks = Χρόνος, (σε) εβδομάδες

Σχήμα 6.32 Διάγραμμα Έργου με τις Ενέργειες στους Κόμβους για το έργο "Είσοδος Νέου Προϊόντος στην Αγορά"

Η ανάλυση, για την ανάπτυξη του ταχύτερου (early) και του αργότερου (late) χρόνου εκκίνησης και ολοκλήρωσης καθώς και των slack times, είναι ίδια με την διαδικασία κίνησης προς τα εμπρός και προς τα πίσω, που περιγράφηκε προηγουμένως. Τα τελικά αποτελέσματα και από τα δύο συστήματα είναι τα στατιστικά στοιχεία του προγραμματισμού, που έχουν υπολογισθεί. Επειδή αυτά είναι τα δεδομένα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και επειδή η συνολική διαδικασία πραγματοποιείται, συνήθως, με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και για τις δύο μεθοδολογίες, η επιλογή μεταξύ αυτών των δύο μπορεί να εξαρτάται από άλλα κριτήρια, όπως η διαθεσιμότητα και η προσαρμοστικότητα (adaptability) των υπάρχοντων υπολογιστικών προγραμμάτων ή η επιλογή μπορεί να είναι απλώς θέμα προσωπικής προτίμησης.

Πιθανοθεωρητικές Μέθοδοι Δικτύων (Probabilistic Network Methods)

Οι μέθοδοι δικτύων, που έχουμε αναφέρει έως τώρα, καλούνται «ντετερμινιστικές», επειδή οι εκτιμώμενοι χρόνοι των δραστηριοτήτων θεωρούνται ως σταθερές τιμές. Δεν λαμβάνεται υπ' όψη το γεγονός, ότι ο χρόνος των δραστηριοτήτων μπορεί να είναι αβέβαιος.

Οι πιθανοθεωρητικές μέθοδοι δικτύων θεωρούν την πιο ρεαλιστική κατά-

σταση, στην οποία οι αβέβαιοι χρόνοι των δραστηριοτήτων αναπαρίστανται από κατανομές πιθανοτήτων. Με ένα τέτοιο βασικό μοντέλο του δικτύου των δραστηριοτήτων, είναι πιθανό να προκύψουν πρόσθετα δεδομένα, τα οποία να βοηθήσουν στην αξιολόγηση των αποφάσεων προγραμματισμού. Η φύση των αποφάσεων προγραμματισμού μπορεί να εμπλέκει την κατανομή ή την ανακατανομή του προσωπικού ή άλλων παραγωγικών πόρων στις διάφορες δραστηριότητες, προκειμένου να προκύψει ένα πιο ικανοποιητικό πρόγραμμα. Επομένως, θα μπορούσε να δικαιολογηθεί ένα “crash schedule”, που περιλαμβάνει επί πλέον πόρους, ώστε να διασφαλισθεί η έγκαιρη ολοκλήρωση συγκεκριμένων δραστηριοτήτων. Οι επί πλέον απαιτούμενοι πόροι λαμβάνονται από μη κρίσιμες δραστηριότητες ή από δραστηριότητες, για τις οποίες η πιθανότητα να είναι κρίσιμες είναι μικρή.

Εφ’ όσον ο χρόνος των δραστηριοτήτων είναι αβέβαιος, απαιτείται να προσδιορίζεται από μια κατανομή πιθανότητας. Αυτή η κατανομή πιθανότητας προσδιορίζεται από τους μηχανικούς, τον υπεύθυνο του έργου ή τους συμβούλους. Εφ’ όσον έχει καθορισθεί η κατανομή πιθανότητας για τους χρόνους των δραστηριοτήτων, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αναμενόμενο χρόνο δραστηριοτήτων, καθώς και την διασπορά (variance) του χρόνου δραστηριότητας.

Ο *Οπтимιστικός χρόνος (Optimistic time)*, a , είναι ο μικρότερος πιθανός χρόνος για να ολοκληρωθεί μια δραστηριότητα, εάν όλα λειτουργήσουν σωστά. Βασίζεται στην υπόθεση, ότι η πιθανότητα να ολοκληρωθεί η δραστηριότητα σε χρόνο μικρότερο του οπтимιστικού δεν είναι μεγαλύτερη του 1%.

Ο *Πεσιμιστικός χρόνος (Pessimistic time)*, b , είναι ο μεγαλύτερος χρόνος ολοκλήρωσης μιας δραστηριότητας σε δυσμενείς συνθήκες. Βασίζεται στην υπόθεση, ότι η πιθανότητα ολοκλήρωσης της δραστηριότητας σε χρόνο μεγαλύτερο του πεσιμιστικού δεν είναι μεγαλύτερη από 1%.

Ο *πιο πιθανός χρόνος (Most likely time)*, m , είναι η πιθανότερη μοναδική τιμή της κατανομής, που ακολουθεί ο χρόνος δραστηριότητας. Οι εκτιμήσεις για τους τρεις χρόνους παρουσιάζονται, σε σχέση με μια κατανομή του χρόνου ολοκλήρωσης της δραστηριότητας, στο Σχ. 6.33 [13].

Υποθέτοντας, ότι ο χρόνος δραστηριοτήτων ακολουθεί την κατανομή βήτα (Beta distribution), ο αναμενόμενος χρόνος μιας δραστηριότητας t_e υπολογίζεται ως εξής:

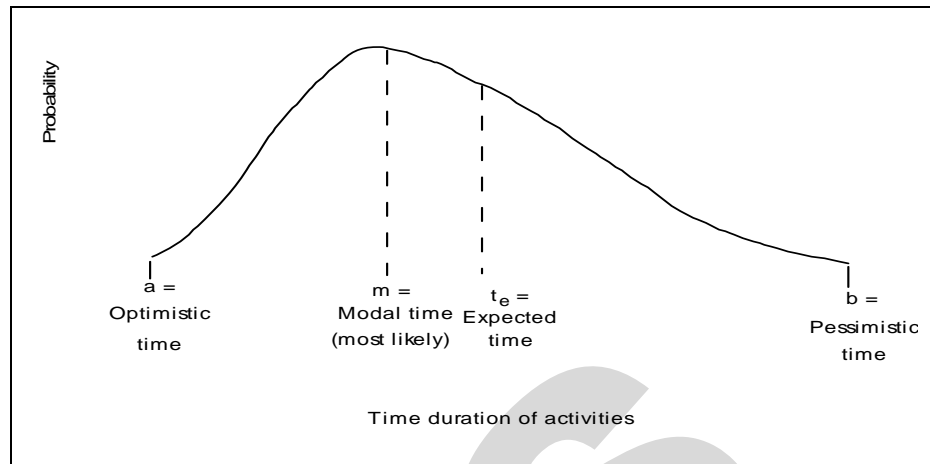
$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (6-9)$$

Η διασπορά (δηλαδή, το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης), σ^2 , του χρόνου δραστηριότητας υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$\sigma^2 = \left(\frac{b - a}{6} \right)^2 \quad (6-10)$$

Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης είναι η μέση τιμή μιας κανονικής κατανομής, η οποία είναι το απλό άθροισμα των τιμών, t_e , κατά μήκος μιας κρίσιμης δια-

δρομής. Η διασπορά του μέσου χρόνου ολοκλήρωσης του έργου (project), είναι το απλό άθροισμα των διασπορών των μέσων χρόνων ολοκλήρωσης των ξεχωριστών δραστηριοτήτων κατά μήκος της κρίσιμης διαδρομής.



Probability = Πιθανότητα

Optimistic Time = Οπτιμιστικός Χρόνος

Modal time (most likely) = Τυπικός χρόνος
(περισσότερο πιθανός)

Expected time = Αναμενόμενος Χρόνος

Pessimistic time = Πεσιμιστικός Χρόνος

Time duration of activities = Χρονική διάρκεια
των ενεργειών

Σχήμα 6.33 Οι Τιμές του Χρόνου σε Σχέση με μια Κατανομή που Ακολουθεί ο Χρόνος Δραστηριότητας

Μπορούμε στο σημείο αυτό να προσδιορίσουμε την κρίσιμη διαδρομή, αντικαθιστώντας τον χρόνο των δραστηριοτήτων με το t_e . Ο μέσος χρόνος και το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου προκύπτουν, αθροίζοντας το t_e και το σ^2 , αντίστοιχα, για τις δραστηριότητες της κρίσιμης διαδρομής.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους πίνακες της κανονικής κατανομής για να καθορίσουμε τις πιθανότητες του να πραγματοποιηθούν οι εκτιμήσεις των χρόνων ολοκλήρωσης του έργου. Για παράδειγμα, η πιθανότητα να ολοκληρωθεί ένα έργο σε λιγότερο από τον μέσο χρόνο είναι μόνο 0,50. Η πιθανότητα να ολοκληρωθεί ένα έργο σε μικρότερο από τον μέσο χρόνο συν μια τυπική απόκλιση είναι περίπου 0,84 και σε λιγότερο από τον μέσο χρόνο συν δύο τυπικές αποκλίσεις είναι 0,98 κ.λ.π.

Αξιοποίηση των Παραγωγικών Πόρων (Deployment of Resources)

Οι εκτιμήσεις του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου προϋποθέτουν, ότι είναι διαθέσιμοι οι πόροι, που απαιτούνται για την εκτέλεση των δραστηριοτήτων με βάση τον προγραμματισμό. Γι' αυτό λοιπόν, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό, ότι οι εκτιμήσεις των χρόνων ολοκλήρωσης του έργου είναι τα χαμηλότερα όρια, τα οποία μπορεί να μην είναι εφικτά, εφ' όσον οι πόροι είναι περιορι-

σμένοι. Το αντικείμενο σε μια ανάλυση των δραστηριοτήτων, λαμβάνοντας υπ' όψη χρόνο και κόστος, είναι να υπολογισθεί η σχέση (trade-off) μεταξύ του κόστους ολοκλήρωσης του έργου και του πρόσθετου κόστους των παραγωγικών πόρων, που απαιτούνται για να επιτευχθεί αυτό.

Σε μερικές εφαρμογές, μπορεί να είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης στην χρησιμοποίηση ενός παραγωγικού πόρου από την μια περίοδο στην επόμενη. Εάν προγραμματίσουμε όλες τις δραστηριότητες στους νωρίτερους (earliest) χρόνους υλοποίησής τους, είναι πολύ πιθανό να απαιτηθούν μεγαλύτερες ποσότητες παραγωγικών πόρων στις αρχικές περιόδους και σχετικά μικρότερες ποσότητες στις επόμενες περιόδους. Ο προκαθορισμένος χρόνος ολοκλήρωσης του έργου μπορεί να επιτευχθεί με την μεταφορά (shifting) ορισμένων δραστηριοτήτων, έτσι ώστε το προφίλ των απαιτήσεων των παραγωγικών πόρων στον χρόνο να είναι εξισορροπημένο ή να έχει λιγότερες διακυμάνσεις. Αυτή η εξισορρόπηση του φορτίου έχει ως σκοπό την μείωση του κόστους του ανενεργού παραγωγικού δυναμικού, του κόστους προσλήψεων και (separation) ή του κόστους κάθε παραγωγικού πόρου, που μπορεί να επηρεασθεί από τις διακυμάνσεις στην ζήτηση κατά την χρησιμοποίησή του, όπως η ενοικίαση εξοπλισμού.

Σε πολλές περιπτώσεις έργων, οι παραγωγικοί πόροι είναι διαθέσιμοι μόνο σε συγκεκριμένες ποσότητες. Για παράδειγμα, μέρη μηχανολογικού εξοπλισμού ή ο αριθμός των σχεδιαστών μηχανικών μπορεί να είναι περιορισμένος. Ο σκοπός στις περιπτώσεις αυτές είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου, με ταυτόχρονη μη υπέρβαση των προκαθορισμένων ορίων των διαθέσιμων πόρων. Εφ' όσον οι δραστηριότητες, που ανταγωνίζονται για τους ίδιους περιορισμένους πόρους, δε μπορούν να προγραμματισθούν ταυτόχρονα, οι περιορισμοί των πόρων θα προκαλούν συχνά την καθυστέρηση της ημερομηνίας ολοκλήρωσης του έργου, σε σχέση με την ημερομηνία ολοκλήρωσης, που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τους περιορισμούς αυτούς.

Μια βέλτιστη λύση, για τον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου με περιορισμένους πόρους, απαιτεί την επιστράτευση ενός ακεραίου προγράμματος, το οποίο αδυνατεί να δώσει λύσεις για πραγματικού μεγέθους έργα. Διάφοροι εμπειρικοί (heuristics) μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και συγκριθεί (βλέπε [17]) για την σχετική αποτελεσματικότητά τους. Η στρατηγική αυτών των εμπειρικών μεθόδων είναι να προγραμματίζουν δραστηριότητες για κάθε μια περίοδο, έτσι ώστε να μην υπερβαίνουν τα όρια των παραγωγικών πόρων. Εάν όλες οι έγκυρες δραστηριότητες δεν μπορούν να προγραμματισθούν εξ' αιτίας των περιορισμένων πόρων, χρησιμοποιείται ένας κανόνας για να αποφασισθεί ποιες δραστηριότητες θα προγραμματισθούν και ποιες θα αναβληθούν. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου κανόνα είναι ο κανόνας του *minimum activity slack*. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον κανόνα, δίδεται προτεραιότητα στον προγραμματισμό αυτών των δραστηριοτήτων με τον *minimum slack time* (*minimum slack time* = αργότερος χρόνος εκκίνησης – νωρίτερος χρόνος εκκίνησης, στην ανάλυση της κρίσιμης διαδρομής). Ο *activity slack time* ενημερώνεται σε κάθε περίοδο, έτσι ώστε να αντανakλά την αλλαγή στον διαθέσιμο *slack time*, που προκύπτει από την αναβολή μεμονωμένων δραστηριοτήτων [17].

6.3.2 Λήψη Αποφάσεων (Decision Making)

Λήψη Αποφάσεων με μια παράμετρο (Single Attribute Decision Making)

Κατά την ανάλυση ενός προβλήματος λήψης αποφάσεων, είναι αναγκαίο να υπάρχει η δυνατότητα του πλήρους προσδιορισμού των διαθέσιμων ενεργειών και των εναλλακτικών. Θα ονομάσουμε τις ενέργειες ως a_1, a_2, a_3, \dots . Επί πλέον υποθέτουμε, ότι κάθε ενέργεια έχει μια ανταποδοτικότητα (payoff) (ή κάποια επίπτωση/αποτέλεσμα-consequence), η οποία εξαρτάται από την τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής, η οποία ονομάζεται «κατάσταση του συστήματος» (*State of Nature*). Ονομάζουμε τις διάφορες τιμές της μεταβλητής αυτής, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε, ότι εξετάζουμε την αγορά 100 μετοχών μιας εκ τεσσάρων εταιρειών (ενέργειες a_1, a_2, a_3 , ή a_4), κάθε μια εκ των οποίων στοιχίζει στην παρούσα φάση \$10. Η ενέργεια a_1 αποδίδει κέρδος \$500 (δηλαδή, \$5 κέρδος ανά μετοχή), η a_2 αποδίδει κέρδος \$100, η a_3 κέρδος -\$200 (δηλαδή, απώλεια) και η a_4 δεν αποδίδει καθόλου κέρδος. Αυτή η κατάσταση αντιπροσωπεύει την *περίπτωση λήψης αποφάσεων με βεβαιότητα* (*decision making under certainty*), εφ' όσον δεν υπάρχει κάτι αβέβαιο όσον αφορά στην «κατάσταση του συστήματος» (*State of Nature*) σε σχέση με τις τιμές, που θα προκύψουν ένα χρόνο από σήμερα και επομένως η απόφαση θα ήταν η αγορά μετοχών της πρώτης εταιρείας (ενέργεια a_1).

Αντί να γνωρίζουμε τις τιμές των μετοχών μετά από ένα χρόνο, θα μπορούσαμε, πιθανώς, να υποθέσουμε μόνο ποιες θα μπορούσε να ήταν, βασιζόμενοι είτε στην εντύπωση που έχουμε για την οικονομία και τις γνώσεις μας για διάφορες επιχειρήσεις είτε σε άλλες πληροφορίες, που πιθανώς έχουμε. Σ' αυτήν την περίπτωση υπάρχουν αρκετές διαφορετικές «καταστάσεις του συστήματος» (*State of Nature*), που η κάθε μια έχει και διαφορετική ανταποδοτικότητα, σύμφωνα με τις ενέργειες που επιλέγονται. Επομένως το πρόβλημα σ' αυτή την περίπτωση είναι πραγματικά ένα *πρόβλημα λήψης αποφάσεων με αβεβαιότητα* (*decision making under uncertainty*).

Για να επεκτείνουμε το πρόβλημα των μετοχών, ώστε να συμπεριλαμβάνει αβεβαιότητα, υποθέτουμε ότι αποφασίζουμε πως υπάρχουν τρεις πιθανές καταστάσεις του συστήματος (θ_1, θ_2 , και θ_3). Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να αποφασίσουμε, ότι οι τιμές των μετοχών για τον επόμενο χρόνο είναι άμεσα συνδεδεμένες με την σταθερότητα της οικονομίας στην διάρκεια αυτού του χρόνου. Σ' αυτήν την περίπτωση, η θ_1 θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε μια ελαφρά κάμψη της οικονομίας, η θ_2 σε μια σταθερή οικονομία, και η θ_3 σε μια ελαφρά άνοδο του πληθωρισμού. Ας υποθέσουμε, ότι για την θ_1 οι τιμές για τον επόμενο χρόνο θα είναι (\$15, \$11, \$8 και \$10), για την θ_2 οι τιμές θα είναι \$5, \$12, \$12, \$13, ενώ για την περίπτωση θ_3 θα είναι \$17, \$11, \$15 και \$15. Οι ανταποδοτικότητες (payoffs), που αντανakλούν αυτές οι τιμές, μπορούν να παρουσιασθούν σαν ένας *πίνακας ανταποδοτικότητας* (*payoff table*), όπως αυτός που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.8 [18].

Δεν υπάρχει καμμία ενέργεια για αυτόν τον πίνακα ανταποδοτικότητας,

που είναι προφανώς η «βέλτιστη». Η ενέργεια a_1 έχει την μεγαλύτερη ανταποδοτικότητα, εάν συμβούν οι θ_1 ή θ_3 , ενώ η a_4 είναι η βέλτιστη, όταν συμβαίνει η κατάσταση θ_2 . Παρατηρήστε, ότι η ενέργεια a_3 δεν θα μπορούσε ποτέ να είναι η βέλτιστη, διότι η a_4 έχει ανταποδοτικότητα το λιγότερο ίδια ή μεγαλύτερη από αυτήν της a_3 , ανεξάρτητα από την κατάσταση που λαμβάνει χώρα. Για παράδειγμα, στην κατάσταση θ_1 η ενέργεια a_4 αποδίδει \$0 και η a_3 -\$200. Στην κατάσταση θ_2 η a_4 καταλήγει σε μια ανταποδοτικότητα \$300, ενώ η a_3 μόνο \$200 και μόνο στην κατάσταση θ_3 οι δύο ενέργειες έχουν την ίδια ανταποδοτικότητα, \$500. Μια ενέργεια, που δεν είναι καλύτερη από κάποια άλλη, άσχετα με την κατάσταση (*State of Nature*) που λαμβάνει χώρα, ονομάζεται επικρατούσα ενέργεια (*dominated action*), όπως η a_3 στην περίπτωση του παραδείγματος.

		States of Nature		
		θ_1	θ_2	θ_3
Ενέργειες	a_1	\$500	-\$500	\$700
	a_2	100	200	100
	a_3	-200	200	500
	a_4	0	300	500

Πίνακας 6.8 Πίνακας Ανταποδοτικότητας για το Παράδειγμα των Μετοχών

Φαίνεται, επίσης, ότι η ενέργεια a_2 δεν μπορεί ποτέ να είναι βέλτιστη για τον συγκεκριμένο πίνακα ανταποδοτικότητας. Ωστόσο, η ενέργεια αυτή είναι βέλτιστη με βάση αυτό που ονομάζεται «μέγιστο των ελαχίστων κριτήριο» (*maximin criterion*, το οποίο δείχνει, ότι ο υπεύθυνος για την απόφαση πρέπει να επικεντρώσει την προσοχή του μόνο στην χειρότερη δυνατή ανταποδοτικότητα που θα μπορούσε να προκύψει για κάθε ενέργεια. Στο παράδειγμα των μετοχών, το κριτήριο *maximin* μας οδηγεί στην επιλογή της ενέργειας a_2 , εφ' όσον η ελάχιστη ανταποδοτικότητα της, \$100, είναι η μεγαλύτερη ανάμεσα στις ελάχιστες τιμές.

Στενά συνδεδεμένο με την προσέγγιση *maximin* είναι ένα άλλο κριτήριο, που ονομάζεται *κριτήριο ελαχίστου των μεγίστων απωλειών* (*minimax regret criterion*). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, η καλύτερη ενέργεια για τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων είναι η επιλογή εκείνης της εναλλακτικής, που ελαχιστοποιεί την μέγιστη απώλεια (*regret*). Μπορούμε να περιγράψουμε τον τρόπο υπολογισμού της απώλειας με βάση το προηγούμενο παράδειγμα. Ας υποθέσουμε, ότι λαμβάνει χώρα η θ_1 . Αν ο υπεύθυνος για την απόφαση είχε επιλέξει την εναλλακτική a_1 , τότε δεν θα είχε καθόλου απώλειες, αφού τα \$500 είναι το καλύτερο κέρδος που θα μπορούσε να λάβει, σύμφωνα με την θ_1 . Εάν ωστόσο είχε επιλέξει την εναλλακτική a_2 θα είχε απώλεια \$400, εφ' όσον αυτό είναι το χρηματικό ποσό που "έχασε" μη επιλέγοντας την a_1 , δηλαδή, \$500 - \$100 = \$400. Παρόμοια, η a_3 δίδει μια απώλεια της τάξης των \$700 και η a_4 των \$500. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται για κάθε στήλη του πίνακα κερδών. Με τον τρόπο αυτό, οι τιμές απωλειών για όλες τις ενέργειες και καταστάσεις

μπορούν να εκφραστούν υπό την μορφή ενός πίνακα, που ονομάζεται *πίνακας απωλειών* (*regret table* ή *opportunity loss table*), όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.9 [18]. Η ενέργεια, που ελαχιστοποιεί την μέγιστη απώλεια, προκύπτει ότι είναι η ενέργεια a_4 .

		State of Nature			Μέγιστη Απώλεια	Minimax Regret
		θ_1	θ_2	θ_3		
Ενέργειες	a_1	\$0	\$800	\$0	800	
	a_2	400	100	600	600	
	a_3	700	100	200	700	
	a_4	500	0	200	500	←

Πίνακας 6.9 Πίνακας Απωλειών (Regret Table) για το Παράδειγμα των Μετοχών (Προερχόμενο από τον Πίνακα 6.8)

Κριτήριο Αναμενόμενης Χρηματικής Αξίας (Expected Monetary Value Criterion)

Για την χρησιμοποίηση του κριτηρίου *Αναμενόμενης Χρηματικής Αξίας*, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε ή να μπορούμε να προσδιορίσουμε την πιθανότητα κάθε κατάστασης (State of Nature). Εάν υπάρχει σημαντική "αντικειμενική" εποπτεία (π.χ. ιστορικά δεδομένα) ή μια θεωρητική βάση για τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων, τότε η εφαρμογή της μεθόδου αυτής μπορεί να είναι σχετικά εύκολη. Η δυσκολία σε αρκετά πραγματικά προβλήματα είναι, ότι υπάρχουν λίγα ή καθόλου ιστορικά δεδομένα ή θεωρητική βάση, έτσι ώστε να αποφασίσουμε για τις πιθανότητες αυτών των καταστάσεων. Οι στατιστικολόγοι, που χρησιμοποιούν τις μεθόδους του Bayes, προτείνουν, συνήθως, ότι στον προσδιορισμό της υποκειμενικής πιθανότητας ενός γεγονότος πρέπει να αναρωτηθούμε ποιες θα ήταν οι πιθανότητες (would one be exactly indifferent between the two sides of an even bet). Στην διαδικασία λήψης αποφάσεων, η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον προσδιορισμό της πιθανότητας για κάθε κατάσταση (State of Nature), προσέχοντας, βέβαια, ώστε το άθροισμα των πιθανοτήτων να είναι ίσο με ένα.

Η αναμενόμενη τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής είναι ένας σταθμισμένος (weighted) μέσος όρος (ή αριθμητικός μέσος όρος) μιας κατανομής πιθανότητας, όπου τα βάρη είναι οι τιμές της πιθανότητας (ή της σχετικής συχνότητας—relative frequency) της τυχαίας μεταβλητής. Εφ' όσον στην Θεωρία Λήψης Αποφάσεων, για τον υπολογισμό μιας πρόβλεψης γίνεται χρήση της χρηματικής της αξίας, η πρόβλεψη αυτή αναφέρεται γενικά σαν *Αναμενόμενη Χρηματική Αξία* (Expected Monetary Value—EMV). Για την περιγραφή των υπολογισμών της μεθόδου EMV, ας υποθέσουμε ότι στο προηγούμενο παράδειγμα οι πιθανότητες των τριών καταστάσεων είναι $P(\theta_1) = 0.30$, $P(\theta_2) = 0.60$ και $P(\theta_3) = 0.10$. Η αναμενόμενη χρηματική αξία των εναλλακτικών a_1 , a_2 , και a_3 υπολογίζεται, πολλαπλασιάζοντας κάθε ανταποδοτικότητα με την πιθανό-

τητα που έχει να συμβεί και κατόπιν αθροίζοντας τις τιμές αυτές.

$$EMV(a_1) = \$500(.30) - \$500(.60) + \$700(.10) = -\$80,$$

$$EMV(a_2) = \$100(.30) - \$200(.60) + \$100(.10) = \$160,$$

$$EMV(a_3) = -\$200(.30) - \$200(.60) + \$500(.10) = \$110,$$

$$EMV(a_4) = \$0(.30) - \$300(.60) + \$500(.10) = \$230,$$

Ας υποθέσουμε, ότι το π_{ij} αναπαριστά το κέρδος του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων, ο οποίος, κατόπιν της επιλογής της ενέργειας a_i , βρίσκει ότι συμβαίνει η κατάσταση j_{th} ($j = 1, 2, \dots, m$). Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε, ότι η αναμενόμενη χρηματική αξία (EMV) της ενέργειας a_i είναι:

$$EMV(a_i) = \sum_{j=1}^m \pi_{ij} P(\theta_j)$$

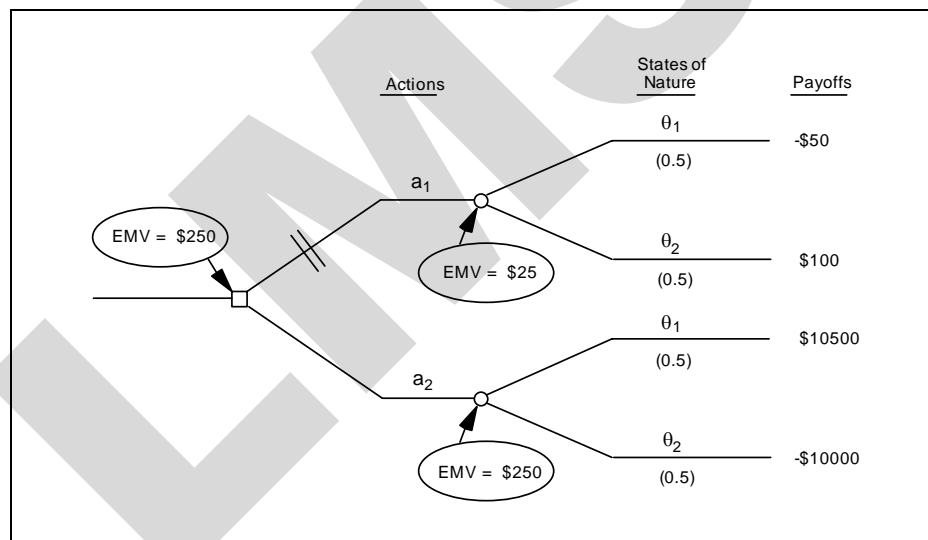
Σύμφωνα με το κριτήριο EMV, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων επιλέγει εκείνη την εναλλακτική, που έχει την μεγαλύτερη αναμενόμενη χρηματική αξία. Για αυτό το παράδειγμα, η ενέργεια a_4 έχει το υψηλότερο EMV, με μια μέση ανταποδοτικότητα \$230. Εάν για τις τρεις καταστάσεις είχαν προσδιορισθεί πιθανότητες 0,40, 0,20 και 0,40 τότε η ενέργεια a_1 θα είχε το βέλτιστο EMV. Όμως, ανεξάρτητα από τις τιμές που λαμβάνουν τα $P(\theta_1)$, $P(\theta_2)$ και $P(\theta_3)$, η ενέργεια a_3 δεν θα μπορούσε ποτέ να αποδώσει το μεγαλύτερο EMV, γιατί είναι μια επικρατούσα ενέργεια (dominated action).

Το κριτήριο EMV παρουσιάζει, όμως, μια σημαντική αδυναμία. Λαμβάνει υπ' όψη μόνο το αναμενόμενο ή μέσο κέρδος και όχι την διασπορά (variance) στην ανταποδοτικότητα. Εάν αυτή η διασπορά είναι σταθερή ανάμεσα στις σχετικές εναλλακτικές, τότε αυτή η αδυναμία δεν δημιουργεί πιθανώς κανένα πρόβλημα. Όταν, όμως, η διασπορά είναι μεγάλη, τότε ίσως το κριτήριο EMV υποδείξει μια ενέργεια, η οποία, για κάποιους, δεν θα είναι η πιο επιθυμητή. Για παράδειγμα, υποθέστε, ότι πρέπει να επιλέξετε μεταξύ δύο ενεργειών/μετοχών (a_1 και a_2) και ότι υπάρχουν μόνο δύο πιθανές καταστάσεις (θ_1 και θ_2), που έχουν την ίδια πιθανότητα $P(\theta_1) = .50 = P(\theta_2)$. Ο Πίνακας αποδοτικότητας είναι αυτός, που δίδεται στην συνέχεια, Πίνακας 6.10 [18]. Ακόμα και αν η τιμή του EMV για την ενέργεια a_2 είναι δεκαπλάσια αυτής της a_1 , οι περισσότεροι άνθρωποι θα επέλεγαν την a_1 , εάν ήταν αναγκασμένοι να επιλέξουν μια από τις δύο και αυτό, γιατί δεν θα μπορούσαν να διακινδυνεύσουν την απώλεια \$10.000. Κάποιοι άλλοι ίσως επέλεγαν την a_2 αντί της a_1 , ενέργεια, που αντανakλά το γεγονός ότι η αξία του ενός δολαρίου για κάποιον άνθρωπο δεν είναι απαραίτητα η ίδια με την αξία που έχει το ένα δολάριο για κάποιον άλλον, ή επίσης ότι η αξία του ενός δολαρίου μπορεί να μην παραμένει η ίδια για τον ίδιον άνθρωπο κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Επί πλέον, της κατασκευής ενός πίνακα ανταποδοτικότητας, ίσως ήταν χρήσιμη η παρουσίαση του προβλήματος με την μορφή ενός "Δέντρου Αποφάσεων" (Decision Tree). Για το παράδειγμα του Πίνακα 6.10, μπορεί να σχεδιασθεί ένα δέντρο αποφάσεων, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχ. 6.34 [18]. Παρατηρήστε, ότι σε αυτό το διάγραμμα η πρώτη ομάδα των "κλάδων" του δέντρου αντιπροσωπεύει τις δυνατές ενέργειες του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων, ενώ η δεύτερη ομάδα αντιπροσωπεύει διάφορες καταστάσεις. Στα δενδρικά διαγράμματα είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιείται ένα τετράγωνο για να δείχνει τους κόμβους, όπου ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να επιλέξει ανάμεσα από διαφορετικές ενέργειες και ένας κύκλος, για να δείξει τους κόμβους όπου ο κλάδος που επιλέγεται, καθορίζεται τυχαία.

		States of Nature		EMV
		θ_1	θ_2	
Ενέργειες	a_1	-\$50	\$100	25
	a_2	10,500	-10,000	250
Πιθανότητα		.50	.50	

Πίνακας 6.10 Παράδειγμα Απόφασης που Λαμβάνει υπ' όψη την Επικινδυνότητα



Σχήμα 6.34 Δενδρικό Διάγραμμα

Οι αριθμοί σε κύκλο αναπαριστούν τα EMV, που προκύπτουν από τις διάφορες αποφάσεις. Οι μη βέλτιστοι κλάδοι σε ένα δέντρο αποφάσεων σημειώνονται, συνήθως, με ένα σύμβολο, όπως φαίνεται στον κλάδο a_1 . Παρατηρήστε, ότι στο Σχ. 6.34 έχουμε σημειώσει, ότι ο αρχικός κόμβος απόφασης (απόφαση μεταξύ των a_1 και a_2) έχει ένα βέλτιστο EMV \$250. Αυτό έγινε, διότι

συγκρίναμε τις δύο εναλλακτικές και μεταφέραμε την τιμή EMV της καλύτερης πίσω στον αρχικό κόμβο απόφασης. Η διαδικασία της προοδευτικής μετακίνησης από τα τελικά σημεία του δέντρου προς το αρχικό σημείο απόφασης, μεταφέροντας την τιμή του EMV προς τα πίσω, ονομάζεται «*backward induction*».

Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων με πολλαπλές Παραμέτρους (Multiple Attribute Decision Making).

Στην διαμόρφωση μιας στρατηγικής για την παραγωγή, πρέπει σαφώς να λαμβάνεται υπ' όψη ο συνδιασμός του κόστους, της ποιότητας, του χρόνου και της ευελιξίας. Είναι πιθανό, μια επιχείρηση να δώσει μεγάλο βάρος στο κριτήριο του κόστους και να προσαρμόσει τον σχεδιασμό και την οργάνωση της παραγωγής με βάση το χαμηλό κόστος παραγωγής. Μια άλλη επιχείρηση, ίσως δώσει έμφαση στην προσαρμογή στις απαιτήσεις των πελατών και επομένως επιλέξει μια ευέλικτη διαδικασία παραγωγής, δίδοντας έμφαση σε ευέλικτες μεθόδους προγραμματισμού παραγωγής. Το σχετικό βάρος, που δίδεται στα διαφορετικά κριτήρια, θα καθορίσει και πολλές άλλες ενδιάμεσες αποφάσεις για την παραγωγή.

Διατύπωση του Προβλήματος

Θεωρούμε μια απλή περίπτωση, στην οποία υπάρχουν N εναλλακτικές αποφάσεις, που σημειώνονται σαν a_1, a_2, \dots, a_N . Το πόσο επιθυμητή είναι κάθε εναλλακτική μετρείται με m κριτήρια. Η επίδοση της εναλλακτικής a_j ως προς το κριτήριο i^{th} , συμβολίζεται σαν f_i^j . Ο Πίνακας 6.11 [13] απεικονίζει τους συμβολισμούς. Για την επεξήγηση των συμβολισμών, ας θεωρήσουμε ένα πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού, στο οποίο υπάρχουν τρεις παραγωγικοί πόροι (R1, R2, R3) και τρεις υπερργασίες (tasks) (T1, T2, T3). Κάθε πιθανή ανάθεση των υπερργασιών στους πόρους συμβολίζεται σαν a_j , για παράδειγμα $a_1 = (R1T1, R2T2, R3T3)$, $a_2 = (R1T2, R2T3, R3T1)$, $a_3 = (R1T3, R2T2, R3T1)$ κ.ο.κ. Τα κριτήρια, που είναι σχετικά με την επιλογή της ανάθεσης των υπερργασιών στους παραγωγικούς πόρους, μπορεί να είναι: η μέση τιμή του χρόνου παραμονής των υπερργασιών στο σύστημα παραγωγής (mean flowtime), η μέση τιμή του χρόνου καθυστέρησης των υπερργασιών στο σύστημα παραγωγής (mean tardiness—η οποία ορίζεται ως η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ του πραγματικού χρόνου ολοκλήρωσης και του προγραμματισμένου χρόνου ολοκλήρωσης—due date), η εκμετάλλευση του δυναμικού παραγωγής και η ποιότητα (επιφανειακή ποιότητα και αποκλίσεις από τις διαστατικές προδιαγραφές).

Επί πλέον ας υποθέσουμε, ότι η μέση τιμή του χρόνου παραμονής των υπερργασιών στο σύστημα και η μέση τιμή του χρόνου καθυστέρησης μετριοούνται σε λεπτά, η εκμετάλλευση του δυναμικού παραγωγής μετρείται σαν ποσοστό του διαθέσιμου δυναμικού παραγωγής του συστήματος και η ποιότητα σε μια υπο-

κειμενική κλίμακα σαν *εξαιρετική, πολύ καλή, καλή, μέτρια και κακή*. Παρατηρήστε, ότι οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων δεν αποκλείουν την χρήση υποκειμενικά μετρούμενων κριτηρίων. Όμως, η υποκειμενική κλίμακα πρέπει να είναι επακριβώς ορισμένη.

Εναλλακτικές	Κριτήρια			
	1	2	...	m
a_1	f_1^1	f_2^1	...	f_m^1
a_2	f_1^2	f_2^2	...	f_m^2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a_N	f_1^N	f_2^N	...	f_m^N

Πίνακας 6.11 Οι Συμβολισμοί για το Πρόβλημα Λήψης Απόφασης Πολλαπλών Κριτηρίων

Στο παράδειγμα αυτό θεωρούμε:

- Κριτήριο 1 = Μέση τιμή του χρόνου παραμονής των υπεργασιών στο σύστημα παραγωγής – mean flow-time (λεπτά)
- Κριτήριο 2 = Μέση τιμή του χρόνου καθυστέρησης των υπεργασιών στο σύστημα παραγωγής – mean tardiness (λεπτά)
- Κριτήριο 3 = Εκμετάλλευση δυναμικού της παραγωγής (Ποσοστό του διαθέσιμου δυναμικού της παραγωγής)
- Κριτήριο 4 = Ποιότητα (εξαιρετική, πολύ καλή, καλή, μέτρια και κακή)

Εάν η μέση τιμή του χρόνου παραμονής των υπεργασιών στο σύστημα παραγωγής για την εναλλακτική λύση a_1 είναι 10 λεπτά, τότε σύμφωνα με τους παραπάνω συμβολισμούς $f_1^1=10$. Παρομοίως, εάν η ποιότητα για την εναλλακτική a_2 θεωρείται εξαιρετική, τότε $f_4^2=$ εξαιρετική. Στην συνέχεια, όμως, προκύπτουν δύο ερωτήματα. Πώς πρέπει να ορισθούν τα κριτήρια για ένα δεδομένο πρόβλημα λήψης αποφάσεως και ποιές πρέπει να είναι οι επιθυμητές ιδιότητες κατά τον καθορισμό μιας ομάδας κριτηρίων; Η βιβλιογραφική έρευνα ή μια ανάλυση των δεδομένων εσόδου και εξόδου του υπό μελέτη συστήματος, συχνά οδηγεί στην επιλογή των κριτηρίων. Στην περίπτωση σημαντικών στρατηγικών αποφάσεων, μια ιεραρχική προσέγγιση στην δόμηση των στόχων, και των κριτηρίων ίσως είναι χρήσιμη. Για την περιγραφή αυτής της

προσέγγισης, θεωρήστε την απόφαση μιας παραγωγικής επιχείρησης σχετικά με την αύξηση του δυναμικού της παραγωγής. Η απόφαση μπορεί να περιλαμβάνει το πού θα προστεθεί το δυναμικό παραγωγής (χωροταξικά), το μέγεθος της αύξησης και την τεχνολογία που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί (αυτοματισμός έναντι συμβατικής τεχνολογίας).

Η ομάδα των κριτηρίων πρέπει να συμπληρωθεί, έτσι ώστε να μην αποκλείει καμμία από τις παραμέτρους που ενδιαφέρουν τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων. Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα αύξησης του δυναμικού της παραγωγής, εάν η απασχόληση εγχώριου εργατικού δυναμικού παρουσιάζει σχετικό ενδιαφέρον, τότε πρέπει να συμπεριληφθεί σαν κριτήριο. Επί πλέον, η ομάδα των κριτηρίων δεν πρέπει να περιέχει πλεονάζοντα κριτήρια, έτσι ώστε να αποφεύγεται ο επί πλέον υπολογισμός αποτελεσμάτων. Συμπερασματικά, ο αριθμός των κριτηρίων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, γιατί με τον τρόπο αυτό διατηρείται η δυνατότητα κατανόησης και εκτίμησης του προβλήματος. Ένα πολύ γενικό κριτήριο, όπως για παράδειγμα, η άποψη του πελάτη για την ποιότητα, πρέπει αναλύεται περαιτέρω. Όμως, η χρήση ενός μεγάλου αριθμού κριτηρίων για την εκτίμηση της άποψης του πελάτη σχετικά με την ποιότητα, ίσως δεν είναι ενδεδειγμένη, καθώς η μετέπειτα ανάλυση ίσως γίνει πολύ δύσκολη, εάν το μέγεθος της ομάδας των κριτηρίων δεν διατηρηθεί σε λογικά επίπεδα.

Ταξινόμηση των μεθόδων λήψης Αποφάσεων με πολλαπλά Κριτήρια

Ο αντικειμενικός στόχος όλων των μεθόδων πολλαπλών κριτηρίων είναι να μορφοποιήσουν και να αποτυπώσουν όλους τους συνδυασμούς (trade-offs) μεταξύ των κριτηρίων. Ο Πίνακας 6.12 [13] παρουσιάζει περιληπτικά τις διάφορες ομάδες των μεθόδων πολλαπλών κριτηρίων.

Οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Από την οπτική του υπεύθυνου για την λήψη αποφάσεων, είναι χρήσιμο ένα σχήμα ταξινόμησης βασισμένο στην πληροφορία που απαιτείται από αυτόν (ή αυτήν) για την εφαρμογή της μεθόδου. Σε μια τέτοια ταξινόμηση, η πρώτη ομάδα μεθόδων είναι εκείνη, στην οποία ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων δεν παρέχει καθόλου πληροφορίες κατά την φάση της ανάλυσης. Καθώς δεν παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με την εκτίμηση του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων, όσον αφορά τους συνδυασμούς (trade-offs) μεταξύ των κριτηρίων, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν μόνο μια καμπύλη συνδυασμού –trade-off curve, η οποία καλείται επίσης αποδοτικό όριο (efficient frontier) ή βέλτιστη λύση pareto– μεταξύ των κριτηρίων. Κατόπιν, ο υπεύθυνος για την λήψη αποφάσεων μπορεί να επιλέξει ένα σημείο από την καμπύλη συνδυασμού (trade-off curve), το οποίο να αντανακλά τις προτιμήσεις του. Εναλλακτικά, μπορούν να εφαρμοσθούν τυποποιημένες μέθοδοι, έτσι ώστε να προκύψει η συνάρτηση προτίμησης του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων, η οποία μπορεί με την σειρά της να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθούν σημεία της καμπύλης συνδυασμού. Η βέλτιστη απόφαση καθορίζεται σαν το σημείο που μεγιστοποιεί την χρησιμότητα (utility) ή την τιμή που ορί-

ζεται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων.

Κατηγορία	Πληροφορία που λαμβάνεται από τον υπεύθυνο λήψης απόφασης	Περιπτώσεις Εφαρμογής	Παραδείγματα μεθόδων και αναφορές
I	Καμμία	α. Ο χρήστης είναι άγνωστος ή υπάρχουν πολλοί χρήστες β. Ο χρήστης δε μπορεί να δώσει πληροφορία, αν δε δοθούν πρώτα κάποιες λύσεις γ. Το πρόβλημα είναι απλό ή εξυπηρετεί περισσότερο να εμπλακεί ο χρήστης μόνο στο τέλος της διαδικασίας	Δημιουργία efficient frontier curves ή διαγραμμάτων συσχετισμού (trade-off curves) [20, 21, 22]
II	Συνδυασμός μεταξύ κριτηρίων ή επιλογή μεταξύ δύο εναλλακτικών που θεωρούνται απαραίτητες	α. Η συνάρτηση προτίμησης (preference function) είναι αρκετά πολύπλοκη για να διατυπωθεί με ακρίβεια β. Ο χρήστης μπορεί να δώσει μόνο τοπική πληροφορία	Αλληλεπιδρών μαθηματικός προγραμματισμός [23, 24]
III	Επακριβής προσδιορισμός των συσχετισμών (trade-offs) και των συναρτήσεων προτίμησης	α. Μπορεί να διατυπωθεί με ακρίβεια η συνάρτηση προτίμησης β. Το πρόβλημα είναι στρατηγικής φύσης και για αυτό στοχεύουμε στις επιθυμητές τιμές (προτιμήσεις) πριν την αξιολόγηση των αποφάσεων	Θεωρία συνάρτησης προτίμησης πολλαπλών παραμέτρων (Multiattribute preference function theory) [19, 25]

Πίνακας 6.12 Ταξινόμηση Μεθόδων Πολλαπλών Κριτηρίων

Στην δεύτερη κατηγορία μεθόδων, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων είναι ένα αναπόσπαστο στοιχείο της διαδικασίας ανάλυσης. Οι πληροφορίες ζητούνται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων, όσον αφορά τις προτιμήσεις του, για διάφορα επίπεδα ενδιαφέροντος σχετικά με τα κριτήρια που εξετάζονται. Με βάση τις πληροφορίες αυτές, η μέθοδος τείνει στην επίτευξη καλύτερων λύσεων –με την άντληση ακόμα περισσότερης πληροφορία από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων, όπου χρειάζεται. Οι διαδοχικές προσεγγίσεις ολοκληρώνονται, όταν προσδιορισθεί μια αποδεκτή ή η πλέον επιθυμητή λύση. Η φύση αυτών των μεθόδων εμπεριέχει το στοιχείο της αλληλεπίδρασης, καθώς η άντληση της πληροφορίας από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων είναι σημαντική, ώστε να προκύψει από την μέθοδο η επιθυμητή απόφαση.

Τελικά, στην τρίτη κατηγορία μεθόδων, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να παρέχει πλήρη πληροφορία για τις προτιμήσεις του καθώς και τους συνδυασμούς μεταξύ των κριτηρίων. Μια συνάρτηση προτίμησης (συνάρτηση χρησιμότητας ή αξίας –utility or value function) δημιουργείται με βάση την πληροφορία, που παρέχεται. Όταν η συνάρτηση προτίμησης είναι πλήρως γνωστή, η διαδικασία επιλογής αντικαθιστά την συνάρτηση προτίμησης σε μια

αντικειμενική συνάρτηση.

Έχουν αναπτυχθεί επίσης υβριδικές διαδικασίες, οι οποίες συνδυάζουν τις στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στις τρεις παραπάνω κατηγορίες μεθόδων. Άλλα σχήματα ταξινόμησης [19] των μεθόδων μπορούν επίσης να αναπτυχθούν στην βάση:

- Της γνώσης ή μη των αποτελεσμάτων των αποφάσεων
- Της μοντελοποίησης του χρονικού ορίζοντα στον οποίο συμβαίνει το αποτέλεσμα με απλές ή πολλαπλές χρονικές περιόδους
- Του πεπερασμένου ή όχι των εναλλακτικών αποφάσεων
- Του πλήθους των υπευθύνων λήψης της απόφασης (ένας ή πολλοί)

Οι μέθοδοι Efficient Frontier (Μέθοδος αποδοτικού ορίου) ή Trade-off (Μέθοδος του Συνδυασμού μεταξύ Κριτηρίων)

Ας υποθέσουμε, ότι οι συναρτήσεις $f_1(x)$ και $f_2(x)$ συμβολίζουν τα επίπεδα επίδοσης (επίσης αναφέρονται και ως αποτελέσματα ή επιπτώσεις –consequences) δύο κριτηρίων κατά την επιλογή μιας απόφασης x . Μια απόφαση x κυριαρχεί επί μιας απόφασης y , όταν πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Η $f_i(x)$ είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο και η $f_i(y)$ για κάθε i
2. Η $f_i(x)$ είναι καλύτερη από την $f_i(y)$ για ένα τουλάχιστον i

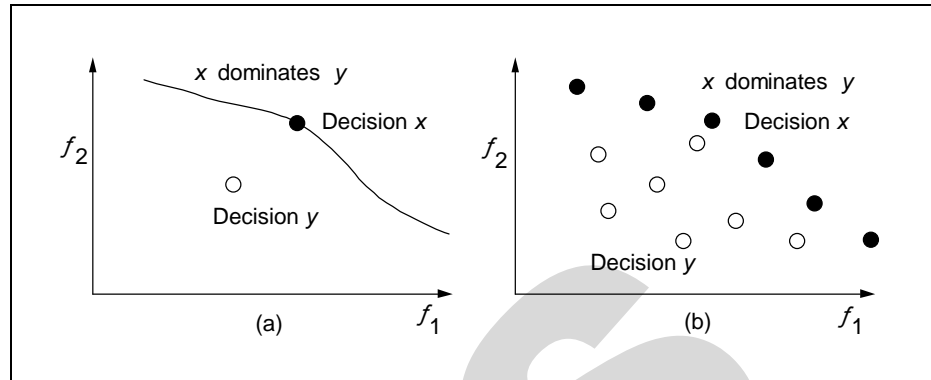
Εφ' όσον η απόφαση x είναι το ίδιο καλή όσο και η y για όλα τα κριτήρια και καλύτερη τουλάχιστον για ένα κριτήριο, είναι λογικό να αποκλεισθεί η y από τις επιλογές απόφασης. Ας υποθέσουμε, ότι απεικονίζουμε διαγραμματικά όλες τις πιθανές τιμές των f_1 και f_2 για την απόφαση x όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.35 [13]. Υποθέτουμε, ότι τα υψηλότερα επίπεδα των f_1 και f_2 είναι και τα περισσότερο επιθυμητά. Στο Σχήμα 6.35a η απόφαση x είναι μια συνεχής μεταβλητή και επομένως υπάρχει ένας άπειρος αριθμός δυνατών αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 6.35b η απόφαση x έχει έναν πεπερασμένο αριθμό εναλλακτικών (πχ. 15 πιθανές περιπτώσεις) και επομένως υπάρχει ένας πεπερασμένος αριθμός πιθανών επιπτώσεων/αποτελεσμάτων (consequences). Η ομάδα των γραμμοσκιασμένων σημείων στο Σχήμα 6.35 ονομάζεται αποδοτικό όριο (efficient frontier) –το βέλτιστο σύνολο pareto ή η καμπύλη διασύνδεσης (trade-off curve). Το κύριο χαρακτηριστικό της efficient frontier curve είναι ότι όλα τα σημεία της αντιστοιχούν σε κυρίαρχες αποφάσεις. Με άλλα λόγια, κάθε σημείο, που δεν ανήκει στην efficient frontier curve (ή trade-off curve) κυριαρχείται από κάποιο σημείο αυτής της καμπύλης. Ανεξάρτητα από την συνάρτηση προτίμησης (αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση κόστους), η περισσότερο επιθυμητή απόφαση, δηλαδή η βέλτιστη, πρέπει να αντιστοιχεί σε κάποιο από τα σημεία της efficient frontier curve.

Ας υποθέσουμε, ότι μια απόφαση προγραμματισμού αποθεμάτων πρόκειται να ληφθεί με βάση τα ακόλουθα δύο κριτήρια:

$$f_1 = \text{Το μέσο κόστος επένδυσης σε αποθέματα}$$

$f_2 =$ Το πρόγραμμα παραγωγής (work load) του συστήματος, μετρούμενο από τον αριθμό παραγγελιών ανά έτος.

Έστω R η ετήσια ζήτηση, p το κόστος προμήθειας ανά μονάδα και Q η ποσότητα της παραγγελίας. Η ζήτηση είναι γνωστή και σταθερή, σε κάθε χρονική περίοδο. Επομένως,



Σχήμα 6.35 Οι Trade-off Curves (Καμπύλες Διασύνδεσης) για Περιπτώσεις δύο Παραμέτρων α) Άπειρες Επιπτώσεις (Infinite Consequences) και β) Πεπερασμένες Επιπτώσεις (Finite Consequences)

$$f_1 = \frac{Q}{2} p$$

$$f_2 = \frac{R}{Q}$$

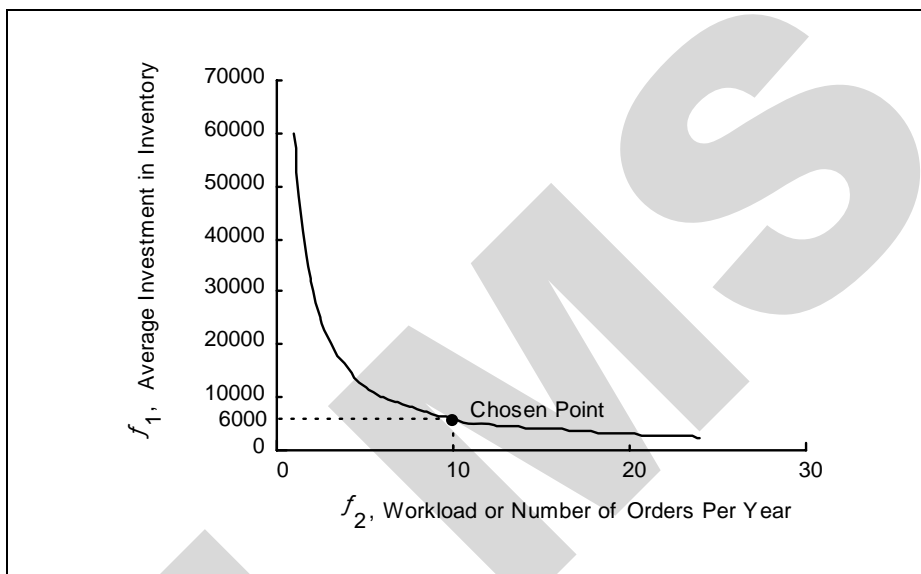
Η μεταβλητή απόφασης είναι η Q . Η efficient frontier curve μπορεί να σχεδιασθεί άμεσα, μεταβάλλοντας τα επίπεδα της Q . Στον Πίνακα 6.13 [13], δείχνονται τα επίπεδα των f_1 και f_2 , για διάφορες τιμές της Q , υποθέτοντας ότι $R = 12.000$ και $p = \$10/\text{μονάδα}$. Στο Σχήμα 6.36 [13] παρουσιάζεται η efficient frontier curve. Ο υπεύθυνος για την λήψη των αποφάσεων μπορεί να επιλέξει ένα σημείο από την καμπύλη αυτή. Ας υποθέσουμε, ότι ο υπεύθυνος για την λήψη των αποφάσεων επιλέγει το σημείο που φαίνεται στο Σχήμα 6.36 και αντιστοιχεί σε 10 παραγγελίες ανά έτος και σε μέση επένδυση σε αποθέματα \$6.000. Η τιμή της επιθυμητής απόφασης Q προκύπτει από την αντικατάσταση του επιλεγμένου σημείου στις εξισώσεις των f_1 και f_2 . Δηλαδή,

$$f_1 = \frac{Q}{2} \times 10 = 6000$$

$$Q = 1200 \text{ μονάδες}$$

Ποσότητα παραγγελίας Q	Μέση επένδυση σε Απόθεμα, $f_1=(Q/2)p$	Πρόγραμμα Παραγωγής ή Ετήσιος Αριθμός παραγγελιών, $f_2=R/Q$
500	2,500	24
1,000	5,000	12
2,000	10,000	6
4,000	20,000	3
6,000	30,000	2
12,000	60,000	1

Πίνακας 6.13 Υπολογισμός των f_1 και f_2 για το πρόβλημα του Προγραμματισμού Αποθέματος ($R=12.000$ και $p=\$10/μονάδα$)



Average Investment in Inventory = Μέση επένδυση σε Απόθεμα
 Chosen Point = Επιλεγμένο σημείο
 Workload or Number of Orders Per Year = Πρόγραμμα Παραγωγής ή Ετήσιος Αριθμός παραγγελιών

Σχήμα 6.36 Efficient Frontier (Αποδοτικό Όριο) για το Πρόβλημα Προγραμματισμού Αποθέματος

Ας σημειωθεί, ότι αν η απόδοση του κεφαλαίου (opportunity cost of capital) είναι 10% ανά έτος και το κόστος της παραγγελίας είναι \$60 ανά παραγγελία, τότε η τιμή $Q = 1200$ μονάδες θα είναι η βέλτιστη. Ένα δεδομένο σημείο θα είναι βέλτιστο για όλους τους συνδυασμούς του κόστους παραγγελίας c_p και της απόδοσης του κεφαλαίου I , έτσι ώστε $c_p / I =$ σταθερό (π.χ. $c_p = \$120$ και $I = 20\%$ ή $c_p = \$30$, και $I = 5\%$).

Προσέγγιση μέσω Μαθηματικού Προγραμματισμού

Ας θεωρήσουμε ένα παράδειγμα προγραμματισμού έργου με βάση τα ακόλουθα δύο κριτήρια:

f_1 = Χρόνος ολοκλήρωσης του έργου

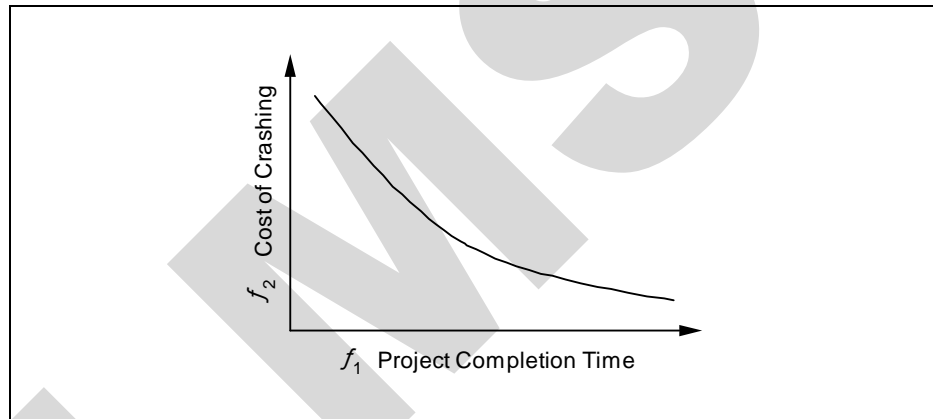
f_2 = Κόστος λανθασμένων (crashing) δραστηριοτήτων

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Για να κατασκευάσουμε την efficient frontier ή trade-off curve μεταξύ των f_1 και f_2 λύνουμε το πρόβλημα:

Ελαχιστοποίησε την f_2

Υπό τους περιορισμούς : περιορισμοί αλληλουχίας και $f_1 \leq T$

Στην συνέχεια, διαφοροποιούμε συστηματικά το T , τον χρόνο ολοκλήρωσης, ώστε να προκύψει η efficient frontier curve που φαίνεται στο σχήμα 6.37 [13].



Cost of Crashing = Κόστος λανθασμένων δραστηριοτήτων

Project Completion Time = Χρόνος ολοκλήρωσης του έργου

Σχήμα 6.37 *Efficient Frontier Curve για το Παράδειγμα Προγραμματισμού του Έργου*

Η καμπύλη αυτή είναι εν μέρει γραμμική διότι τα f_1 και f_2 , καθώς και όλοι οι περιορισμοί του συστήματος αυτού είναι γραμμικοί. Η βασική ιδέα στην προσέγγιση αυτή είναι, ότι ένα κριτήριο περιλαμβάνεται στο σύνολο των περιορισμών και μεταβάλλεται παραμετρικά, ώστε να ελαχιστοποιήσει το άλλο κριτήριο. Η προσέγγιση αυτή είναι, επίσης, εφαρμόσιμη όταν υπάρχουν περισσότερα από δύο κριτήρια. Σε αυτήν την γενικότερη περίπτωση όλα τα κριτήρια, εκτός από ένα, πρέπει να περιληφθούν στο σύνολο των περιορισμών και το κριτήριο, που απομένει, βελτιστοποιείται επιτυχώς, μεταβάλλοντας το δεξί μέρος

των σχέσεων των κριτηρίων, που περιέχονται στο σύνολο των περιορισμών.

Μια άλλη προσέγγιση, για να προκύψει η *efficient frontier curve*, είναι να χρησιμοποιήσουμε μια επίσης γραμμική μέθοδο, η οποία ονομάζεται “*linear weighted average method*”. Στην προσέγγιση αυτή, ζητάμε την βελτιστοποίησή της

$$w_1f_1 + w_2f_2 + w_3f_3 + \dots + w_mf_m$$

υποκείμενη σε συγκεκριμένους περιορισμούς, όπου

$$w_i \geq 0, i = 1 \text{ έως } m$$

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1$$

Η λύση αυτού του προβλήματος, το οποίο είναι ένα απλό γραμμικό πρόβλημα εάν όλα τα f_i και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικοί, παρέχει ένα σημείο στην *efficient frontier curve*. Επιλέγοντας διαφορετικές τιμές για τα βάρη, w_i μπορούμε να διατρέξουμε όλη την καμπύλη.

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί στην παραγωγή μεικτών αποφάσεων, στις αποφάσεις συνολικού προγραμματισμού, στις αποφάσεις χωροταξικού σχεδιασμού και διανομής, όταν οι συναρτήσεις των κριτηρίων και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί. Στα μη γραμμικά προβλήματα, απαιτούνται πιο πολύπλοκες διαδικασίες για να δημιουργηθούν οι *efficient frontier curves*, ειδικά, εάν το πρόβλημα δεν είναι ομαλό, δηλαδή η *efficient frontier curve* περιέχει διακυμάνσεις.

Πολλά προβλήματα παραγωγής, όπως ο χρονοπρογραμματισμός, μπορεί να μην επιλύονται εύκολα με τις μεθόδους του μαθηματικού προγραμματισμού. Αυτό συμβαίνει διότι, ακόμα και για ένα κριτήριο, το μέγεθος του προβλήματος είναι πολύ μεγάλο για να επιλυθεί σε λογικό υπολογιστικό χρόνο. Ειδικές διαδικασίες, που αξιοποιούν τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, καθώς και εμπειρικές μέθοδοι (*heuristics*) μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων.

Συνάρτηση Προτίμησης (Preference Function)

Σε μερικές περιπτώσεις παραγωγής και διεργασιών, μπορεί να απαιτείται από τον υπεύθυνο για την λήψη των αποφάσεων να ποσοτικοποιήσει την συνάρτηση προτίμησης του για τα κριτήρια που ενδιαφέρουν. Η συνάρτηση προτίμησης μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των εναλλακτικών αποφάσεων. Μια διαδικασία εκτίμησης της συνάρτησης προτίμησης του υπευθύνου για την λήψη των αποφάσεων περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1 - Προσδιορισμός της μορφής της Συνάρτησης Προτίμησης

Η συνάρτηση προτίμησης P μπορεί να αναλυθεί σε απλούστερες σχέσεις, εάν

οι προτιμήσεις του υπεύθυνου για την λήψη των αποφάσεων, για διάφορους συνδυασμούς των επιπέδων των κριτηρίων ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες. Η απλούστερη και η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σχέση είναι αυτή των σταθμισμένων αθροισμάτων (weighted additive form).

$$P(f_1, f_2, f_3) = w_1 v_1(f_1) + w_2 v_2(f_2) + w_3 v_3(f_3) \quad (6-11)$$

όπου w_i είναι ο συντελεστής βαρύτητας και v_i είναι η συνάρτηση τιμής (value function) για κάθε κριτήριο. Οι συντελεστές βαρύτητας και οι συναρτήσεις τιμών πληρούν τις ακόλουθες συνθήκες:

$$\sum w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1$$

και

$$v_i(\text{βέλτιστο επίπεδο}) = 1$$

$$v_i(\text{χειρότερο επίπεδο}) = 0, \text{ για } i = 1 \text{ έως } m$$

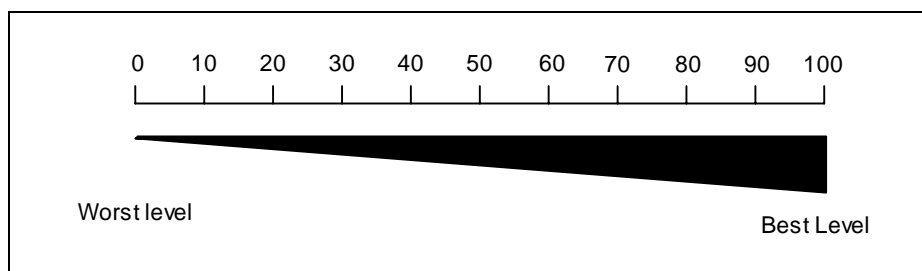
Προκειμένου να πιστοποιήσουμε την ισχύ του τύπου αυτού, πρέπει να ελέγξουμε μια συνθήκη, η οποία καλείται «ανεξάρτητη διαφορά» (difference independence) για κάθε κριτήριο. Στην ουσία, η συνθήκη αυτή σημαίνει, ότι το εύρος της διαφοράς προτίμησης μεταξύ δύο επιπέδων του κριτηρίου i δεν μεταβάλλεται, όταν αλλάζουν τα σταθερά επίπεδα των άλλων κριτηρίων.

Εάν η συνθήκη της «ανεξάρτητης διαφοράς» δεν ισχύει, τότε είναι δυνατόν να έχουμε δύο άλλες περιπτώσεις. Μια περίπτωση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα περισσότερο πολύπλοκο μοντέλο, που επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ των κριτηρίων. Η δεύτερη περίπτωση είναι να επαναπροσδιορίσουμε τα κριτήρια, έτσι ώστε να ισχύει η «ανεξάρτητη διαφορά». Ο προσθετικός τύπος είναι αρκετά «σταθερός –robust» και στις περισσότερες περιπτώσεις θα παράγει μικρού μεγέθους λάθη, ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχουν μέτριες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κριτηρίων.

Βήμα 2 – Δημιουργία της Μονοδιάστατης Συνάρτησης Τιμών (Value Function)

Στην εξίσωση (6-11), πρέπει να αξιολογήσουμε την συνάρτηση $v_i(f_i)$, για το κριτήριο i . Μια απλή μέθοδος αξιολόγησης των συναρτήσεων αυτών είναι η χρήση μιας κλίμακας με 100 διαβαθμίσεις, στις οποίες το 0 αντιστοιχεί στο χειρότερο επίπεδο και το 100 στο καλύτερο (Σχ. 6.38). Τα διαφορετικά επίπεδα μιας παραμέτρου τοποθετούνται στην κλίμακα αυτή, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν τις προτιμήσεις του υπεύθυνου για την λήψη των αποφάσεων. Η τιμή του επιπέδου ενός κριτηρίου είναι απλώς η κλίμακα/100. Επομένως, το καλύτερο επίπεδο, που μπορεί να έχει ένα κριτήριο, αντιστοιχεί πάντα στην τι-

μή 1 ενώ το χειρότερο αντιστοιχεί στην τιμή 0.



Worst level = Χειρότερο επίπεδο

Best level = Καλύτερο επίπεδο

Σχήμα 6.38 Κλίμακα Διαβάθμισης

Βήμα 3 – Προσδιορισμός των Συντελεστών Βαρύτητας (Importance Weights) για τα Κριτήρια

Προσδιορίζεται πρώτα το πιο σημαντικό από τα κριτήρια. Το κριτήριο αυτό καθώς και ένα από τα άλλα κριτήρια λαμβάνονται υπ' όψη ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, έστω ότι η περίπτωση A αντιστοιχεί σε μια εναλλακτική, όπου το καλύτερο κριτήριο είναι στο βέλτιστο επίπεδο και ένα από τα άλλα κριτήρια είναι στο χειρότερο επίπεδο. Έστω ότι η περίπτωση B αντιστοιχεί στην κατάσταση, όπου το άλλο κριτήριο είναι στο βέλτιστο επίπεδο. Τότε θέτουμε μια υποθετική ερώτηση στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων και του ζητάμε να ορίσει το επίπεδο του βέλτιστου κριτηρίου, που θα τον έκανε να έχει την ίδια προτίμηση για τις περιπτώσεις A και B. Εξισώνοντας τις σχέσεις, που θα προκύψουν, εάν χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (6-11), για τις περιπτώσεις A και B, θα προκύψει μια εξίσωση, που θα συσχετίζει τους συντελεστές βαρύτητας των άλλων κριτηρίων με τον συντελεστή βαρύτητας του πιο σημαντικού κριτηρίου. Εάν επαναλάβουμε την διαδικασία και για τα κριτήρια που έχουν απομείνει, θα προκύψουν εξισώσεις, που σχετίζουν τους συντελεστές βαρύτητας του πιο σημαντικού κριτηρίου με τα άλλα κριτήρια. Τελικά, εφ' όσον το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας είναι ίσο με 1, θα μπορούσαμε να λύσουμε την εξίσωση ως προς τιμή του συντελεστή βαρύτητας του πιο σημαντικού κριτηρίου. Η τιμή αυτή αντικαθίσταται στις προηγούμενες εξισώσεις, ώστε να προσδιορισθεί ο συντελεστής βαρύτητας, που σχετίζεται με τα άλλα κριτήρια.

Βήμα 4 – Υπολογισμός των συνολικών τιμών

Ο υπολογισμός των συνολικών σταθμισμένων τιμών, για κάθε μια από τις εναλλακτικές λύσεις, πραγματοποιείται μέσω των εξισώσεων (6-11).

Βήμα 5 -Ανάλυση Ευαισθησίας

Εφ' όσον τόσο οι διαβαθμίσεις για τα διαφορετικά επίπεδα των κριτηρίων, όσο και τους συντελεστές βαρύτητας καθορίζονται με τρόπο υποκειμενικό, είναι χρήσιμο να αναλύσουμε τις επιπτώσεις που θα προκύψουν από τις αλλαγές ορισμένων τιμών. Εναλλακτικά, εάν διάφοροι υπεύθυνοι για την λήψη των αποφάσεων εμπλέκονται στην διαδικασία, είναι αρκετά πιθανό να υπάρχουν διαφορές όσον αφορά στον προσδιορισμό των διαβαθμίσεων ή των συντελεστών βαρύτητας. Η ανάλυση ευαισθησίας διευκρινίζει, εάν οι διαφορές αυτές επηρεάζουν την επιλογή της πιο επιθυμητής εναλλακτικής λύσης. Σε αρκετές περιπτώσεις διαφωνίες σχετικά με τις διαβαθμίσεις ή τους συντελεστές βαρύτητας μπορεί να επηρεάζουν πράγματι την τελική αξιολόγηση. Στην περίπτωση αυτή, μια ανοικτή συζήτηση ή πρόσθετη πληροφορία πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να συμβιβάσει τις διαφορετικές απόψεις.

6.3.3 Εμπειρικοί Κανόνες Διεκπεραίωσης (Dispatching Heuristics)

Παραδοσιακά, μεγάλο μέρος της έρευνας, που έχει πραγματοποιηθεί στο χρονοπρογραμματισμό, επικεντρώνεται σε εμπειρικές μεθόδους (heuristics), που καλούνται κανόνες διεκπεραίωσης (dispatch rules). Γενικά, σε ένα πρόβλημα, ως εμπειρική μέθοδος (heuristic) θεωρείται μια διαδικασία επίλυσης, που βασίζεται στην διαίσθηση. Η εφαρμογή της βασίζεται στην εμπειρική απόδειξη, σχετικά με την δυνατότητα επιτυχίας της. Ως επιτυχία, θεωρείται η δυνατότητα εύρεσης μιας καλής λύσης, ως προς κάποιο δείκτη, η οποία να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ποσοστό της βέλτιστης λύσης. Ένας κανόνας διεκπεραίωσης, είναι μια μέθοδος ταξινόμησης ενός συνόλου από υπερργασίες (tasks), που αναμένουν να υλοποιηθούν από την μηχανή. Η υπερργασία με την μεγαλύτερη προτεραιότητα επιλέγεται να διεκπεραιωθεί από την μηχανή. Από την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του κανόνα, κάθε φορά, που μια μηχανή είναι διαθέσιμη για μια ανάθεση, προκύπτει ένα χρονοπρόγραμμα. Στην περίπτωση, που περισσότερες από μια μηχανές είναι διαθέσιμες σε μια χρονική στιγμή, είναι, επίσης, απαραίτητος ένας κανόνας επιλογής μηχανών, ώστε να προσδιορισθεί η σειρά με την οποία οι μηχανές θα δεχθούν τις αναθέσεις.

Έως τώρα έχουν προταθεί αρκετοί κανόνες διεκπεραίωσης [26-30]. Ακολουθεί ένας πίνακας, ο οποίος περιλαμβάνει ορισμένους από τους κανόνες αυτούς [31]:

No	Κανόνας	Περιγραφή
1	RANDOM	Επιλέγεται προς εκτέλεση το job, που έχει την μικρότερη τιμή μιας τυχαίας προτεραιότητας, την οποία λαμβάνει κατά την άφιξή του σε μία θέση αναμονής (queue)

No	Κανόνας	Περιγραφή
2	FCFS	Επιλέγεται προς εκτέλεση το job, που φθάνει πρώτο σε μια θέση αναμονής (queue)
3	LCFS	Επιλέγεται το job, που φθάνει τελευταίο σε μια θέση αναμονής (queue)
4	FASFS	Επιλέγεται το job, που φθάνει πρώτο σε ένα job shop
5	SPT	Επιλέγεται το job, που έχει τον μικρότερο χρόνο επεξεργασίας
6	LPT	Επιλέγεται το job, που έχει τον μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας
7	FOPRN	Επιλέγεται το job με τις λιγότερες εναπομένουσες διεργασίες για υλοποίηση
8	MOPRN	Επιλέγεται το job με τις περισσότερες εναπομένουσες διεργασίες για υλοποίηση
9	LWRK	Επιλέγεται το job με την λιγότερη εναπομένουσα εργασία για υλοποίηση
10	MWRK	Επιλέγεται το job με την περισσότερη εναπομένουσα εργασία για υλοποίηση
11	TWORK	Επιλέγεται το job με την περισσότερη συνολική εργασία για υλοποίηση
12	NINQ	Επιλέγεται το job, που θα συνεχίσει την επόμενη διεργασία του στην μικρότερη αναμονή
13	WINQ	Επιλέγεται το job, που θα συνεχίσει την επόμενη διεργασία του στην αναμονή με την λιγότερη εργασία
14	XWINQ	Επιλέγεται το job, που θα συνεχίζει για την επόμενη διεργασία του στην αναμονή με την λιγότερη εργασία. Η αναμονή θεωρείται, ότι περιλαμβάνει εργασίες, οι οποίες θα φθάσουν πριν από την συγκεκριμένη εργασία
15	DDATE	Επιλέγεται το job με την πιο σύντομη ημερομηνία παράδοσης
16	SLACK	Επιλέγεται το job με το μικρότερο slack time, το οποίο υπολογίζεται αφαιρώντας από την ημερομηνία παράδοσης όλους τους εναπομένοντες χρόνους κατεργασίας για το συγκεκριμένο job
17	OPNDD	Επιλέγεται job με το task, το οποίο έχει την συντομότερη ημερομηνία παράδοσης. Σε κάθε διεργασία κατανέμονται ομοιόμορφα οι χρόνοι παράδοσης την χρονική στιγμή, που το job εισέρχεται στο σύστημα παραγωγής
18	S/OPN	Επιλέγεται το job με τον μικρότερο λόγο του slack time διαιρούμενο με τον αριθμό των διεργασιών, που απομένουν για επεξεργασία

No	Κανόνας	Περιγραφή
19	S/PT	Επιλέγεται το job με τον μικρότερο λόγο του slack time διαιρούμενο με τον χρόνο κατεργασίας, που έχει απομείνει
20	DS	Επιλέγεται το job με το μικρότερο slack time, το οποίο υπολογίζεται αφαιρώντας την παρούσα χρονική στιγμή από την διαφορά της ημερομηνίας παράδοσης μείον τον αναμενόμενο χρόνο παραμονής του job στο σύστημα παραγωγής έως την εκτέλεση του job
21	DS/PT	Επιλέγεται το job με τον μικρότερο λόγο του dynamic slack time διαιρούμενο με τον χρόνο υλοποίησης, που έχει απομείνει
22	DS/OPN	Επιλέγεται το job με τον μικρότερο λόγο του dynamic slack time διαιρούμενο με τον αριθμό των διεργασιών, που απομένουν για επεξεργασία
23	P+WKR(a)	Επιλέγεται το job με το μικρότερο σταθμισμένο άθροισμα του επόμενου χρόνου επεξεργασίας και της εναπομένουσας εργασίας. Το (a) είναι μια σταθερά στάθμισης, η οποία είναι μεγαλύτερη του 0.
24	P/WKR(a)	Επιλέγεται το job με τον μικρότερο σταθμισμένο λόγο του επόμενου χρόνου επεξεργασίας προς την εναπομένουσα εργασία. Το (a) είναι μια σταθερά στάθμισης, η οποία είναι μεγαλύτερη του 0.
25	P/TWK	Επιλέγεται το job με τον μικρότερο λόγο του επόμενου χρόνου επεξεργασίας προς την συνολική εργασία.
26	P+WQ(a)	Επιλέγεται το job με το μικρότερο σταθμισμένο άθροισμα του επόμενου χρόνου επεξεργασίας και της εργασίας στην αναμονή που ακολουθεί. Το (a) είναι μια σταθερά στάθμισης, η οποία είναι μεγαλύτερη του 0.
27	P+XWQ(a)	Επιλέγεται το job με το μικρότερο σταθμισμένο άθροισμα του επόμενου χρόνου επεξεργασίας και της εργασίας (συμπεριλαμβανομένης και της αναμενόμενης εργασίας) στην αναμονή που ακολουθεί. Το (a) είναι μια σταθερά στάθμισης, η οποία είναι μεγαλύτερη του 0.
28	P+S/OPN (a+b)	Επιλέγεται το job με το μικρότερο σταθμισμένο άθροισμα του επόμενου χρόνου επεξεργασίας και του slack time ανά διεργασία που απομένει. Τα (a) και (b) είναι σταθερές στάθμισης και είναι μεγαλύτερες του 0. Το κάθε σετ παραμέτρων (a, b) αναπαριστά ένα διαφορετικό κανόνα προτεραιότητας.
29	SPT-T(a)	Αυτή είναι η περιορισμένη έκδοση του SPT. Εφ' όσον κανένα job στην αναμονή, από την οποία γίνεται

No	Κανόνας	Περιγραφή
		η επιλογή, δεν περιμένει περισσότερο από 'a' μονάδες χρόνου σε αυτή την αναμονή, γίνεται κανονική επιλογή SPT. Όταν κάποιο job περιμένει περισσότερο, του δίδεται κυριαρχούσα προτεραιότητα.
30	FCFS(a)	Αυτή είναι η παραλλαγή του FCFS, στην οποία γίνεται επιλογή SPT για μια συγκεκριμένη αναμονή, όταν αυτή γίνεται πολύ μεγάλη. Εάν υπάρχουν λιγότερα από 'a' jobs στην αναμονή την ώρα της επιλογής, επιλέγεται η νωρίτερη άφιξη στην αναμονή. Εάν υπάρχουν 'a' ή περισσότερα jobs, τότε επιλέγεται το job με τον μικρότερο χρόνο επεξεργασίας.
31	SPT-2C(a)	Αυτή είναι μια παραλλαγή του SPT δύο τάξεων. Ένα τμήμα των jobs, που προσδιορίζεται από το 'a' αναγνωρίζεται ως προτιμώμενο job και επιλέγεται με το SPT. Εάν δεν υπάρχουν προτιμώμενα jobs στην συγκεκριμένη αναμονή, τότε επιλέγεται το κανονικό job με το SPT.
32	FCFS(pr)	Η προτεραιότητα εξαρτάται από την χρηματική αξία του job. Τα jobs χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: μια κατηγορία υψηλής χρηματικής αξίας και μια κατηγορία χαμηλής χρηματικής αξίας. Όλα τα jobs, που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία έχουν πάντα μεγαλύτερη προτεραιότητα από τα jobs της δεύτερης κατηγορίας. Μέσα σε κάθε κατηγορία, προτεραιότητα δίδεται με βάση την σειρά άφιξης (FCFS). Υπάρχει στην πράξη μια οικογένεια κανόνων τέτοιου τύπου, που μπορούν να παραμετροποιηθούν με βάση το 'pr', την αναλογία των jobs, που κατατάσσονται στην κατηγορία χαμηλής χρηματικής αξίας.
33	VALUE	Η προτεραιότητα εξαρτάται ανάλογα με την χρηματική αξία του job. Η προτεραιότητα είναι ίση με την χρηματική αξία του job.
34	NINQ(q)	Η προτεραιότητα εξαρτάται από την κίνηση, που έπεται. Μέγιστη προτεραιότητα δίδεται σε αυτό το job που, φεύγοντας από την μηχανή, θα πάει στην επόμενη μηχανή που έχει την μικρότερη (με την έννοια του ελάχιστου χρόνου επεξεργασίας) κρίσιμη αναμονή. Εάν καμμία αναμονή δεν είναι κρίσιμη, η επιλογή γίνεται με βάση την σειρά άφιξης. Μια αναμονή θεωρείται κρίσιμη, όταν έχει χρόνο επεξεργασίας μικρότερο από ένα συγκεκριμένο αριθμό μονάδων χρόνου. Στην πράξη υπάρχει μια οικογένεια κανόνων αυτού του τύπου, που μπορούν να παραμετροποιηθούν με το

No	Κανόνας	Περιγραφή
		‘q’, την ποσότητα, κάτω από την οποία μια αναμονή γίνεται κρίσιμη.
35	ESDATE(a)	Το job επιλέγεται με βάση την νωρίτερη ημερομηνία εκκίνησης, που προσδιορίζεται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των διεργασιών (από τις οποίες πρέπει να περάσει το job) επί ένα τυχαίο περιθώριο ‘a’ (a>0).
36	SEQ	Ο κανόνας αυτός λαμβάνει υπ’ όψη την καθυστέρηση της ροής [30], σε σύγκριση με τον χρόνο αναμονής που έχει περάσει και με τον αριθμό των εναπομενουσών διεργασιών. Η καθυστέρηση της ροής προσδιορίζεται εμπειρικά με βάση την αξία του Job. Όσο υψηλότερη η αξία, τόσο χαμηλότερη η καθυστέρηση της ροής και έτσι ένα job επιλέγεται για εμπρόθεσμη ολοκλήρωση με βάση τον αριθμό των εναπομενουσών εργασιών.
37	PRIORITY INDEX	Το job, που επιλέγεται, έχει τη μικρότερη τιμή του P(ab) [29], όπου $P(ab) = (\text{καταληκτική ημερομηνία}) - (\text{απαιτούμενος χρόνος για τις περαιτέρω κινήσεις}) - a * (\text{αναμενόμενος απαιτούμενος χρόνος για μελλοντική διεργασία}) + b * (\text{αναμενόμενος χρόνος για την τρέχουσα διεργασία})$.
38	FIXSEQ	Το job, που επιλέγεται πρώτο, περιέχεται σε κάποια συγκεκριμένη κατηγορία. Μετά την επεξεργασία όλων των jobs μιας κατηγορίας, επεξεργάζεται η επόμενη κατηγορία, με βάση μια προκαθορισμένη αλληλουχία των κατηγοριών.
39	MINSEQ	Το job επιλέγεται με βάση τον ελάχιστο χρόνο οργάνωσης (setup time).
40	FIXSEQ-S	Το job επιλέγεται με βάση τον ελάχιστο χρόνο εξυπηρέτησης, αφού επιλεγθεί μια συγκεκριμένη κατηγορία jobs μέσα από την προκαθορισμένη αλληλουχία.
41	MIXSEQ-S	Το job επιλέγεται με βάση τον ελάχιστο χρόνο εξυπηρέτησης, αφού επιλεγθεί μέσα από μια συγκεκριμένη κατηγορία jobs, που έχει ελάχιστο χρόνο οργάνωσης (setup time).
42	SSS	Το job επιλέγεται με βάση το ελάχιστο άθροισμα του χρόνου οργάνωσης (setup) και του χρόνου εξυπηρέτησης.

Οι κανόνες διεκπεραίωσης μπορεί να βασίζονται στις υπερργασίες (tasks), π.χ. ο EDD και ο SPT, ή μπορεί να συσχετίζονται με τις εργασίες (jobs), όπως ο κανόνας του Least Remaining Work –LRM (Κανόνας Ελάχιστης Εναπομένου-

σας Εργασίας). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε, ότι η διαφοροποίηση μεταξύ μιας εργασίας (job) και μιας υπεργασίας (task) έγκειται στο ότι η εργασία αναφέρεται στην κατασκευή ενός εξαρτήματος στο σύνολό του, ενώ η υπεργασία σε μια συγκεκριμένη διεργασία που πρέπει να εκτελεσθεί στο υπό κατασκευή εξάρτημα. Οι κανόνες διεκπεραίωσης μπορεί να περιλαμβάνουν ορισμούς, οι οποίοι μπορεί να εξαρτώνται από τον χρόνο. Ένας τέτοιος ορισμός είναι η Κρίσιμη Αναλογία (Critical Ratio—CR), η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου επεξεργασίας της υπεργασίας και του εναπομένουτος *slack time* στην εργασία. Μια άλλη μέθοδος κατηγοριοποίησης των κανόνων διεκπεραίωσης τους χωρίζει στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- κανόνες που περιλαμβάνουν χρόνους επεξεργασίας
- κανόνες που περιλαμβάνουν ημερομηνίες ολοκλήρωσης
- απλούς κανόνες οι οποίοι δεν περιλαμβάνουν χρόνους επεξεργασίας και ημερομηνίες ολοκλήρωσης
- κανόνες που περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερους από τις άλλες κατηγορίες [32].

Επειδή οι κανόνες διεκπεραίωσης είναι εμπειρικοί, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας, που να έχει βέλτιστη απόδοση σε όλες τις καταστάσεις. Οι παράγοντες, που επηρεάζουν την καταλληλότητα ενός κανόνα διεκπεραίωσης περιλαμβάνουν:

- Την κατανομή των χρόνων επεξεργασίας των υπεργασιών (tasks), που πρόκειται να διεκπεραιωθούν
- Την κατανομή των ημερομηνιών ολοκλήρωσης των εργασιών (jobs)
- Την κατανομή των αφίξεων των εργασιών στην διάρκεια του χρόνου
- Το κριτήριο επίδοσης (π.χ. ρυθμός παραγωγής, μέση καθυστέρηση κ.λ.π.), που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί
- Την φύση των τεχνολογικών προγραμμάτων των εργασιών (η παρουσία των διεργασιών συναρμολόγησης, ο αριθμός των υπεργασιών ανά εργασία, κ.λ.π.)

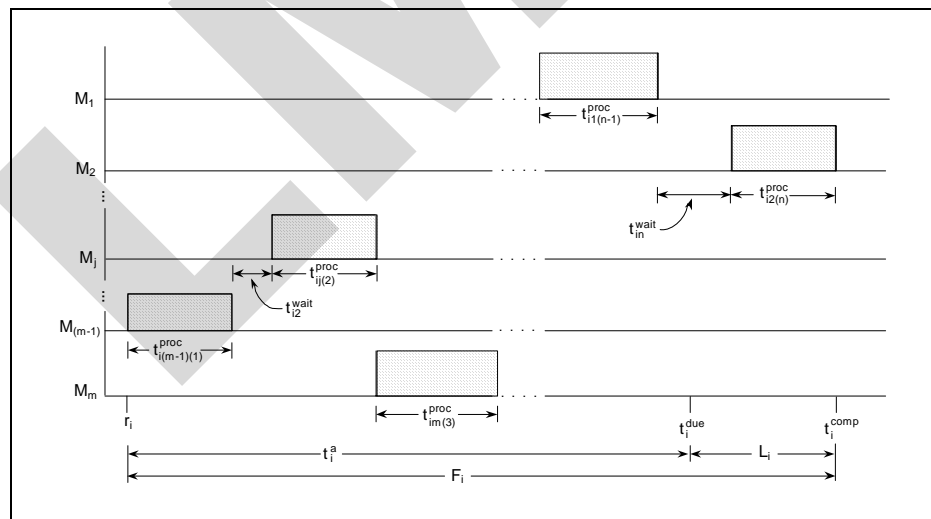
Έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα, έτσι ώστε να προσδιορισθεί ποιοι κανόνες διεκπεραίωσης αποδίδουν καλύτερα και σε ποιες καταστάσεις [33-38]. Ωστόσο, εξαιτίας του πλήθους των παραγόντων που εμπλέκονται, δεν έχει ακόμα δοθεί μια ολοκληρωμένη απάντηση στο ερώτημα αυτό. Τα πειράματα δοκιμής-λάθους, είτε στο πραγματικό σύστημα είτε σε ένα μοντέλο προσομοίωσης του πραγματικού συστήματος, είναι απαραίτητα, για να αποφασίσουμε ποιον κανόνα διεκπεραίωσης θα πρέπει να εφαρμόσουμε.

Οι κανόνες διεκπεραίωσης έχουν πολλούς περιορισμούς. Για παράδειγμα, περιγράφουν μόνο ποια υπεργασία θα ανατεθεί και όχι σε ποιόν πόρο θα έπρεπε ν' ανατεθεί η συγκεκριμένη υπεργασία. Επομένως, όταν γίνουν διαθέσιμοι πολλοί πόροι την ίδια χρονική στιγμή, πρέπει να διατεθούν κατά τυχαίο τρόπο στις υπεργασίες, που επιλέχθηκαν από τον κανόνα διεκπεραίωσης, ή πρέπει να εφαρμοσθεί ένας άλλος κανόνας για την επιλογή των πόρων. Επομένως, οι

κανόνες διεκπεραίωσης αντιμετωπίζουν σε δύο φάσεις το πρόβλημα: πρώτα λαμβάνοντας υπ' όψη όλους τους πόρους και στην συνέχεια τις υπερργασίες. Επίσης, οι κανόνες διεκπεραίωσης δεν λαμβάνουν υπ' όψη τις επιπτώσεις, που έχει μια συγκεκριμένη ανάθεση εργασιών, στην μελλοντική απόδοση του συστήματος (look ahead). Η εφαρμογή τους βασίζεται, κυρίως, στα πειράματα δοκιμής-λάθους. Τέλος, κάθε κανόνας διεκπεραίωσης είναι συνδεδεμένος με την βελτιστοποίηση ενός μόνο κριτηρίου. Αυτό είναι ένα σοβαρό μειονέκτημα, καθώς στα περισσότερα συστήματα παραγωγής πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη ταυτόχρονα πολλά κριτήρια. Ωστόσο, οι κανόνες διεκπεραίωσης είναι υπολογιστικά αποδοτικοί, καθώς παρέχουν μια γρήγορη λύση, η οποία είναι συχνά το ζητούμενο σε ένα σύστημα παραγωγής, που μεταβάλλεται με σταθερό τρόπο.

6.3.4 Διαγράμματα Gantt και Δείκτες Απόδοσης (Gantt Charts and Performance Measures)

Τα διαγράμματα Gantt είναι χρήσιμα εργαλεία για την παρουσίαση αποτελεσμάτων του χρονοπρογραμματισμού, ως προς την χρονική διάρκεια των διεργασιών και του χρονικού συσχετισμού τους. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, τόσο στην βιομηχανία όσο και στα πανεπιστήμια. Ένα διάγραμμα Gantt είναι απλώς μια ειδική μορφή ενός ραβδογράμματος (Σχ. 6.39 [2]) όπου ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά τον χρόνο και ο κάθετος άξονας αναπαριστά τους πόρους –οι οποίοι μπορεί να είναι, για παράδειγμα οι μηχανές ή το προσωπικό. Κάθε ράβδος αναπαριστά την χρονική διάρκεια μιας υπερργασίας (task).



Σχήμα 6.39 Διάγραμμα Gantt μιας Τυπικής εργασίας (Job) J_i με n υπερργασίες (tasks)

Το διάγραμμα Gantt είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό των δεικτών απόδοσης στα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού. Για τον σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

- J_i εργασία i .
- M_j μηχανή j .
- $t_{ij(k)}^{proc}$ χρόνος επεξεργασίας της υπεργασίας k^{th} , που ανήκει στην εργασία J_i , στην μηχανή M_j .
- r_i η χρονική στιγμή άφιξης της εργασίας J_i στο σύστημα (arrival time)
- t_i^{due} η ημερομηνία παράδοσης (due date), δηλαδή η ημερομηνία παράδοσης που έχουμε υποσχεθεί για την εργασία J_i . Η χρονική στιγμή, στην οποία θα ήταν επιθυμητή στην ιδανική περίπτωση η ολοκλήρωση της J_i .
- t_i^a Η διαθέσιμη περίοδος για επεξεργασία της J_i μεταξύ της ημερομηνίας άφιξης και της ημερομηνίας παράδοσης $t_i^a = t_i^{due} - r_i$
- t_{ik}^{wait} χρόνος αναμονής (wait time) της J_i μετά το τέλος της διεργασίας της $(k-1)^{th}$ και πριν την έναρξη της διεργασίας της k^{th} . Με την διεργασία k^{th} δεν εννοούμε αυτή, που πραγματοποιήθηκε στην μηχανή M_k (αν και μπορεί να είναι αυτή), αλλά την διεργασία που είναι η k^{th} στην σειρά επεξεργασίας.
- t_i^{wait} Συνολικός χρόνος αναμονής για την J_i . Ισχύει ότι $t_i^{wait} = \sum_{k=1}^m t_{ik}^{wait}$
- t_i^{comp} Ημερομηνία ολοκλήρωσης (completion time) της J_i . Ισχύει η σχέση: $t_i^{comp} = r_i + \sum_{k=1}^m (t_{ik}^{wait} + t_{ij(k)}^{proc})$
- F_i Χρόνος παραμονής (flow time) της εργασίας J_i στο σύστημα παραγωγής.
- L_i "lateness", εκφράζει την διαφορά μεταξύ της ημερομηνίας ολοκλήρωσης της J_i και της ημερομηνίας παράδοσής της: $L_i = t_i^{comp} - t_i^{due}$. Σημειώστε, ότι όταν μια εργασία τελειώσει πριν τον καθορισμένο χρόνο παράδοσης, η L_i είναι αρνητική. Συχνά, είναι περισσότερο χρήσιμο να έχουμε μια μεταβλητή η οποία, σε αντίθεση με το L_i , παίρνει μόνο μη μηδενικές τιμές, όταν μια εργασία έχει καθυστερήσει: π.χ., όταν ολοκληρωθεί μετά την ημερομηνία παράδοσης. Επίσης, ορίζουμε τον χρόνο καθυστέρησης των εργασιών στο σύστημα παραγωγής και τον χρόνο ταχύτερης ολοκλήρωσης μιας εργασίας.
- T_i Χρόνος καθυστέρησης της J_i : $T_i = \max \{L_i, 0\}$.

- E_j Χρόνος ταχύτερης ολοκλήρωσης της J_j : $E_i = \max \{-L_i, 0\}$.
- $N_w(t)$ Ο αριθμός των εργασιών σε αναμονή μεταξύ των μηχανών ή αυτών, που δεν είναι έτοιμες προς επεξεργασία, σε μια χρονική στιγμή t
- $N_p(t)$ Ο αριθμός των εργασιών, που είναι υπό επεξεργασία σε μια χρονική στιγμή t .
- $N_c(t)$ Ο αριθμός των εργασιών, που έχουν ολοκληρωθεί μέχρι την χρονική στιγμή t .
- $N_u(t)$ Ο αριθμός των εργασιών, που δεν έχουν ακόμα ολοκληρωθεί ως την χρονική στιγμή t

Ένας συνολικό διάγραμμα χρησιμοποιείται, για να δείξει μια μέση τιμή χρόνου των ποσοτήτων, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για παράδειγμα,

$$\text{Το } \bar{N}_u \text{ ορίζεται έτσι ώστε } \bar{N}_u = \frac{1}{t_{\max}^{\text{comp}}} \int_0^{t_{\max}^{\text{comp}}} N_u(t) dt .$$

Αναφορικά με το διάγραμμα Gantt του σχήματος 6.39, η σειρά επεξεργασίας, όπως προκύπτει από τους τεχνολογικούς περιορισμούς, είναι $(M_{m-1}, M_j, M_m, \dots, M_1, M_2)$. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι οι χρόνοι αναμονής, t_{i1}^{wait} και t_{i3}^{wait} , είναι μηδενικοί, ενώ οι χρόνοι, t_{i2}^{wait} και t_{in}^{wait} , είναι μη μηδενικοί. Για την εργασία αυτή, $T_i = L_i$ και $E_i = 0$, επειδή έχει ολοκληρωθεί μετά την ημερομηνία παράδοσης. Μερικοί από τους συνήθεις δείκτες απόδοσης, που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα προγραμματισμού, είναι:

Μέτρα Απόδοσης που βασίζονται στους χρόνους Ολοκλήρωσης

- F_{\max} Μέγιστος χρόνος παραμονής των εργασιών στο σύστημα παραγωγής (*Maximum flow time*). Η ελαχιστοποίηση αυτού του δείκτη απόδοσης έχει ως αποτέλεσμα την απευθείας συσχέτιση του κόστους του χρονοπρογράμματος με την μεγαλύτερη σε διάρκεια εργασία.
- t_{\max}^{comp} Μέγιστος χρόνος ολοκλήρωσης ή συνολικός χρόνος παραγωγής. Η ελαχιστοποίηση του δείκτη αυτού έχει ως αποτέλεσμα το κόστος του χρονοπρογράμματος να εξαρτάται από το χρονικό διάστημα, που το σύστημα είναι απασχολημένο με ολόκληρο το σύνολο των εργασιών. Τα t_{\max}^{comp} και F_{\max} είναι ίδια, όταν όλοι οι χρόνοι άφιξης των εργασιών είναι μηδενικοί.
- \bar{F} Μέσος χρόνος παραμονής των εργασιών στο σύστημα παραγωγής (*Mean Flow Time*). Η ελαχιστοποίηση του \bar{F} συνεπάγεται, ότι το κόστος του χρονοπρογράμματος είναι ανάλογο με τον μέσο χρόνο της επεξεργασίας μιας εργασίας.
- $\bar{t}_{\max}^{\text{comp}}$ Μέσος χρόνος ολοκλήρωσης (*Mean Completion Time*). Η ελαχιστοποίηση αυτού του δείκτη έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την ελαχι-

στοποίηση του \bar{F} .

Δείκτες Απόδοσης που Βασίζονται στις Ημερομηνίες Παράδοσης

- \bar{L} “*Mean Lateness*”, η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ της ημερομηνίας ολοκλήρωσης της J_i και της ημερομηνίας παράδοσής της. Η ελαχιστοποίηση του μέτρου αυτού είναι κατάλληλη, όταν η ολοκλήρωση μιας εργασίας νωρίτερα από την ημερομηνία παράδοσης έχει και κάποιο θετικό αποτέλεσμα και αυτό το αποτέλεσμα είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο νωρίτερα ολοκληρώνεται η εργασία.
- L_{\max} “*Maximum Lateness*”, η μέγιστη τιμή της διαφοράς μεταξύ της ημερομηνίας ολοκλήρωσης της J_i και της ημερομηνίας παράδοσής της. Η ελαχιστοποίηση του μέτρου αυτού έχει τα ίδια αποτελέσματα με την ελαχιστοποίηση του \bar{L} .
- \bar{T} *Μέση καθυστέρηση (Mean Tardiness)*. Η ελαχιστοποίηση του δείκτη αυτού είναι κατάλληλη, όταν οι εργασίες που ολοκληρώνονται νωρίς δεν αποφέρουν κέρδος και όταν υπάρχουν κυρώσεις για εργασίες που καθυστερούν
- n_T *Ο αριθμός των καθυστερημένων εργασιών (Number of Tardy Jobs)*. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κυρώσεις, που επιβάλλονται εξ αιτίας των καθυστερούμενων εργασιών, μπορεί να είναι ανεξάρτητες από το χρονικό διάστημα που έχει καθυστερήσει μια εργασία να ολοκληρωθεί. Αυτό σημαίνει, ότι το κόστος είναι το ίδιο, ανεξάρτητα από το πότε θα ολοκληρωθεί μια καθυστερημένη εργασία. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι κατάλληλη η ελαχιστοποίηση του δείκτη n_T .

Δείκτες Απόδοσης που βασίζονται στο Κόστος των Αποθεμάτων και Εκμετάλλευσης των Πόρων

- \bar{N}_w *Μέσος αριθμός εργασιών που αναμένουν για μηχανές (Mean number of jobs waiting for Machines)*. Η ελαχιστοποίηση του δείκτη αυτού σχετίζεται με το κόστος των ημι-κατεργασμένων ή ενδιάμεσων αποθεμάτων.
- \bar{N}_u *Μέσος αριθμός μη ολοκληρωμένων εργασιών (Mean number of unfinished jobs)*. Η ελαχιστοποίηση του δείκτη αυτού έχει τα ίδια αποτελέσματα με την ελαχιστοποίηση του \bar{N}_w .
- \bar{N}_c *Μέσος αριθμός ολοκληρωμένων εργασιών (Mean number of completed jobs)*. Η ελαχιστοποίηση του δείκτη αυτού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους αποθεμάτων των ολοκληρωμένων προϊόντων.
- \bar{N}_p *Μέσος αριθμός εργασιών υπό επεξεργασία σε κάθε χρονική στιγμή*

(*Mean number of jobs actually being processed at any time*). Η μεγιστοποίηση του δείκτη αυτού διασφαλίζει την πιο αποτελεσματική χρήση των μηχανών.

\bar{I} Μέσος ανενεργός χρόνος της μηχανής (*Mean machine idle time*). Η ελαχιστοποίηση του δείκτη αυτού συμβάλλει στην αποτελεσματική χρήση των μηχανών.

I_{\max} Μέγιστος ανενεργός χρόνος της μηχανής (*Maximum machine idle time*). Η ελαχιστοποίηση αυτού του δείκτη έχει τα ίδια αποτελέσματα με το \bar{I} .

6.4 Εφαρμογές

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν οι εφαρμογές των μεθόδων και των εργαλείων, που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 5 και 6 για την λειτουργία των συστημάτων παραγωγής. Σκοπός μας είναι να δείξουμε πώς μπορούν να εφαρμοστούν οι μέθοδοι και τα εργαλεία αυτά, χωρίς να γίνει προσπάθεια συγκριτικής επισκόπησης των διαθέσιμων εφαρμογών.

6.4.1 Μια Προσέγγιση Μαθηματικού Προγραμματισμού στο πρόβλημα της Κατανομής Πόρων.

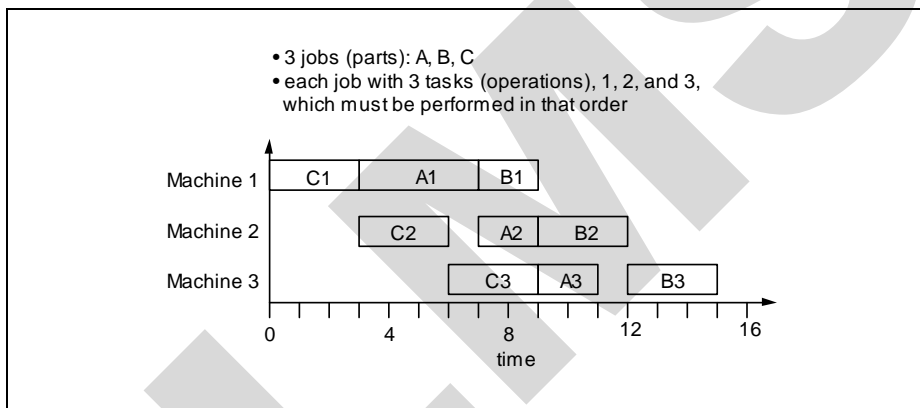
Για τα προβλήματα κατανομής των πόρων έχουν προταθεί διάφορες διατυπώσεις, με βάση τον μαθηματικό προγραμματισμό. Η αναγκαιότητα της χρήσης των αναλυτικών εκφράσεων, τόσο για την αντικειμενική συνάρτηση όσο και για τους περιορισμούς, προϋποθέτει, συνήθως, την ύπαρξη μερικών απλουστευτικών παραδοχών. Υποθέτουμε, ότι ένας απλός δείκτης απόδοσης πρόκειται να βελτιστοποιηθεί και ότι όλες οι πληροφορίες για τις εργασίες, που φθάνουν στο σύστημα, είναι γνωστές από πριν. Σε μια συγκεκριμένη διατύπωση [39], έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές.

1. Υπάρχουν m μηχανές, και n εργασίες που φθάνουν στην χρονική στιγμή 0.
2. Κάθε εργασία (job) αποτελείται από m υπεργασίες (tasks), με κάθε υπεργασία να υλοποιείται σε μια από τις m μηχανές. Επιπλέον, η σειρά με την οποία κάθε εργασία επισκέπτεται τις μηχανές είναι η ίδια και η σειρά με την οποία κάθε μηχανή επεξεργάζεται κάθε εργασία είναι, επίσης, η ίδια.
3. Δεν υπάρχουν εναλλακτικές δρομολογήσεις εργασιών.
4. Οι μηχανές δεν παθαίνουν ποτέ βλάβη.
5. Δεν υπάρχουν διπλές μηχανές.
6. Δεν υπάρχει τυχαιότητα. Ο αριθμός των εργασιών, ο αριθμός των μη-

χανών, οι χρόνοι επεξεργασίας, οι χρόνοι άφιξης των εργασιών κ.λ.π. είναι όλοι γνωστοί και σταθεροί.

7. Κάθε εργασία, εφ’ όσον εισαχθεί στο σύστημα παραγωγής, πρέπει να εκτελεσθεί μέχρι την ολοκλήρωσή της
8. Μια υπερεργασία, εφ’ όσον ξεκινήσει σε μια μηχανή, δεν πρέπει να διακοπεί.

Μια λύση του προβλήματος αυτού, προσδιορίζεται από μια αναδιάταξη των αριθμών $1, 2, \dots, n$, η οποία δίδει την σειρά, με την οποία υλοποιούνται οι εργασίες σε κάθε μια και σε όλες τις μηχανές. Ένα παράδειγμα, μιας εφικτής λύσης του προβλήματος κατανομής των πόρων για το σύστημα αυτό, φαίνεται στο Σχήμα 6.40. Σημειώστε, ότι και οι τρεις εργασίες A, B, C, επισκέπτονται τις μηχανές με την σειρά (Μηχανή 1, Μηχανή 2, Μηχανή 3). Επί πλέον και οι τρεις μηχανές εκτελούν τις εργασίες με την σειρά (Εργασία C, Εργασία A, Εργασία B). Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου, που απαιτείται για την ολοκλήρωση της επεξεργασίας όλων των n εργασιών ή, ισοδύναμα, η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της τελευταίας (n^{th}) εργασίας στην τελευταία μηχανή (m^{th}). Στο Σχήμα 6.40, αυτός ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι ίσος με 15.



3 jobs = Τρεις εργασίες
 each job with 3 tasks (operations), 1, 2, and 3, which must be performed in that order = κάθε εργασία έχει

3 υπερεργασίες, τις 1, 2 και 3, οι οποίες πρέπει να εκτελεσθούν με αυτήν την σειρά

Σχήμα 6.40 Ένα Παράδειγμα Επίλυσης για το Πρόβλημα Στατικής Αλληλουχίας σε ένα Permutation Job

Μια περιγραφή της διατύπωσης του μεικτού ακέραιου προγραμματισμού του προβλήματος αυτού απαιτεί την εισαγωγή ορισμένων συμβολισμών. Έστω ότι ο δείκτης i αναφέρεται στην εργασία J_i , ο δείκτης j στην μηχανή M_j , και ο δείκτης (k) , σε παρένθεση, αναφέρεται στην θέση k^{th} στην σειρά επεξεργασίας. Έστω $J_{(k)}$, ότι είναι η εργασία k^{th} στην σειρά επεξεργασίας. Ο διαχωρισμός μεταξύ της J_i και της $J_{(k)}$ είναι, ότι η J_i αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη εργασία

ανεξάρτητα από το που εμφανίζεται στην σειρά επεξεργασίας, ενώ η $J_{(k)}$ αναφέρεται σε όποια από τις εργασίες (J_1, J_2, \dots , ή J_n) και είναι στην θέση k^{th} της σειράς επεξεργασίας. Κάθε εργασία επισκέπτεται τις μηχανές με την σειρά (M_1, M_2, \dots, M_m). Ο χρόνος επεξεργασίας της J_i στην μηχανή M_j είναι ο $t_{i,j}^{proc}$.

Απαιτείται ένα σύνολο από n^2 μεταβλητές, υπό τον περιορισμό να λαμβάνουν τις τιμές 0 ή 1:

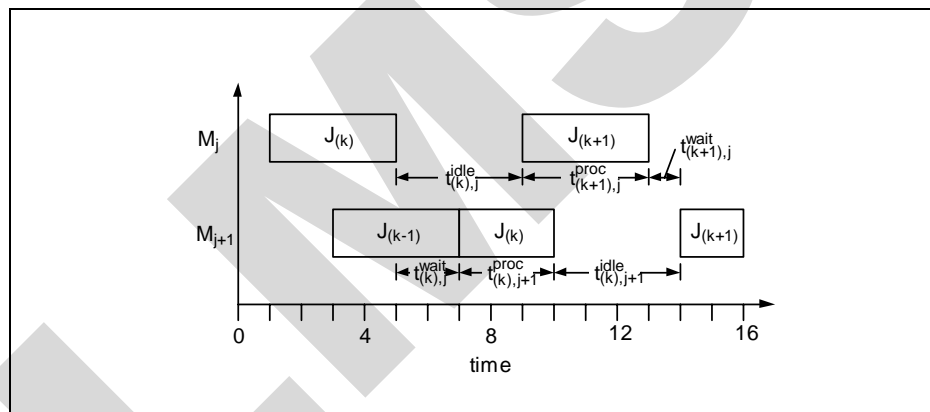
$$X_{i,(k)} = \begin{cases} 1, & \text{if } J_i = J_{(k)}; \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6-12)$$

Εφ' όσον μόνο μια εργασία πρέπει να προγραμματισθεί σε κάθε μια από τις θέσεις,

$$\sum_{i=1}^n X_{i,(k)} = 1 \text{ for } k=1,2,\dots,n. \quad (6-13)$$

Επιπλέον, κάθε εργασία πρέπει να προγραμματισθεί σε μια μόνο θέση:

$$\sum_{k=1}^n X_{i,(k)} = 1 \text{ for } i=1,2,\dots,n. \quad (6-14)$$



Σχήμα 6.41 Οι Μεταβλητές του Μεικτού Ακέραιου Προγράμματος

Για τον σχηματισμό της λύσης του προβλήματος (Σχ. 6.41) απαιτούνται άλλα δύο σύνολα μεταβλητών απόφασης. Οι μεταβλητές $t_{(k),j}^{idle}$ αντιπροσωπεύουν τον ανενεργό χρόνο της μηχανής M_j , μεταξύ του χρόνου ολοκλήρωσης της εργασίας $J_{(k)}$ και του χρόνου εκκίνησης της εργασίας $J_{(k+1)}$. Οι μεταβλητές $t_{(k),j}^{wait}$ αντιπροσωπεύουν τον χρόνο, που η εργασία $J_{(k)}$ πρέπει να αναμένει μεταξύ της ολοκλήρωσης της επεξεργασίας στην μηχανή M_j και της εκκίνησης της επεξεργασίας στην M_{j+1} . Είναι βολικό να προσδιορίσουμε ένα σύνολο προσωρι-

νών μεταβλητών $t_{(k),j}^{proc}$, που αντιπροσωπεύουν τον χρόνο επεξεργασίας της εργασίας $J_{(k)}$ στην μηχανή M_j . Από το Σχήμα 6.41, μπορούμε να δούμε, ότι μια εφικτή λύση ικανοποιεί τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$t_{(k),j}^{idle} + t_{(k),j}^{proc} + t_{(k),j}^{wait} = t_{(k),j}^{wait} + t_{(k),j}^{proc} + t_{(k),j}^{idle}$$

ή ισοδύναμα,

$$t_{(k),j}^{idle} + \sum_{i=1}^n X_{i,(k+1)} t_{i,j}^{proc} + t_{(k+1),j}^{wait} - t_{(k),j}^{wait} - \sum_{i=1}^n X_{i,(k)} t_{i,j+1}^{proc} - t_{(k),j+1}^{idle} = 0 \quad (6-15)$$

όπου οι προσωρινές μεταβλητές $t_{(k+1),j}^{proc}$ και $t_{(k),j+1}^{proc}$ έχουν αντικατασταθεί με τις εκφράσεις, που περιλαμβάνουν μόνο τις μεταβλητές απόφασης $X_{i,(k+1)}$ και $X_{i,(k)}$ και τις γνωστές σταθερές, που είναι οι χρόνοι επεξεργασίας $t_{i,j}^{proc}$ και $t_{i,j+1}^{proc}$.

Οι περιορισμοί (6-13), (6-14) και (6-15) που αναφέρονται πιο πάνω μαζί με τον περιορισμό ότι τα $X_{i,(k)}$ είναι μη αρνητικοί ακέραιοι (Εξ. 6-12) και ότι οι $t_{(k),j}^{wait}$ και $t_{(k),j}^{idle}$ είναι μη αρνητικοί πραγματικοί αριθμοί, σχηματίζουν ολόκληρο το σύνολο των περιορισμών.

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να καθορισθεί ως εξής. Η ελαχιστοποίηση του μέγιστου χρόνου ολοκλήρωσης (completion time) ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της τελευταίας (n^{th}) εργασίας, η οποία με την σειρά της ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση του ανενεργού χρόνου της τελευταίας (m^{th}) μηχανής. Ο συνολικός ανενεργός χρόνος στην M_m δίδεται από το άθροισμα των ανενεργών χρόνων των ενδιάμεσων εργασιών $t_{(k),m}^{idle}$ συν τον ανενεργό χρόνο, που παρατηρείται, πριν ξεκινήσει η επεξεργασία της εργασίας $J_{(l)}$ στην μηχανή M_m . Επομένως, θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε την

$$\sum_{k=1}^{n-1} t_{(k),m}^{idle} + \sum_{j=1}^{m-1} t_{(l),j}^{proc}$$

Εκφράζοντας τις προσωρινές μεταβλητές $t_{(l),j}^{proc}$ ως προς τις μεταβλητές απόφασης και τις γνωστές σταθερές, η συνάρτηση μπορεί να γραφεί ως:

$$\sum_{k=1}^{n-1} t_{(k),m}^{idle} + \sum_{j=1}^{m-1} \left(\sum_{i=1}^n X_{i,(l)} t_{i,j}^{proc} \right)$$

Με τον τρόπο αυτό, ολοκληρώνεται ο σχηματισμός του μεικτού ακέραιου προγράμματος.

Στο σημείο αυτό, ας συνοψίσουμε ορισμένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της προσέγγισης μέσω μαθηματικού προγραμματισμού του προβλήματος του προγραμματισμού/κατανομής των πόρων (dispatching). Η μετατροπή ενός προβλήματος κατανομής πόρων σε μαθηματικό πρόγραμμα είναι μόνο ένα μέρος της συνολικής διαδικασίας επίλυσης. Εφ' όσον δημιουργηθεί

το μαθηματικό πρόγραμμα, πρέπει να διερευνηθεί ο χώρος των επιτρεπόμενων συνδυασμών των μεταβλητών απόφασης (αυτών των συνδυασμών, που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς), έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός μέσω μεθόδων αναζήτησης όπως για παράδειγμα, η μέθοδος *branch and bound*, που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 5. Γενικότερα, τέτοιες μέθοδοι απαιτούν πολλούς υπολογισμούς, επειδή βασίζονται μόνο σε γενικές ιδιότητες των μαθηματικών προγραμμάτων και δεν λαμβάνουν υπ' όψη τους συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των προβλημάτων, τα οποία πρέπει να επιλυθούν. Στην πράξη μπορούν να επιλυθούν μόνο μικρού μεγέθους προβλήματα. Επομένως, οι μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού έχουν εφαρμοσθεί μόνο σε προβλήματα ερευνητικού ενδιαφέροντος, όπου ο χρόνος απόκρισης δεν είναι κρίσιμος παράγοντας.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό, που πρέπει να παρατηρήσουμε για τον μαθηματικό προγραμματισμό, είναι, ότι απαιτεί πολύ αυστηρές παραδοχές ως προς την φύση του τεχνολογικού προγραμματισμού των εργασιών (κομματιών) που πρόκειται να προγραμματισθούν, την δομή του συστήματος παραγωγής και τους δείκτες απόδοσης που θα βελτιστοποιηθούν. Μια αλλαγή σε οποιοδήποτε από αυτά τα στοιχεία απαιτεί τον σχηματισμό ενός διαφορετικού μαθηματικού προγράμματος, κάτι που είναι αρκετά δύσκολο έως αδύνατο να εφαρμοσθεί για τις πιο γενικές περιπτώσεις προγραμματισμού (κατανομής των πόρων).

6.4.2 Μια Προσέγγιση Δυναμικού Προγραμματισμού για τα Προβλήματα Προγραμματισμού (Κατανομής Πόρων - Dispatching)

Οι μέθοδοι δυναμικού προγραμματισμού, όπως και ισοδύναμα ο μαθηματικός προγραμματισμός, για τα προβλήματα προγραμματισμού (κατανομής των πόρων) απαιτούν αυστηρές παραδοχές, που επιτρέπουν μόνο τον χειρισμό προβλημάτων τα οποία έχουν οριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Ένα παράδειγμα προβλήματος προγραμματισμού, που μπορεί να διατυπωθεί ως δυναμικό πρόγραμμα, είναι το πρόβλημα «*n* εργασίες, μια μηχανή», όπου σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του μέσου χρόνου καθυστέρησης (mean tardiness) \bar{T} , των εργασιών. Ως χρόνο καθυστέρησης, ορίζουμε το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η ημερομηνία ολοκλήρωσης μιας εργασίας υπερβαίνει την ημερομηνία παράδοσης. Εφ' όσον υπάρχει μόνο μια μηχανή, μια λύση του προβλήματος είναι μια ακολουθία της μορφής $(J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(n)})$. Υποθέτουμε, ότι όλες οι εργασίες φθάνουν στο σύστημα την χρονική στιγμή $t = 0$.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη μια παρατήρηση. Έστω ότι, J_i είναι μια συγκεκριμένη εργασία i και $J_{(k)}$ είναι η εργασία k^{th} στην ακολουθία, που εκφράζει την λύση. Η μεταβλητή, t_i^{comp} αντιπροσωπεύει τον χρόνο ολοκλήρωσης της J_i , t_i^{proc} είναι ο χρόνος επεξεργασίας της J_i και t_i^{due} είναι η ημερομηνία παράδοσης της J_i . Παρόμοια, η μεταβλητή t_k^{comp} αντιπροσωπεύει τον χρόνο

περάτωσης της $J_{(k)}$, $t_{(k)}^{proc}$ είναι ο χρόνος επεξεργασίας της $J_{(k)}$ και $t_{(k)}^{due}$ είναι η ημερομηνία παράδοσης της $J_{(k)}$. Το σύνολο $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ αναφέρεται μόνο στο σύνολο των εργασιών, που περιέχονται μέσα στις αγκύλες χωρίς συγκεκριμένη σειρά επεξεργασίας, ενώ η (J_1, J_2, \dots, J_n) είναι μια ακολουθία κατά την οποία οι εργασίες επεξεργάζονται με την σειρά που φαίνεται. Εάν Q είναι οποιοδήποτε σύνολο εργασιών, που περιέχουν την J_i τότε $Q - \{J_i\}$ είναι το σύνολο Q , στο οποίο έχει αφαιρεθεί η J_i . Τέλος, ορίζουμε ως t_Q^{comp} το άθροισμα των χρόνων επεξεργασίας όλων των εργασιών, που περιέχονται στο Q :

$$t_Q^{comp} = \sum_{J_i \in Q} t_i^{proc}$$

Εάν Q είναι το σύνολο των εργασιών, που θα χρονοπρογραμματισθεί, τότε το t_Q^{comp} είναι, επίσης, ίσο με τον χρόνο περάτωσης της τελευταίας εργασίας στην ακολουθία, που εκφράζει την λύση –εφ’ όσον υπάρχει μόνο μια μηχανή.

Η διατύπωση του δυναμικού προγράμματος για το συγκεκριμένο πρόβλημα [40] βασίζεται στην παρατήρηση, ότι σε ένα βέλτιστο χρονοπρόγραμμα οι πρώτες K εργασίες (για $K = 1, 2, \dots, n$) πρέπει να σχηματίζουν ένα βέλτιστο πρόγραμμα για το πρόβλημα, που βασίζεται μόνο σε αυτές τις K εργασίες. Ας εξετάσουμε, γιατί ισχύει αυτό. Κατ’ αρχήν παρατηρούμε, ότι η ελαχιστοποίηση του μέσου χρόνου καθυστέρησης, \bar{T} , είναι ισοδύναμη με την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου καθυστέρησης (total tardiness), $n\bar{T}$. Ας υποθέσουμε τώρα ότι $(J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(n)})$ είναι η βέλτιστη λύση για το πλήρες πρόβλημα. Παρατηρούμε ότι το $n\bar{T}$ μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} n\bar{T} &= \sum_{k=1}^K \max(t_{(k)}^{comp} - t_{(k)}^{due}, 0) + \sum_{k=K+1}^n \max(t_{(k)}^{comp} - t_{(k)}^{due}, 0) \\ &= \quad \quad \quad A \quad \quad \quad + \quad \quad \quad B \end{aligned} \quad (6-16)$$

Ο όρος A αντιπροσωπεύει την συμμετοχή των πρώτων K εργασιών της λύσης $\{J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(K)}\}$ στον συνολικό χρόνο καθυστέρησης. Ο όρος B αντιπροσωπεύει την συμμετοχή των $(n-K)$ εργασιών $\{J_{(K+1)}, J_{(K+2)}, \dots, J_{(n)}\}$, που απομένουν, στον συνολικό χρόνο καθυστέρησης. Τώρα, ας θεωρήσουμε το μειωμένο πρόβλημα, που περιλαμβάνει μόνο τις K εργασίες $\{J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(K)}\}$. Ο όρος A είναι ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης για αυτό το πρόβλημα. Εάν $(J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(K)})$ δεν είναι η βέλτιστη λύση σε αυτό το πρόβλημα, τότε υπάρχει άλλη μια ακολουθία των K εργασιών, που δίδει έναν μικρότερο συνολικό χρόνο καθυστέρησης. Ωστόσο, αυτό θα σήμαινε, ότι για το αρχικό πρόβλημα, θα μπορούσαμε να σχηματίσουμε μια λύση χρησιμοποιώντας την βελτιωμένη ακολουθία για τις πρώτες K εργασίες και την πραγματική ακολουθία για τις εναπομένουσες $n-K$ εργασίες. Η νέα λύση θα είχε έναν μικρότερο όρο A και τον ίδιο όρο B με την αρχική λύση. Αυτό θα διέψευθε την αρχική μας υπόθεση, ότι η αρχική λύση είναι η βέλτιστη.

Τώρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την πιο πάνω παρατήρηση, για να προσδιορίσουμε μια βέλτιστη λύση για το υπό εξέταση πρόβλημα. Ορίζουμε ως $T_{opt}(Q)$ τον ελάχιστο συνολικό χρόνο καθυστέρησης (minimum total tardiness), που επιτεύχθηκε μέσω της βέλτιστης διάταξης των εργασιών στο σύνολο Q . Εάν το Q περιέχει μια απλή εργασία, έστω την $Q = \{J_i\}$, τότε

$$T_{opt}(Q) = \max(t_i^{proc} - t_i^{due}, 0), \quad (6-17)$$

διότι υπάρχει μόνο ένας τρόπος δρομολόγησης μιας εργασίας και αυτή η εργασία πρέπει να ολοκληρωθεί σε $t_i^{comp} = t_i^{proc}$. Εάν το Q περιέχει $K > 1$ εργασίες, τότε υπολογίζουμε τον $T_{opt}(Q)$ θεωρώντας, ότι η τελευταία εργασία πρέπει να ολοκληρωθεί σε χρόνο t_Q^{comp} και ότι σε κάθε βέλτιστη λύση οι $K-1$ πρώτες εργασίες διατάσσονται βέλτιστα για το μειωμένο πρόβλημα, το οποίο περιλαμβάνει μόνο αυτές τις εργασίες. Επομένως, έχουμε

$$T_{opt}(Q) = \min_{J_i \in Q} \{T_{opt}(Q - \{J_i\}) + \max(t_Q^{comp} - t_i^{due}, 0)\} \quad (6-18)$$

Με άλλα λόγια, για να προσδιορίσουμε την διάταξη των εργασιών, στο σύνολο Q , που θα ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο καθυστέρησης, τοποθετούμε κάθε εργασία με την σειρά στην τελευταία θέση της διάταξης. Επιλέγουμε την περίπτωση με τον μικρότερο συνολικό χρόνο καθυστέρησης.

Η Εξίσωση (6-17) ορίζει τον ελάχιστο συνολικό χρόνο καθυστέρησης, $T_{opt}(Q)$, για όλα τα Q , που περιέχουν μια απλή εργασία. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και την εξίσωση (6-18), έχουμε την δυνατότητα να υπολογίσουμε τους χρόνους, $T_{opt}(Q)$, για όλα τα Q , που περιέχουν δύο εργασίες. Διαδοχικές εφαρμογές της εξίσωσης (6-18) οδηγούν σε $T_{opt}(Q)$ για όλα τα Q , που περιέχουν τρεις εργασίες, τέσσερις εργασίες κ.λ.π. Στο τέλος, προσδιορίζουμε τον $T_{opt}(\{J_1, J_2, \dots, J_n\})$. Για να το επιτύχουμε αυτό, βρίσκουμε την βέλτιστη διάταξη. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο παράδειγμα, που ακολουθεί.

Το πρόβλημα του παραδείγματος αποτελείται από τέσσερις εργασίες. Οι χρόνοι επεξεργασίας τους και οι ημερομηνίες παράδοσης είναι οι ακόλουθοι.

J_i	J_1	J_2	J_3	J_4
t_i^{proc}	8	6	10	7
t_i^{due}	14	9	16	16

Πρώτα υπολογίζεται ο χρόνος $T_{opt}(Q)$ για τα τέσσερα σύνολα μιας εργασίας. Για παράδειγμα, μέσω της εξίσωσης (6-17), έχουμε

$$\begin{aligned} T_{opt}(\{J_1\}) &= \max \{t_1^{proc} - t_1^{due}, 0\} \\ &= \max \{8 - 14, 0\} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Παρόμοιοι υπολογισμοί οδηγούν στα αποτελέσματα του Πίνακα 6.14.

Q	$\{J_1\}$	$\{J_2\}$	$\{J_3\}$	$\{J_4\}$
$t_i^{proc} - t_i^{due}$	-6	-3	-6	-9
$T_{opt}(Q)$	0	0	0	0

Πίνακας 6.14 $T_{opt}(Q)$ για τα σύνολα με μια εργασία

Στην συνέχεια εφαρμόζουμε την Εξίσωση (6-18), για να υπολογίσουμε τον χρόνο, $T_{opt}(Q)$, για τα έξι σύνολα που περιέχουν δύο εργασίες. Για παράδειγμα, εάν $Q = \{J_1, J_2\}$ και $t_Q^{comp} = t_1^{proc} + t_2^{proc} = 14$ και

$$\begin{aligned}
 T_{opt}(Q) &= \min \{ T_{opt}(Q - \{J_1\}) + \max \{ t_Q^{comp} - t_1^{due}, 0 \}, \\
 &\quad T_{opt}(Q - \{J_2\}) + \max \{ t_Q^{comp} - t_2^{due}, 0 \} \} \\
 &= \min \{ T_{opt}(\{J_1\}) + \max \{ 14 - 14, 0 \}, \\
 &\quad T_{opt}(\{J_2\}) + \max \{ 14 - 9, 0 \} \} \\
 &= \min \{ 0 + 0, 0 + 5 \} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς που απομένουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.15:

Q	$\{J_1, J_2\}$	$\{J_1, J_3\}$	$\{J_1, J_4\}$	$\{J_2, J_3\}$	$\{J_2, J_4\}$	$\{J_3, J_4\}$
t_Q^{comp}	14	18	15	16	13	17
«τελευταία» εργασία J_i	J_1 J_2	J_1 J_3	J_1 J_4	J_2 J_3	J_2 J_4	J_3 J_4
$T_{opt}(Q - \{J_i\}) + \max(t_Q^{comp} - t_i^{due}, 0)$	0 5	4 2	1 0	7 0	4 0	4 4
minimum	*	*	*	*	*	*
$T_{opt}(Q)$	0	2	0	0	0	4

Πίνακας 6.15 $T_{opt}(Q)$ για τα σύνολα που έχουν δύο εργασίες

Για κάθε σύνολο Q υπάρχουν δύο πιθανότητες για την τελευταία εργασία στην ακολουθία. Για κάθε μια από αυτές τις πιθανότητες, ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης $T_{opt}(Q - \{J_i\}) + \max(t_Q^{comp} - t_i^{due}, 0)$, που προκύπτει, παρουσιάζεται σε μια ξεχωριστή στήλη. Ο ελάχιστος συνολικός χρόνος καθυστέρησης από

την ημερομηνία παράδοσης για κάθε Q , $T_{opt}(Q)$ σημειώνεται με έναν αστερίσκο.

Συνεχίζοντας κατά τον ίδιο τρόπο, μπορεί να υπολογισθεί ο χρόνος $T_{opt}(Q)$ και για τα τέσσερα σύνολα Q , που περιέχουν τρεις εργασίες. Για παράδειγμα, εάν $Q = \{J_1, J_2, J_3\}$ και $t_Q^{comp} = t_1^{proc} + t_2^{proc} + t_3^{proc} = 24$ και

$$\begin{aligned}
 T_{opt}(Q) &= \min \left\{ T_{opt}(Q - \{J_1\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_1^{due}, 0\}, \right. \\
 &\quad T_{opt}(Q - \{J_2\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_2^{due}, 0\}, \\
 &\quad \left. T_{opt}(Q - \{J_3\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_3^{due}, 0\} \right\} \\
 &= \min \left\{ T_{opt}(\{J_2, J_3\}) + \max \{24 - 14, 0\}, \right. \\
 &\quad T_{opt}(\{J_1, J_3\}) + \max \{24 - 9, 0\}, \\
 &\quad \left. T_{opt}(\{J_1, J_2\}) + \max \{14 - 16, 0\} \right\} \\
 &= \min \{0 + 10, 2 + 15, 0 + 8\} \\
 &= 8
 \end{aligned}$$

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του δυναμικού προγραμματισμού είναι η ανάλυση του συνολικού προβλήματος σε μικρότερα υποπροβλήματα, στα οποία η λύση του ενός προκύπτει από αυτήν του προηγούμενου. Στους πιο πάνω υπολογισμούς βλέπουμε, ότι η λύση για τα σύνολα των τριών εργασιών προέρχεται από τις τιμές, οι οποίες προέκυψαν κατά την διάρκεια επίλυσης των συνόλων των δύο εργασιών: $T_{opt}(\{J_2, J_3\})$, $T_{opt}(\{J_1, J_3\})$ και $T_{opt}(\{J_1, J_2\})$. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών, που απομένουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.16:

Τέλος, μπορεί να υπολογισθεί ο $T_{opt}(Q)$, για το σύνολο Q , που περιέχει και τις τέσσερις εργασίες. Εδώ ισχύει ότι, $t_Q^{comp} = t_1^{proc} + t_2^{proc} + t_3^{proc} + t_4^{proc} = 31$ και

$$\begin{aligned}
 T_{opt}(Q) &= \min \left\{ T_{opt}(Q - \{J_1\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_1^{due}, 0\}, \right. \\
 &\quad T_{opt}(Q - \{J_2\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_2^{due}, 0\}, \\
 &\quad T_{opt}(Q - \{J_3\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_3^{due}, 0\}, \\
 &\quad \left. T_{opt}(Q - \{J_4\}) + \max \{t_Q^{comp} - t_4^{due}, 0\} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \min \{ T_{opt}(\{J_2, J_3, J_4\}) + \max\{31 - 14, 0\}, \\
 &\quad T_{opt}(\{J_1, J_3, J_4\}) + \max\{31 - 9, 0\}, \\
 &\quad T_{opt}(\{J_1, J_2, J_4\}) + \max\{31 - 16, 0\}, \\
 &\quad T_{opt}(\{J_1, J_2, J_3\}) + \max\{31 - 16, 0\} \} \\
 &= \min \{ 7 + 17, 9 + 22, 5 + 15, 8 + 15 \} \\
 &= 20
 \end{aligned}$$

Q	$\{J_1, J_2, J_3\}$	$\{J_1, J_2, J_4\}$	$\{J_1, J_3, J_4\}$	$\{J_2, J_3, J_4\}$
t_Q^{comp}	14	18	15	16
«τελευταία» εργασία J_i	$J_1 \ J_2 \ J_3$	$J_1 \ J_2 \ J_4$	$J_1 \ J_3 \ J_4$	$J_2 \ J_3 \ J_4$
$T_{opt}(Q - \{J_i\}) + \max(t_Q^{comp} - t_i^{due}, 0)$	10 17 8	7 12 5	12 9 11	15 7 7
minimum	*	*	*	*
$T_{opt}(Q)$	8	5	9	7

Πίνακας 6.16 $T_{opt}(Q)$ για τα σύνολα που περιέχουν τρεις εργασίες

Αυτός ο υπολογισμός παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.17:

Q	$\{J_1, J_2, J_3, J_4\}$			
t_Q^{comp}	31			
«τελευταία» εργασία J_i	J_1	J_2	J_3	J_4
$T_{opt}(Q - \{J_i\}) + \max(t_Q^{comp} - t_i^{due}, 0)$	24	31	20	23
minimum	*			
$T_{opt}(Q)$	20			

Πίνακας 6.17 $T_{opt}(Q)$ για τα σύνολα που περιέχουν τέσσερις εργασίες

Έχοντας λύσει αρκετά υποπροβλήματα, καταλήξαμε στο συμπέρασμα, ότι η βέλτιστη λύση οδηγεί σε συνολικό χρόνο καθυστέρησης 20 ή σε μέσο χρόνο καθυστέρησης 5. Ο αστερίσκος στον Πίνακα 6.17 δείχνει, ότι ο ελάχιστος μέσος χρόνος καθυστέρησης προκύπτει όταν το J_3 είναι στην τελευταία θέση. Αυτό σημαίνει, ότι το $\{J_1, J_2, J_4\}$ καταλαμβάνουν τις τρεις πρώτες θέσεις, με κάποια σειρά. Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.16, βλέπουμε, ότι από αυτές τις τρεις εναπομένουσες εργασίες, η J_4 θα πρέπει να είναι τελευταία. Οπότε μένουν οι $\{J_1, J_2\}$ για τις δύο πρώτες θέσεις. Από τον Πίνακα 6.15, παρατηρού-

με, ότι η J_1 θα πρέπει να είναι η τελευταία από αυτές τις δύο εργασίες, οπότε απομένει η J_2 , ως η πρώτη εργασία για να εκτελεσθεί. Συνεπώς, η βέλτιστη σειρά επεξεργασίας είναι (J_2, J_1, J_4, J_3) .

Για την μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού αξίζει να τονίσουμε ορισμένα σημεία. Η αντικειμενική συνάρτηση, που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, πρέπει να αναλυθεί όπως η εξίσωση (6-16), η οποία επαναλαμβάνεται ακολούθως για αναφορά:

$$\begin{aligned} n\bar{T} &= \sum_{k=1}^K \max(t_{(k)}^{comp} - t_{(k)}^{due}, 0) + \sum_{k=K+1}^n \max(t_{(k)}^{comp} - t_{(k)}^{due}, 0) \\ &= \quad \quad \quad \text{A} \quad \quad \quad + \quad \quad \quad \text{B} \end{aligned} \quad (6-19)$$

Ειδικότερα, πρέπει να είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση του όρου A, ανεξάρτητα από τον όρο B. Στο παράδειγμά μας, η συνθήκη αυτή ικανοποιήθηκε, επειδή ο όρος A είναι αποκλειστικά συνάρτηση της ακολουθίας $(J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(K)})$, ενώ ο όρος B είναι συνάρτηση της ακολουθίας $(J_{(K+1)}, J_{(K+2)}, \dots, J_{(n)})$ και του αθροίσματος των χρόνων επεξεργασίας στο σύνολο $\{J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(K)}\}$. Επομένως, το $\{J_{(1)}, J_{(2)}, \dots, J_{(K)}\}$ μπορεί να αναδιαταχθεί, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο όρος A, χωρίς να επηρεασθεί η τιμή του όρου B. Η μέθοδος δυναμικού προγραμματισμού δεν μπορεί να εφαρμοσθεί, εάν δεν ικανοποιείται αυτό το κριτήριο ανεξαρτησίας.

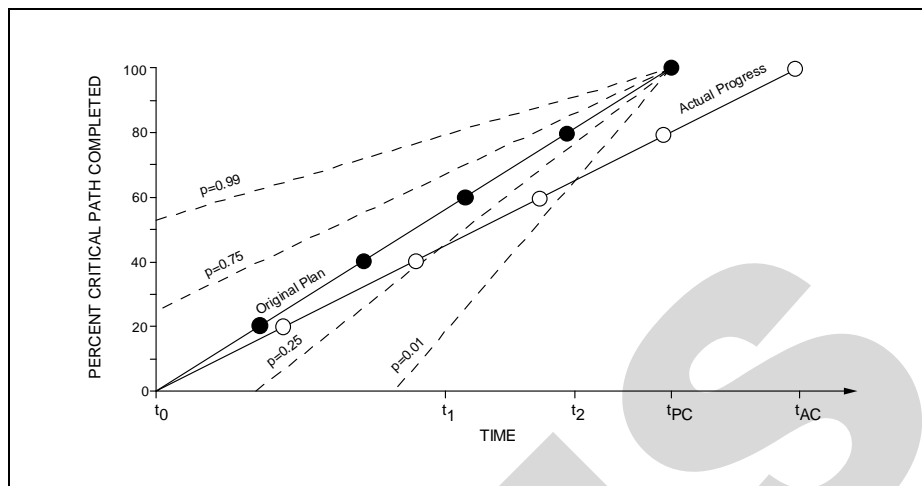
Παρατηρούμε, επίσης, ότι η λύση κάθε υποπροβλήματος παρέχει πολλές πιθανές επί μέρους λύσεις. Η επιλογή της σωστής επί μέρους λύσης εξαρτάται από την λύση των υποπροβλημάτων που ακολουθούν, έτσι ώστε μόνο μετά την επίλυση και του τελευταίου υποπροβλήματος να μπορεί να προσδιορισθεί οποιοδήποτε μέρος της συνολικής λύσης. Στο σημείο αυτό, είναι γεγονός, ότι έχει καθορισθεί πλήρως η συνολική λύση.

6.4.3 Εφαρμογή της Ανάλυσης Δικτύων για Διαγράμματα Προόδου (An Application of Network Analysis for Progress Plots)

Τα Διαγράμματα προόδου (*progress plots*) είναι μια εφαρμογή των τυπικών δικτύων PERT, η οποία παρέχει μια ξεκάθαρη, απλή και ορατή σύγκριση της τρέχουσας προόδου έναντι της προσδοκώμενης προόδου για τον έλεγχο ενός μεγάλου έργου, π.χ. την κατασκευή ενός εργοστασίου. Επί πλέον ένα διάγραμμα προόδου παρέχει τον διαχωρισμό μεταξύ των επιτρεπόμενων αποδεκτών αποκλίσεων από τον σχεδιασμό και των εξελίξεων, που απαιτούν διορθωτικές ενέργειες. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για την σύγκριση διαφορετικών έργων με βάση την ακρίβεια του σχεδιασμού. Εφ' όσον ένα έργο βρίσκεται σε εξέλιξη, η πιθανότητα να ολοκληρωθεί στον προκαθορισμένο χρόνο δεν είναι εύκολα αναγνώσιμη από τα παραδοσιακά διαγράμματα PERT ή Gantt. Η μέθοδος των διαγραμμάτων προόδου, ωστόσο, παρέχει την δυνατότητα αναγνώρισης αυτών των πιθανοτήτων με μεγάλη ευκολία.

Το Σχήμα 6.42 [41] δείχνει ένα διάγραμμα προόδου για ένα ολοκληρωμέ-

νο έργο. Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά τον χρόνο. Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την πρόοδο του έργου ως ποσοστό της κρίσιμης διαδρομής (Critical Path, CP). Ο αρχικός σχεδιασμός για το έργο ξεκινά την χρονική στιγμή t_0 και ολοκληρώνεται στον προγραμματισμένο χρόνο περάτωσης t_{PC} . Ο χρόνος t_{PC} είναι ίσος με την κρίσιμη διαδρομή από ένα δίκτυο εργασιών/γεγονότων, όπως είναι το διάγραμμα PERT.



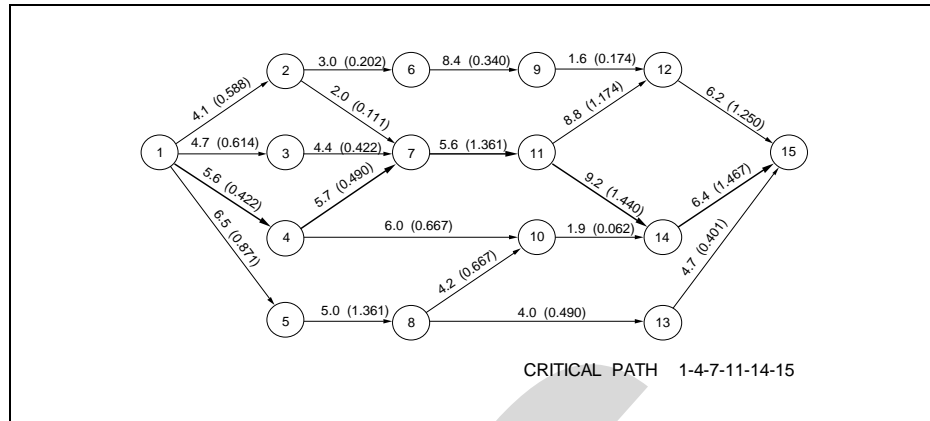
Σχήμα 6.42 Διάγραμμα Προόδου

Στην περίπτωση, που το έργο εξελισσόταν όπως ακριβώς είχε προγραμματισθεί, η πραγματική γραμμή προόδου θα βρισκόταν πάνω στην αρχική γραμμή, φθάνοντας στο 100% της ολοκλήρωσης σε χρόνο t_{PC} . Αντ' αυτού, όμως, το έργο ολοκληρώθηκε σε πραγματικό χρόνο t_{AC} . Οι σκιασμένοι κύκλοι είναι προγραμματισμένα γεγονότα κρίσιμης διαδρομής (CP). Οι μη σκιασμένοι κύκλοι αντιστοιχούν στα πραγματικά γεγονότα. Οι συμπαγείς γραμμές, που συνδέουν αυτούς τους κύκλους αποκαλύπτουν μια συνεχώς αυξανόμενη απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της προγραμματισμένης προόδου.

Οι γραμμές ελέγχου του σχήματος 6.42 [41] προειδοποιούσαν για μια μάλλον καθυστερημένη ολοκλήρωση εργασίας, η οποία έγινε στις αρχές του έργου. Την χρονική στιγμή t_1 , η πιθανότητα ολοκλήρωσης στον προγραμματισμένο χρόνο t_{PC} ήταν 0,25 και φθίνουσα (π.χ. η πραγματική γραμμή προόδου, που τέμνει την γραμμή $p = 0,25$ στο t_1). Έως την χρονική στιγμή t_2 το έργο είχε πιθανότητα 0,01 να ολοκληρωθεί εγκαίρως.

Ας σημειωθεί, ότι όλα τα τμήματα της γραμμής της πραγματικής προόδου έχουν μικρότερη κλίση από την γραμμή του αρχικού σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει, ότι όλοι οι χρόνοι των εργασιών είχαν υποτιμηθεί συστηματικά ή χρησιμοποιούνταν μη επαρκείς πόροι. Η ομαλότητα της γραμμής προόδου, ωστόσο, δείχνει, ότι η πρόοδος ήταν σχετικά συνεχής και η αναμενόμενη κρίσιμη διαδρομή ήταν στην πραγματικότητα η πραγματική κρίσιμη διαδρομή.

Στο Σχήμα 6.43 [41] παρουσιάζεται ένα δίκτυο PERT, υψηλού επιπέδου, για ένα έργο ανάπτυξης νέου προϊόντος. Οι αριθμημένοι κύκλοι είναι γεγονότα και τα τόξα είναι διεργασίες, οι οποίες οδηγούν από γεγονός σε γεγονός.



Σχήμα 6.43 Το Δίκτυο PERT Δραστηριοτήτων/Γεγονότων για τους υπολογισμούς του παραδείγματος

Το Σχήμα 6.43 επίσης δίδεται μια εκτίμηση του χρόνου ολοκλήρωσης και της διασποράς για κάθε διεργασία σε εβδομάδες –οι διασπορές είναι μέσα στις παρενθέσεις. Αυτές προέρχονται από τις τυπικές μεθόδους PERT: εάν $t_{i,j}$ είναι ο χρόνος της εργασίας, που χρειάζεται για να πάει από το γεγονός i στο γεγονός j , τότε ο προβλεπόμενος χρόνος εργασίας, $E(t_{i,j})$ και η εκτιμώμενη διασπορά της πιθανότητας κατανομής του χρόνου των εργασιών, $\sigma_{i,j}^2$, δίδονται από τις εξισώσεις (6-20) και (6-21):

$$E(t_{i,j}) = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (6-20)$$

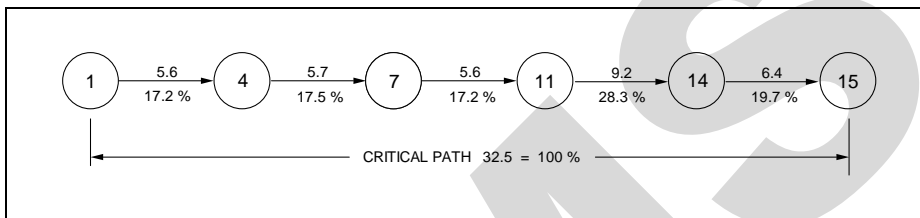
και

$$\sigma_{i,j}^2 = \left(\frac{b-a}{6} \right)^2 \quad (6-21)$$

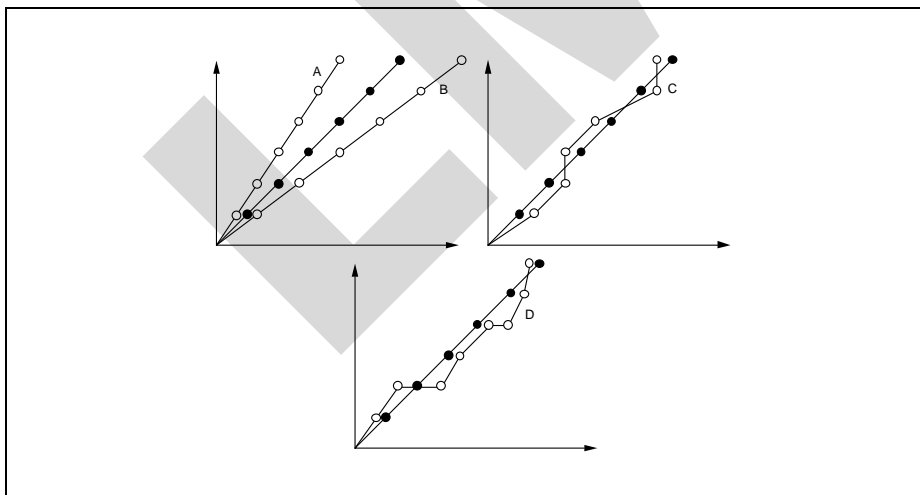
όπου a = ο μικρότερος εκτιμώμενος πιθανός χρόνος διεργασίας
 b = ο μεγαλύτερος εκτιμώμενος πιθανός χρόνος διεργασίας
 m = ο εκτιμώμενος πιο πιθανός χρόνος διεργασίας

Για παράδειγμα, στην διεργασία 1,2 –δηλαδή, την διεργασία μεταξύ των γεγονότων 1 και 2, που αντιπροσωπεύεται από το τόξο μεταξύ των κόμβων 1 και 2– είναι $a = 2$, $b = 6,6$ και $m = 4$ εβδομάδες. Η ανάλυση των εκτιμώμενων χρόνων των διεργασιών οδηγεί σε μια κρίσιμη διαδρομή 32,5 εβδομάδων, με-

ταξύ των γεγονότων 1, 4, 7, 11, 14 και 15. Το Σχήμα 6.44 [41] δείχνει το CP, το $E(t_{i,j})$ για κάθε διεργασία του CP, καθώς και την συμμετοχή της κάθε διεργασίας στο CP, που εκφράζεται ως ποσοστό του συνολικού CP. Το διάγραμμα προόδου κατασκευάζεται από αυτά τα δεδομένα. Το οριζόντιο τμήμα $t_0 - t_{PC}$ του σχήματος 6.42 [41] είναι ίσο με το μήκος των 32,5 εβδομάδων του CP. Ο κάθετος άξονας έχει κλίμακα σε ποσοστά από 0 έως 100. Οι γραμμές του αρχικού σχεδιασμού κινούνται από το σημείο ($t_0, 0\%$) μέχρι το σημείο ($t_{PC}, 100\%$). Τα γεγονότα της κρίσιμης διαδρομής (CP) εμφανίζονται στην γραμμή αυτή, με βάση την εκτιμούμενη χρονική στιγμή πραγματοποίησής τους (οριζόντιος άξονας) και την αντίστοιχη θέση της κρίσιμης διαδρομής (κάθετος άξονας). Στα γεγονότα αυτά αντιστοιχούν οι σκιασμένοι κύκλοι του Σχήματος 6.42 [41]. Η πραγματική πρόοδος βρίσκεται, σχεδιάζοντας τους πραγματικούς χρόνους ολοκλήρωσης των γεγονότων CP ως συνολικό χρόνο μετά τον t_0 (οριζόντιος άξονας) και τα αρχικά ποσοστά του CP για τα γεγονότα αυτά (κάθετος άξονας). Στα γεγονότα αυτά αντιστοιχούν οι μη σκιασμένοι κύκλοι στο Σχήμα 6.42.



Σχήμα 6.44 Η Κρίσιμη Διαδρομή (CP) για τα παραδείγματα των Διαγραμμάτων Προόδου



Σχήμα 6.45 Τέσσερις Τύποι Γραμμών Προόδου

Στο Σχήμα 6.45 [41] παρουσιάζεται ο τρόπος προσδιορισμού των λαθών του προγραμματισμού, μέσω του διαγράμματος προόδου. Όλα τα τμήματα, της πραγματικής γραμμής προόδου A, έχουν πιο απότομη κλίση σε σχέση με την αρχική γραμμή προγραμματισμού. Επομένως, όλες οι εργασίες ολοκληρώθηκαν μέσα τους προβλεπόμενους χρόνους. Αντιθέτως, η γραμμή B δείχνει συνεχώς υπεκτιμημένους χρόνους διεργασιών. Η γραμμή C δείχνει τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από την υπερεκτίμηση ορισμένων διεργασιών και την υποτίμηση άλλων. Το εύρος, κατά το οποίο η πραγματική γραμμή προόδου αποκλίνει από την αρχική γραμμή προγραμματισμού ή συγκλίνει με αυτή, αντιπροσωπεύει την ακρίβεια του προγραμματισμού. Η γραμμή D δείχνει τι συμβαίνει όταν διεργασίες, που δεν ανήκουν στο αρχικό CP, διαρκούν περισσότερο από τον προγραμματισμένο χρόνο και γίνονται τελικά εργασίες του CP. Λάθη προγραμματισμού αυτού του είδους δημιουργούν ένα τμήμα οριζόντιας γραμμής στην γραμμή προόδου –υπάρχει ένα πραγματικό κενό χρόνου μεταξύ του τέλους μιας από τις εργασίες CP και της έναρξης της επομένης.

Ο αρχικός προγραμματισμός και οι πραγματικές γραμμές προόδου είναι περιγραφικά μόνο στατιστικά στοιχεία. Μια τιμή ελέγχου του διαγράμματος προόδου αποκτά σημασία, εάν οι διασπορές του χρόνου της διεργασίας χρησιμοποιούνται για την δημιουργία πιθανοθεωρητικών συμπερασμάτων σχετικά με τους πραγματικούς χρόνους ολοκλήρωσης του έργου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.42 [41], τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν, όταν η γραμμή πραγματικής προόδου τέμνει μια γραμμή ελέγχου. Κάθε γραμμή ελέγχου συσχετίζεται με μια πιθανότητα –την πιθανότητα να ολοκληρωθεί το έργο στην χρονική στιγμή t_{PC} ή νωρίτερα. Οι γραμμές ελέγχου μπορούν να υπολογισθούν για κάθε τιμή του p μεταξύ 0 και 1, αλλά το διάγραμμα είναι περισσότερο ξεκάθαρο, εάν σχεδιασθούν μόνο μερικές γραμμές –π.χ., $p = 0,01$, $p = 0,25$, $p = 0,75$ και $p = 0,99$. Η γραμμή του αρχικού προγράμματος αντιστοιχεί στην $p = 0,50$.

Η μορφή και η θέση των γραμμών ελέγχου εξαρτάται από τις υποθέσεις, που γίνονται, σχετικά με το έργο. Ορισμένες από τις υποθέσεις είναι οι ακόλουθες:

- Οι χρόνοι των διεργασιών είναι ανεξάρτητοι –ο πραγματικός χρόνος, που χρησιμοποιήθηκε για κάθε διεργασία, δεν έχει επίδραση στον προβλεπόμενο χρόνο της διεργασίας και στην διασπορά οποιασδήποτε άλλης διεργασίας.
- Οι κατανομές πιθανότητας για τους χρόνους διεργασιών έχουν μέσες τιμές και διασπορές, που δίδονται από τις Εξισώσεις (6-20) και (6-21).
- Οι κατανομές πιθανότητας για τα αθροίσματα των χρόνων μεμονωμένων διεργασιών ακολουθούν περίπου κανονική κατανομή με μέσες τιμές και διασπορές, που υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\mu_T = \sum E(t_{i,j})$$

$$\sigma_T^2 = \sum \sigma_{i,j}^2$$

για όλες τις διεργασίες i,j που περιλαμβάνονται στο συνολικό άθροισμα.

- Ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης για το έργο είναι ίσος με το άθροισμα των εκτιμώμενων χρόνων των εργασιών, που ανήκουν στην κρίσιμη διαδρομή.
- Κατά την διάρκεια του έργου, οι εκτιμήσεις των a , b , και m για κάθε διεργασία, δεν αλλάζουν.
- Η πιθανότητα για τις διεργασίες, που δεν ανήκουν στην κρίσιμη διαδρομή να εισέλθουν σ' αυτήν, είναι τόσο μικρή, ώστε, όταν κατασκευάζονται οι γραμμές ελέγχου, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη μόνο οι διεργασίες που ανήκουν στην κρίσιμη διαδρομή CP.
- Οι διασπορές των κατανομών πιθανότητας των χρόνων των διεργασιών είναι ανάλογες της διάρκειας της διεργασίας.

Όταν η πραγματική γραμμή προόδου τέμνει μια γραμμή ελέγχου, π.χ. η γραμμή $p = 0,25$, η πιθανότητα ολοκλήρωσης του έργου σε χρόνο t_{PC} ή συντομότερα είναι 0,25, με δεδομένο, ότι οι αρχικές εκτιμήσεις των a , b και m ισχύουν ακόμα. Ωστόσο, εάν παρατηρείται απόκλιση από το αρχικό πρόγραμμα και εάν χρησιμοποιούνται περισσότεροι ή λιγότεροι πόροι από αυτούς, που είχαν προγραμματισθεί για μια διεργασία, τότε οι αρχικές πιθανότητες των γραμμών ελέγχου δεν ισχύουν σε όλη την διάρκεια αυτής της διεργασίας.

Είναι πιθανό, να χρειάζεται να σχεδιασθούν νέες γραμμές ελέγχου, όταν συμβαίνουν αλλαγές στην ποσότητα των πόρων του έργου ή στις εκτιμήσεις των a , b , και m . Εάν οι αλλαγές αντιστοιχούν σε διορθωτικές ενέργειες για μια διεργασία του CP, με σκοπό να επανέλθει το έργο στον αρχικό προγραμματισμό, θα πρέπει να παραμείνουν οι αρχικές γραμμές ελέγχου. Θα εφαρμοσθούν ξανά, όταν ολοκληρωθεί η προβληματική διεργασία. Ωστόσο, εάν οι εκτιμήσεις a , b , και m αλλάξουν για διάφορες διεργασίες του CP, θα πρέπει να σχεδιασθούν νέες γραμμές ελέγχου, εφ' όσον οι παλιές δεν ισχύουν πλέον. Εάν οι αλλαγές στα a , b και m κατά την διάρκεια του έργου διαφοροποιούν το ίδιο το CP, τότε η αρχική γραμμή προγραμματισμού μπορεί να μείνει σε ισχύ για το χρονικό διάστημα, που αντιστοιχεί σε ολοκληρωμένες διεργασίες, ενώ μια αναθεωρημένη αρχική γραμμή διαγράμματος μπορεί να σχεδιασθεί στο νέο σημείο (t_{PC} , 100%).

Με βάση τις προηγούμενες υποθέσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι για να σχεδιασθούν οι γραμμές ελέγχου [41]. Η πιο απλή μέθοδος καλείται μέθοδος των "Αναλογικών Διασπορών CP" (Proportional CP Variances). Οι εκτιμήσεις των διασπορών, των χρόνων μεμονωμένων διεργασιών, χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν μια εκτίμηση για την διασπορά του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης του έργου. Ακολούθως η διασπορά "επανακατανέμεται" στις μεμονωμένες εργασίες. Το Σχήμα 6.46 [41] παρουσιάζει

την μέθοδο σχεδιασμού των γραμμών ελέγχου. Κατά την μέθοδο αυτή, κάθε μια γραμμή ελέγχου είναι μια ευθεία γραμμή από ένα σημείο στον οριζόντιο άξονα, που αντιπροσωπεύει τον χρόνο, σημείο $(t_x, 0\%)$, ως το τέλος του έργου, σημείο $(t_{PC}, 100\%)$. Για την γραμμή ελέγχου στο σημείο $p = x$, η τιμή του t_x υπολογίζεται ως :

$$t_x = z_x \sqrt{\sigma_T^2}$$

όπου z_x , είναι η τιμή κάτω από μια τυπική κανονική κατανομή, πάνω από την οποία βρίσκεται ένα ποσοστό x της κατανομής και

$$\sigma_T^2 = \sum \sigma_{i,j}^2 \text{ για όλες τις εργασίες } i, j, \text{ που ανήκουν στο CP}$$

Οι τιμές z_x προέρχονται από ένα πίνακα. Για παράδειγμα, για $x = 0,01$, $z_x = 2,326$ και για $x = 0,25$, $z_x = 0,675$. Για το CP και για άλλα δεδομένα που φαίνονται στο Σχήμα 6.44 [41]:

$$\begin{aligned} \sigma_T^2 &= 0.422 + 0.490 + 1.361 + 1.440 + 1.467 \\ &= 5,180 \end{aligned}$$

και, για $x = 0,01$:

$$\begin{aligned} t_x &= (2,326) \sqrt{5,180} \\ &= 5,29 \text{ weeks} \end{aligned}$$

Με παρόμοιο τρόπο, t_x για $x = 0,25$ είναι $(0,675) (5,180)^{0,5} = 1,54$ εβδομάδες.

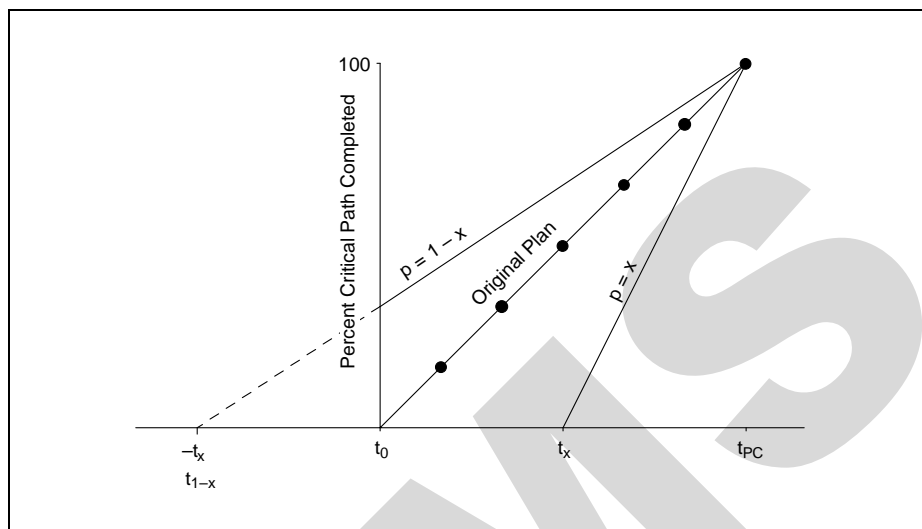
Οι γραμμές ελέγχου για πιθανότητες μεγαλύτερες από 0,50 βρίσκονται πάνω από την αρχική γραμμή προγραμματισμού, τέμνοντας τον κάθετο άξονα σε μερικές τιμές μεγαλύτερες από 0%. Η συντεταγμένη στον οριζόντιο άξονα υπολογίζεται με τον τρόπο, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.46 [41], προεκτείνοντας τον άξονα προς τα αριστερά του t_0 , όπου οι αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν μια πραγματική αρχή πριν την προγραμματισμένη αρχή του t_0 .

Από την τυπική κανονική κατανομή, όλες οι τιμές του z για τις τιμές του p , που είναι μεγαλύτερες από 0,50, θα είναι αρνητικές. Από την συμμετρία της τυπικής κανονικής κατανομής ισχύει ότι

$$t_{1-x} = -t_x$$

Η λειτουργία των διαγραμμάτων προόδου είναι παρόμοια με αυτή των στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου, που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των παραγωγικών διεργασιών. Τα διαγράμματα προόδου και τα διαγράμματα ελέγχου παρέχουν την δυνατότητα άμεσης εξαγωγής συμπερασμάτων σχετικά με την επιτυχία ή την αποτυχία των ενεργειών διατήρησης του προγραμματισμού του έργου στο σύνολό του, ενώ ταυτόχρονα δείχνουν τις αθροιστικές επιδράσεις των πολλών μικρών αποκλίσεων από τον προγραμματισμό του έργου. Από την άλλη μεριά, τα διαγράμματα προόδου και τα διαγράμματα ελέγχου δεν δείχνουν αυτόματα την κύρια αιτία, που προκαλεί α-

ποκλίσεις από τον αρχικό προγραμματισμό. Όπως δείξαμε πιο πριν, ένα διάγραμμα προόδου μπορεί να υποδείξει πολλούς λόγους αποτυχίας του έργου (συνεχείς υπεκτιμήσεις χρονικής διάρκειας των εργασιών ή ακατάλληλη εφαρμογή των πόρων), αλλά δεν τους εξηγεί. Επίσης το διάγραμμα προόδου δεν θα προβλέψει προβλήματα, που δεν ήταν εμφανή, όταν έγινε ο αρχικός προγραμματισμός του έργου. Η προληπτική χρησιμότητα των διαγραμμάτων προόδου περιορίζεται στον προσδιορισμό πιθανοτήτων για την έγκαιρη ολοκλήρωση του έργου, με δεδομένο, ότι όλες οι αρχικές υποθέσεις του προγραμματισμού του έργου ισχύουν ακόμα.



Σχήμα 6.46 Στοιχεία της δημιουργίας Διαγράμματος Προόδου

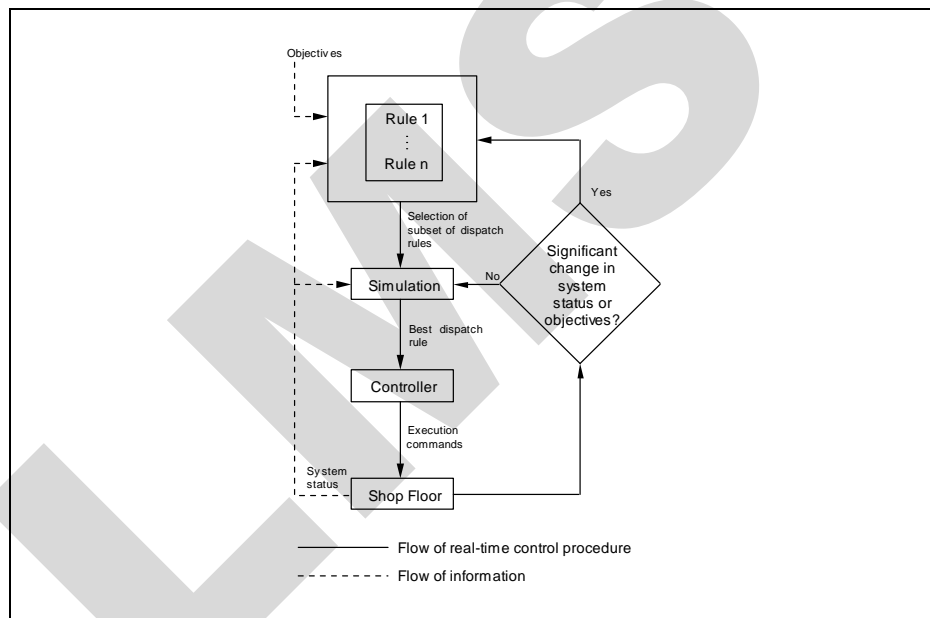
6.4.4 Έλεγχος των Συστημάτων Παραγωγής με την χρήση Προσομοίωσης και Έμπειρων Συστημάτων (A Simulation and Rule-Based System Approach to the On-Line Control of Manufacturing Systems)

Η άποψη, που επικρατεί μεταξύ των ερευνητών σχετικά με τον χρονοπρογραμματισμό, είναι, ότι σε πολλές περιπτώσεις είναι αποτελεσματικότερος ο συνδυασμός περισσότερων κανόνων διεκπεραίωσης από ότι η χρήση ενός μόνο κανόνα. Η διακριτή προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, σε συνδυασμό με τους κανόνες διεκπεραίωσης, για τον έλεγχο και τον προγραμματισμό ενός συστήματος παραγωγής [41-45]. Στην προσέγγιση αυτή, η διακριτή προσομοίωση ενός μοντέλου συστήματος παραγωγής χρησιμοποιείται για να «αξιολογήσει» την απόδοση ενός συνόλου κανόνων διεκπεραίωσης, στα πλαίσια ενός μικρού ορίζοντα προγραμματισμού, Δt . Ο κανόνας, με την καλύτερη απόδοση

στον ορίζοντα προγραμματισμού, εφαρμόζεται στο φυσικό σύστημα. Στο τέλος του Δt , η κατάσταση του φυσικού συστήματος ενσωματώνεται στο μοντέλο του συστήματος. Η διαδικασία αξιολόγησης/εφαρμογής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές.

Η επιλογή ενός κανόνα διεκπεραίωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα έμπειρο σύστημα[46,47] και να βασισθεί, για παράδειγμα, στο ποιοί από τους ακόλουθους δείκτες απόδοσης είναι περισσότερο σχετικοί με το σύστημα παραγωγής.

- Μέγιστος χρόνος ολοκλήρωσης
- Μέσος χρόνος παραμονής των εργασιών στο σύστημα
- Μέγιστος χρόνος παραμονής των εργασιών στο σύστημα
- Αριθμός καθυστερημένων εργασιών
- Μέσος χρόνος καθυστέρησης των εργασιών
- Μέγιστος χρόνος καθυστέρησης των εργασιών



Objectives = Στόχοι
 Selection of subset of dispatch rules = Επιλογή υποσυνόλου κανόνων διεκπεραίωσης
 Simulation = Προσομοίωση
 Controller = Ελεγκτής
 Shop Floor = επίπεδο εργοστασίου
 Flow of real-time control procedure = Ροή διαδικασίας ελέγχου πραγματικού χρόνου

Significant change in system status or objectives = Σημαντική αλλαγή στην κατάσταση του συστήματος ή στους στόχους
 Best dispatch rule = Βέλτιστος κανόνας διεκπεραίωσης
 Execution commands = Εντολές εκτέλεσης
 System status = Κατάσταση συστήματος
 Flow of information = Ροή πληροφορίας

Σχήμα 6.47 Προσομοίωση/Προσέγγιση βασισμένη σε έμπειρο σύστημα για έλεγχο On-Line

Μια γενική εικόνα ενός πιθανού μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού φαίνεται στο Σχήμα 6.47 [45]. Τα κύρια συστατικά του μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού είναι ο ελεγκτής και προσομοιωτής. Επιλέγεται ένα υποσύνολο των κανόνων διεκπεραίωσης από ένα γενικό σύνολο, με βάση τους στόχους του συστήματος (δείκτες απόδοσης) και την παρούσα κατάσταση του συστήματος (μια περιγραφή των λειτουργιών, που βρίσκονται σε εξέλιξη σε ένα FMS). Τότε ο προσομοιωτής απεικονίζει, σε ένα μοντέλο του FMS, την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και πραγματοποιεί μια σειρά από προσομοιώσεις με έναν μικρό ορίζοντα Δt και για καθένα από τους κανόνες διεκπεραίωσης. Ο καλύτερος κανόνας διεκπεραίωσης προωθείται στον ελεγκτή, ο οποίος δημιουργεί μια σειρά εντολών εκτέλεσης, όπως αυτές περιγράφηκαν από τους κανόνες διεκπεραίωσης. Τα κομμάτια διεκπεραιώνονται στο εργοστάσιο με βάση αυτές τις εντολές εκτέλεσης, μέχρι τον επόμενο ορίζοντα προγραμματισμού Δt . Εάν καταγραφούν σημαντικές αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος ή στους στόχους του, τότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία επιλογής ενός περισσότερο κατάλληλου υποσυνόλου κανόνων διεκπεραίωσης.

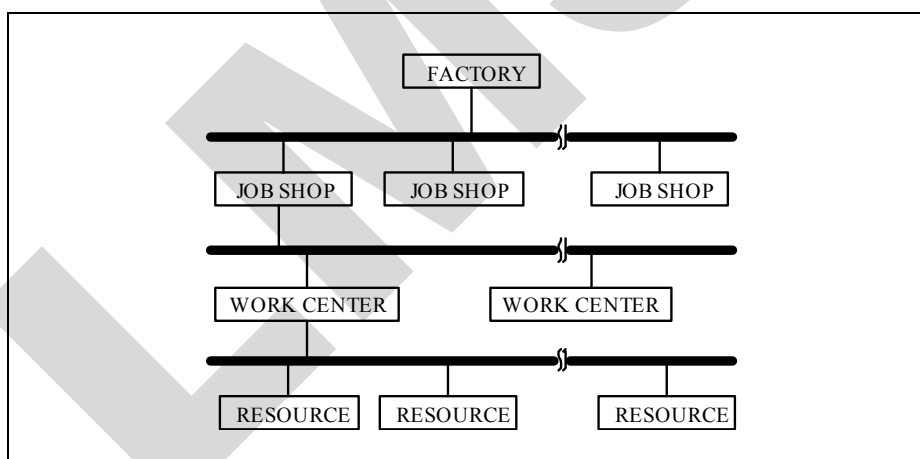
Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρονοπρογραμματισμού είναι, ότι η επιλογή ενός υποσυνόλου κανόνων διεκπεραίωσης από ένα γενικότερο σύνολο είναι ουσιαστικά μια τυχαία διαδικασία. Αυτό εφαρμόζεται ακόμη και όταν χρησιμοποιείται ένα έμπειρο σύστημα, που βασίζεται σε κανόνες για να πραγματοποιήσει αυτή την λειτουργία. Παρ' όλο που αρκετό μέρος της έρευνας έχει αφιερωθεί στον προσδιορισμό των συνθηκών, κάτω από τις οποίες συγκεκριμένοι κανόνες διεκπεραίωσης αποδίδουν ικανοποιητικά [32-38], τα αποτελέσματα εφαρμόζονται μόνο στα συγκεκριμένα συστήματα παραγωγής και στις συνθήκες που μελετήθηκαν και για τον λόγο αυτό είναι δύσκολο να γενικευτούν. Δυστυχώς, επειδή η προσομοίωση είναι μια διαδικασία, που απαιτεί πολλούς υπολογισμούς, δεν είναι δυνατόν να αξιολογήσουμε ένα μεγάλο σύνολο κανόνων διεκπεραίωσης υπό τους χρονικούς περιορισμούς του ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.

6.4.5 Μια προσέγγιση διαδικασίας λήψης αποφάσεων για την λειτουργία των συστημάτων παραγωγής (A Manufacturing Decision Making (MADEMA) Approach to the Operation of Manufacturing Systems)

Στα πραγματικά συστήματα παραγωγής, ο χρονοπρογραμματισμός (δηλαδή η διάθεση των μηχανών στις παραγωγικές εργασίες σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές) πραγματοποιείται ad hoc ή διά μέσου της εφαρμογής των κανόνων διεκπεραίωσης των εργασιών (παράγραφος 6.3.3.). Οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων ίσως μπορούν να προσφέρουν μια εναλλακτική λύση απέναντι στους εμπειρικούς κανόνες διεκπεραίωσης. Στην λήψη αποφάσεων για αναθέσεις εργασιών σε παραγωγικούς πόρους, οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων μπορούν να λάβουν υπ' όψη τους πόρους και τις εργασίες συγχρόνως και μπορούν να αναθέσουν κάθε μια εργασία σε ένα συγκεκριμένο πόρο σε αντίθεση με

τους κανόνες διεκπεραίωσης, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα επιλογής μόνο της επόμενης εργασίας που θα εκτελεσθεί. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων μπορεί, επίσης, να λάβει υπ' όψη της ταυτόχρονα, πολλαπλά κριτήρια.

Στην συνέχεια περιγράφεται η προσέγγιση MADEMA (Manufacturing Decision Making, MADEMA), η οποία χρησιμοποιεί διαδικασίες λήψης αποφάσεων [48,49] και η οποία έχει εφαρμοσθεί σε πραγματικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις [50,51]. Κατά την προσέγγιση MADEMA, ένα σύστημα παραγωγής μπορεί, γενικά, να εξετασθεί σαν μια ιεραρχική δομή (Σχ. 6.48). Το υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας, το εργοστάσιο (factory), αντιστοιχεί σε ολόκληρο το σύστημα παραγωγής. Ένα εργοστάσιο μπορεί να διαιρεθεί σε επί μέρους τμήματα, τα οποία ονομάζονται Job Shops και αποτελούνται με την σειρά τους από κέντρα εργασίας (work centers), τα οποία παράγουν μια οικογένεια προϊόντων ή υποπροϊόντων. Ένα κέντρο εργασίας αποτελείται από παραγωγικούς πόρους, οι οποίοι είναι δυνατόν να εκτελούν παρόμοιες διεργασίες. Για παράδειγμα, ένα κέντρο εργασίας με τόνρους μπορεί να περιέχει μερικούς ή όλους τους τόνρους από ένα job shop. Δεν είναι απαραίτητο όλοι οι πόροι, που εκτελούν παρόμοιες διεργασίες, να βρίσκονται στην ίδια περιοχή μέσα στο εργοστάσιο, διότι ένα κέντρο εργασίας αποτελεί μια λογική και όχι τοπολογική ομαδοποίηση των παραγωγικών πόρων. Ένας παραγωγικός πόρος μπορεί να είναι μια μηχανή ή ένας εργάτης ή μια κυψέλη παραγωγής (μια ομάδα από μηχανές και βοηθητικές συσκευές, π.χ. ρομπότ, οι οποίες δουλεύουν μαζί για να εκτελέσουν μια εργασία).



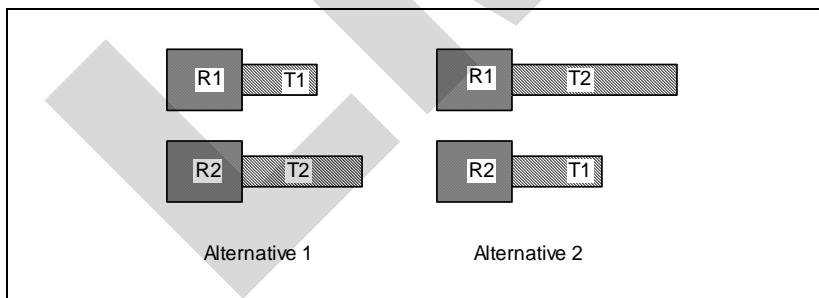
Σχήμα 6.48 Η Ιεραρχία του Συστήματος Παραγωγής

Η προσέγγιση MADEMA πραγματοποιεί την διαδικασία χρονοπρογραμματισμού δυναμικά, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος παραγωγής. Σε κάθε κέντρο εργασίας, οποτεδήποτε ένας ή περισσότεροι πόροι γίνονται διαθέσιμοι μετά από την ολοκλήρωση της υπεργασίας (task) που τους έχει ανατεθεί, λαμβάνει χώρα μια διαδικασία λήψης απόφασης και αναθέτει

μια υπεργασία, που βρίσκεται σε αναμονή (μια υπεργασία, η οποία έχει διεκπεραιωθεί στο κέντρο εργασίας, αλλά δεν έχει ακόμα εκτελεσθεί), σε κάθε ελεύθερο παραγωγικό πόρο. Η προσομοίωση αυτής της διαδικασίας ανάθεσης εργασιών στον χρόνο έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός καταλόγου αναθέσεων (όπου υποδεικνύεται ποια υπεργασία πρέπει να εκτελεσθεί από ποιον πόρο και πότε) σε κάθε κέντρο εργασίας. Το χρονοπρόγραμμα για ολόκληρο το σύστημα παραγωγής δημιουργείται συνδυάζοντας τους καταλόγους ανάθεσης εργασιών για κάθε κέντρο εργασίας. Ο χρονοπρογραμματισμός (dispatching) πρέπει να πραγματοποιείται δυναμικά, επειδή η άφιξη νέων εργασιών και οι βλάβες στους παραγωγικούς πόρους, οι οποίες δεν μπορεί να προβλεφθούν με βεβαιότητα, προκαλούν συνεχώς αλλαγές των υπεργασιών και των πόρων, που εμπλέκονται στην υλοποίησή τους. Στην περίπτωση, που οι αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού εκτελούνταν νωρίτερα από την χρονική στιγμή εφαρμογής τους, τότε απρόβλεπτες διακοπές, όπως βλάβες, μπορούν να κάνουν πολλές από τις αναθέσεις υπεργασιών μη εφικτές. Επειδή, η συγκεκριμένη διαδικασία χρονοπρογραμματισμού πρέπει να καταλήγει σε εφικτές αναθέσεις, πρόκειται για μια διαδικασία πεπερασμένου δυναμικού παραγωγής (Finite-Capacity).

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων MADEMA ενεργοποιείται κάθε φορά, που μεταβάλλεται η κατάσταση σε ένα κέντρο εργασίας –π.χ., όταν ένας παραγωγικός πόρος γίνεται διαθέσιμος μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης εργασίας κ.λ.π. Οι χρονικές στιγμές, κατά τις οποίες λαμβάνονται αποφάσεις, ονομάζονται σημεία λήψης απόφασης (decision points). Σε αυτά τα σημεία λήψης απόφασης, η διαδικασία αναθέτει μια υπεργασία σε κάθε ένα από τους διαθέσιμους πόρους. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελείται από τα ακόλουθα τέσσερα βήματα:

1. Δημιουργία ενός συνόλου εναλλακτικών λύσεων



Σχήμα 6.49 Παράδειγμα εναλλακτικών

Μια εναλλακτική (alternative) ορίζεται ως η ανάθεση υπεργασιών (tasks) στους διαθέσιμους πόρους παραγωγής. Μόνο μια υπεργασία ανατίθεται κάθε χρονική στιγμή σε ένα πόρο παραγωγής, γεγονός, που επιτρέπει την ευέλικτη προσαρμογή σε απρόβλεπτα μελλοντικά γεγο-

νότα. Για παράδειγμα, εάν είναι διαθέσιμοι οι πόροι R1 και R2 και υπάρχουν τρεις εργασίες T1, T2 και T3, οι οποίες είναι σε αναμονή, δύο πιθανές εναλλακτικές φαίνονται στο Σχήμα 6.49.

2. Προσδιορισμός ενός συνόλου σχετικών κριτηρίων λήψης απόφασης

Ένα κριτήριο είναι μια εκτίμηση της απόδοσης ενός χρονοπρογράμματος, με δεδομένο, ότι εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη εναλλακτική λύση. Οι τιμές του κριτηρίου υπολογίζονται για κάθε εναλλακτική λύση, που δημιουργείται σε κάθε σημείο λήψης απόφασης, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ποιότητα της εναλλακτικής. Διαφορετικά συστήματα παραγωγής θα χρησιμοποιούν διαφορετικά κριτήρια. Επίσης, στο ίδιο σύστημα παραγωγής μπορεί να χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα κριτήρια. Ο μέσος χρόνος καθυστέρησης (mean tardiness) και ο μέσος χρόνος παραμονής των εργασιών στο σύστημα παραγωγής (mean flow time) αποτελούν παραδείγματα κριτηρίων:

Κριτήριο Μέσου χρόνου Καθυστέρησης (Mean tardiness)

$$\text{TARD}(\text{alt}_q) = \frac{\sum_{i=1}^L \text{Max}[0; (T_i^{\text{comp}}(\text{alt}_q) - T_i^{\text{dd}})]}{L} \quad (6-22)$$

Κριτήριο Μέσου χρόνου παραμονής στο σύστημα (flowtime criterion)

$$\text{FLOW}(\text{alt}_q) = \frac{\sum_{i=1}^L (T_i^{\text{comp}}(\text{alt}_q) - T_i^{\text{arr}})}{L} \quad (6-23)$$

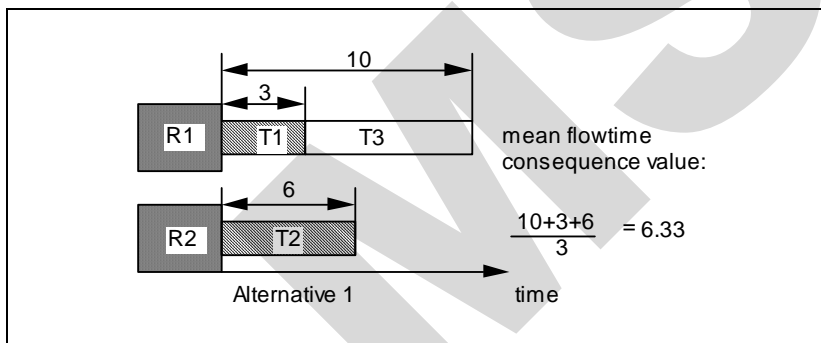
όπου:

- $\text{alt}_q \equiv$ η q_{th} εναλλακτική που δημιουργείται στο σημείο απόφασης
- $L \equiv$ ο αριθμός των εργασιών, που βρίσκονται σε αναμονή στο κέντρο εργασίας στο σημείο λήψης απόφασης.
- $T_i^{\text{comp}}(\text{alt}_q) \equiv$ ο χρόνος ολοκλήρωσης της i_{th} υπεργασίας (task), που βρίσκεται σε αναμονή, εάν εφαρμοσθεί η εναλλακτική λύση alt_q
- $T_i^{\text{dd}} \equiv$ η ημερομηνία παράδοσης της i_{th} υπεργασίας, που βρίσκεται σε αναμονή
- $T_i^{\text{arr}} \equiv$ ο χρόνος, στον οποίο η i_{th} υπεργασία, που βρίσκεται σε αναμονή φτάνει στο κέντρο εργασίας.

Σε ένα σημείο λήψης απόφασης, η μελλοντική απόδοση του χρονοπρογραμματισμού, η οποία εκτιμάται μέσω του κριτηρίου της μέσης καθυστέρησης (mean tardiness), ονομάζεται δείκτης απόδοσης μέσης καθυστέρησης (mean tardiness performance measure) και είναι ο μέσος χρόνος πέραν της ημερομηνίας παράδοσης, στον οποίο ολοκληρώνεται η εργασία. Ομοίως, η μελλοντική απόδοση του χρονοπρογραμματισμού, η οποία εκτιμάται μέσω του κριτηρίου του μέσου χρόνου παραμονής της εργασίας στο σύστημα (mean flowtime), ονομάζεται δείκτης απόδοσης μέσου χρόνου παραμονής και είναι ο μέσος χρόνος που μια εργασία καταναλώνει μέσα σε ένα σύστημα παραγωγής.

3. Καθορισμός των επιπτώσεων των διαφορετικών εναλλακτικών ως προς τα διάφορα κριτήρια.

Η επίπτωση μιας εναλλακτικής, όσον αφορά σε ένα κριτήριο, είναι η εκτίμηση της τιμής αυτού του κριτηρίου, εάν η εναλλακτική εφαρμοσθεί. Για παράδειγμα, η επίπτωση της Εναλλακτικής 1, όσον αφορά στο κριτήριο του μέσου χρόνου παραμονής της εργασίας στο σύστημα (mean flow time), μπορεί να προσδιορισθεί ως εξής (Σχ. 6.50).



Σχήμα 6.50 Παράδειγμα καθορισμού της επίπτωσης μιας εναλλακτικής σε σχέση με ένα κριτήριο (Μέσος χρόνος παραμονής μιας εργασίας στο σύστημα)

Στην περίπτωση αυτή το κριτήριο του μέσου χρόνου παραμονής της εργασίας στο σύστημα (mean flow time) έχει υπολογισθεί, θεωρώντας, αλλά όχι εφαρμόζοντας πραγματικά, την ανάθεση της εργασίας T3 στον πόρο R1 και στην συνέχεια εφαρμόζοντας το κριτήριο του μέσου χρόνου παραμονής (Εξ. 6-23). Θα μπορούσαμε, επίσης, να θεωρήσουμε, ότι η εργασία T3 ανατίθεται στον πόρο R2 για να εκτελέσουμε τους υπολογισμούς. Η πραγματική τιμή του κριτηρίου είναι η μέση τιμή των χρόνων παραμονής στις δύο πιθανές αναθέσεις. Αν και αυτό είναι ένας μικρός υπολογισμός για το απλό αυτό παράδειγμα και η διαδικασία εκτίμησης δεν είναι απαραίτητη, σε μια πραγματική κα-

τάσταση χρονοπρογραμματισμού είναι αδύνατον να βρεθούν όλοι οι δυνατοί τρόποι ανάθεσης των εργασιών, που είναι σε αναμονή και συνεπώς, πρέπει να υπολογίσουμε την πραγματική τιμή του κριτηρίου, θεωρώντας ένα δείγμα των πιθανών τρόπων ανάθεσης των εργασιών που βρίσκονται σε αναμονή. Όσο περισσότερες αναθέσεις εργασιών λάβουμε υπ' όψη μας τόσο καλύτερη θα είναι η εκτίμηση.

4. Επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής

Το τελευταίο βήμα είναι η επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής, μέσω της τιμής χρησιμότητας (utility value), η οποία δείχνει πόσο καλές είναι οι εκτιμήσεις για τις τιμές των κριτηρίων (consequence values). Η εναλλακτική με την βέλτιστη χρησιμότητα, ορίζεται ως η καλύτερη εναλλακτική (Σχ. 6.51). Η χρησιμότητα μιας εναλλακτικής υπολογίζεται μέσω της κανονικοποίησης των εκτιμήσεων για τις τιμές των κριτηρίων. Στο Σχήμα 6.51, οι τιμές για το κριτήριο του μέσου χρόνου παραμονής της εργασίας στο σύστημα (mean flow time) μπορούν να κανονικοποιηθούν, διαιρώντας τον μέσο χρόνο παραμονής της εργασίας στο σύστημα με το άθροισμα όλων των μέσων χρόνων παραμονής της εργασίας στο σύστημα και αφαιρώντας το αποτέλεσμα αυτό από την μονάδα. Με τον τρόπο αυτό κανονικοποιούνται οι τιμές των κριτηρίων, ώστε το άθροισμα τους να είναι ίσο με την μονάδα και έτσι ώστε οι χαμηλότερες (καλύτερες) τιμές θα αντιστοιχούν στις υψηλότερες τιμές χρησιμότητας. Η χρησιμότητα της Εναλλακτικής 1 μπορεί να υπολογισθεί ως $1 - 6,33 / (5,43 + 6,33) = 0,46$. Παρομοίως, η χρησιμότητα της Εναλλακτικής 2 μπορεί να υπολογισθεί ως $1 - 5,43 / (5,43 + 6,33) = 0,54$. Στην περίπτωση αυτήν, θα επιλεγεί η Εναλλακτική 2.

Alt #	Mean Flowtime	Utility
1	6.33	0.46
2	5.43	0.54

selected alternative

Mean Flowtime = Μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα
Utility = Ωφέλεια

Selected Alternative = Επιλεγείσα εναλλακτική

Σχήμα 6.51 Επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής όταν υπάρχει ένα μόνο κριτήριο

Η κανονικοποίηση της τιμής c_{ij} (μιας εναλλακτικής i σε σχέση με ένα κριτήριο j) ορίζεται στην συνέχεια. Για τα κριτήρια ωφέλειας (π.χ.

ποιότητα), τα οποία πρέπει να μεγιστοποιηθούν, ο τύπος κανονικοποίησης δίδεται από την εξίσωση (6-24). Για τα κριτήρια κόστους (π.χ. μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα, μέσος χρόνος καθυστέρησης), τα οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, ο τύπος της κανονικοποίησης δίδεται από την Εξίσωση (6-25).

Κανονικοποίηση του Κριτηρίου Ωφέλειας

$$\hat{c}_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{k=1}^m c_{kj}} \quad (6-24)$$

Κανονικοποίηση του Κριτηρίου Κόστους

$$\hat{c}_{ij} = \frac{1}{m-1} \left[1 - \frac{c_{ij}}{\sum_{k=1}^m c_{kj}} \right] \quad (6-25)$$

όπου:

- c_{ij} \equiv η εκτιμώμενη τιμή του κριτηρίου j για την εναλλακτική i (*consequence value*)
- \hat{c}_{ij} \equiv η κανονικοποιημένη τιμή του c_{ij}
- m \equiv ο αριθμός των εναλλακτικών

Όταν λαμβάνονται υπ' όψη πολλαπλά κριτήρια, τότε κάθε εναλλακτική έχει πολλαπλά *consequence values*. Η χρησιμότητα της εναλλακτικής υπολογίζεται, λαμβάνοντας υπ' όψη το σταθμισμένο άθροισμα των κανονικοποιημένων τιμών. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 6.52, χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια: μέσος χρόνος παραμονής και μέσος χρόνος καθυστέρησης. Θέτοντας τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας και στα δύο κριτήρια η χρησιμότητα της Εναλλακτικής 1 υπολογίζεται ως: $0,5 \cdot [1 - 6,33 / (5,43 + 6,33)] + 0,5 \cdot [1 - 1,25 / (1,25 + 3,88)] = 0,61$ και η χρησιμότητα της Εναλλακτικής 2 υπολογίζεται σαν $0,5 \cdot [1 - 5,43 / (5,43 + 6,33)] + 0,5 \cdot [1 - 3,88 / (1,25 + 3,88)] = 0,39$. Στην περίπτωση αυτή, επιλέγεται η Εναλλακτική 1.

Τα βήματα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων μπορούν να παρουσιασθούν σε ένα πίνακα αποφάσεων, όπου οι γραμμές απεικονίζουν τις εναλλακτικές και οι στήλες απεικονίζουν τα κριτήρια. Κάθε στοιχείο του πίνακα απεικονίζει την επίπτωση μιας εναλλακτικής, όσον αφορά σε ένα κριτήριο (Σχ. 6.53).

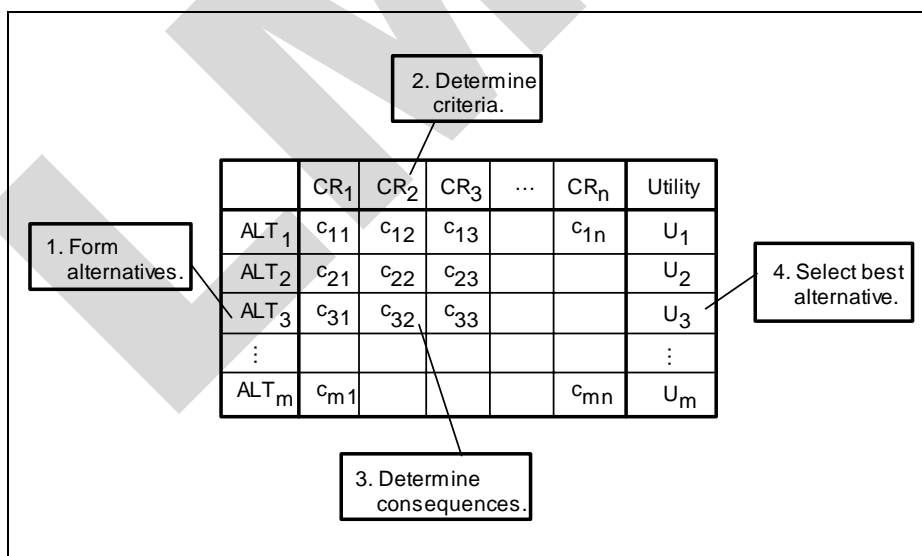
Η ποιότητα του χρονοπρογράμματος μπορεί να αξιολογηθεί από ένα σύνολο δεικτών απόδοσης (*performance measures*). Είναι χρήσιμο να ξαναδώσου-

με έμφαση στον διαχωρισμό ανάμεσα στους δείκτες απόδοσης και στα κριτήρια. Οι δείκτες απόδοσης ορίζονται σε σχέση με ολόκληρο το χρονοπρόγραμμα, αφού αυτό έχει παραχθεί. Από την άλλη μεριά, τα κριτήρια λήψης αποφάσεων είναι εκτιμήσεις και όχι μετρήσεις απόδοσης. Τα κριτήρια υπολογίζονται κατά την διάρκεια της παραγωγής του χρονοπρογράμματος, βασιζόμενα στις πληροφορίες για τις εργασίες και τους διαθέσιμους πόρους σε ένα κέντρο εργασίας σε ένα σημείο απόφασης. Χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών αποφάσεων για αναθέσεις σε ένα κέντρο εργασίας στα πλαίσια του χρονοπρογράμματος ενός ολόκληρου συστήματος παραγωγής. Παραδείγματα δεικτών απόδοσης, είναι ο μέσος χρόνος καθυστέρησης (mean tardiness) και ο μέσος χρόνος παραμονής της εργασίας στο σύστημα (mean flowtime):

Alt #	Mean Flowtime	Mean Tardiness	Utility
1	6.33	1.25	0.61
2	5.43	3.88	0.39

← selected alternative

Σχήμα 6.52 Επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλά κριτήρια



Σχήμα 6.53 Ένας πίνακας αποφάσεων

Καθυστέρηση της εργασίας j

$$\text{TARD}_j = \text{Max}[0; (T_j^{\text{comp}} - T_j^{\text{dd}})] \quad (6-26)$$

Χρόνος παραμονής της εργασίας j

$$\text{FLOW}_j = T_j^{\text{comp}} - T_j^{\text{arr}} \quad (6-27)$$

Δείκτης Απόδοσης Μέσου χρόνου καθυστέρησης

$$\overline{\text{TARD}}(T) = \frac{\sum_{j=1}^C \text{TARD}_j}{C} \quad (6-28)$$

Δείκτης απόδοσης Μέσου χρόνου παραμονής

$$\overline{\text{FLOW}}(T) = \frac{\sum_{j=1}^C \text{FLOW}_j}{C} \quad (6-29)$$

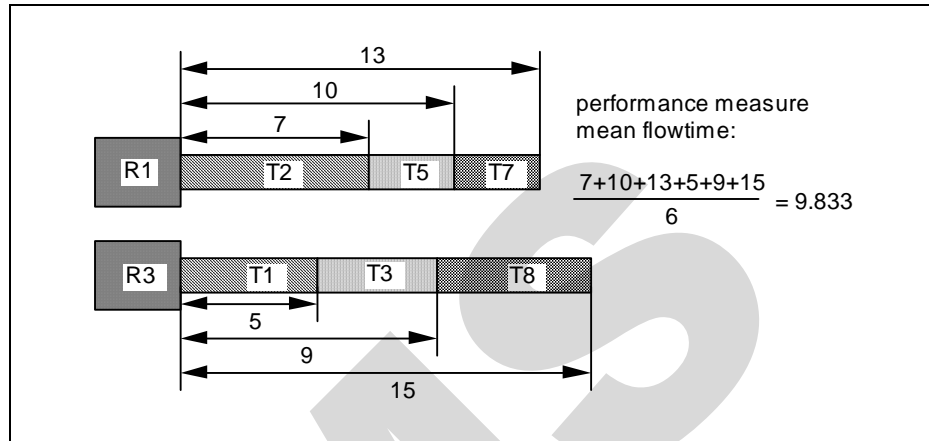
όπου:

- T ≡ το χρονικό σημείο, στο οποίο υπολογίζεται ο δείκτης απόδοσης
- C ≡ ο αριθμός των εργασιών, που ολοκληρώθηκαν πριν ή σε χρόνο T
- T_j^{comp} ≡ ο χρόνος, στον οποίο ολοκληρώθηκε η υπεργασία (task) j
- T_j^{dd} ≡ η ημερομηνία παράδοσης της υπεργασίας j
- T_j^{arr} ≡ ο χρόνος άφιξης στο σύστημα της υπεργασίας j

Ο προσδιορισμός του δείκτη απόδοσης, μέσος χρόνος παραμονής (mean flow-time), για ένα ολοκληρωμένο χρονοδιάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.54.

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων ενσωματώνεται σε λογισμικό, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία του συστήματος παραγωγής. Για την δημιουργία ενός χρονοπρογράμματος για ένα σύστημα παραγωγής, ένα μοντέλο του συστήματος προσομοιώνεται για την χρονική περίοδο που απαιτείται. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, η διαδικασία λήψης αποφάσεων καλείται οποτεδήποτε λαμβάνει χώρα ένα καινούργιο γεγονός, όπως η ολοκλήρωση μιας υπεργασίας. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι ένα χρονοπρόγραμμα, το οποίο μπορεί να απεικονισθεί είτε σαν εκτυπωμένος κατάλογος ή

σαν διάγραμμα Gantt. Αυτό αποτελείται από λεπτομερείς αλληλουχίες ανάθεσης εργασιών στους πόρους, έτσι όπως έχουν παραχθεί από την διαδικασία λήψης αποφάσεων σε κάθε κέντρο εργασίας του μοντέλου προσομοίωσης. Αυτό το χρονοπρόγραμμα μπορεί να μεταφερθεί σε πραγματικούς πόρους ενός εργοστασίου είτε ηλεκτρονικά, μέσω τερματικών υπολογιστή, είτε χειροκίνητα μέσω τυπωμένων σελίδων. Το χρονοπρόγραμμα μπορεί να παράγεται περιοδικά και εάν οι συνθήκες του εργοστασίου αλλάζουν τοπικά σε ένα συγκεκριμένο κέντρο εργασίας, τότε η διαδικασία λήψης αποφάσεων μπορεί να παράγει μια τοπική απόφαση ανάθεσης εργασιών.



Σχήμα 6.54 Υπολογισμός του δείκτη απόδοσης μέσος χρόνος παραμονής μιας εργασίας στο σύστημα παραγωγής

Επιπλέον μελέτη

Η λειτουργία των συστημάτων παραγωγής είναι ένα αρκετά μεγάλο πεδίο, όπου μέθοδοι και εργαλεία, τα οποία αναπτύχθηκαν με την βοήθεια της επιχειρησιακής έρευνας, της τεχνητής νοημοσύνης, της μηχανολογίας και άλλων σχετικών πεδίων αναμιγνύονται. Η μελέτη της λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής σε ένα μόνο κεφάλαιο μπορεί να δώσει στον αναγνώστη μόνο μια γενική εσποπτεία, κάτι το οποίο είναι και ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου. Για πιο λεπτομερή ανάλυση συστήνεται στον αναγνώστη η υπάρχουσα βιβλιογραφία, από την οποία προέρχονται και αρκετά από τα κομμάτια αυτού του κεφαλαίου.

Η εισαγωγή του κεφαλαίου, σχετικά με τις ακαδημαϊκές και τις βιομηχανικές απόψεις, έχει ως βάση το βιβλίο “A Review of Production Scheduling”, Graves [1], το “Sequencing and Scheduling”, French [2], και το “A Recent Survey of Production Scheduling” του Rodammer [3]. Αυτές οι εργασίες παρέχουν μια πολύ καλή κατηγοριοποίηση των μεθόδων και των απόψεων για τον χρονοπρογραμματισμό, όπως είναι η θεωρία ελέγχου και η τεχνητή νοημοσύνη. Για τις περιγραφές των διαφόρων επιπέδων του χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής και των συναφών παραδειγμάτων προγραμματισμού, όπως τα MPS, MRP, προγραμματισμός δυναμικού παραγωγής, έλεγχος σε επίπεδο εργοστασίου και JIT χρησιμοποιήθηκε το “Shop Floor Control” του Melnyk et al [12], το “Modern Production/Operations Management” των Buffa και Sarin [13] και το “Operations Management”, Bennet et al [14]. Αυτά τα βιβλία παρέχουν πολύ καλές εξηγήσεις των διαφόρων εννοιών του προγραμματισμού και τις υποστηρίζουν με σχετικά παραδείγματα.

Για τα τμήματα του κεφαλαίου, που αναφέρονται σε θέματα ανάλυσης δικτύων και λήψης αποφάσεων, χρησιμοποιήθηκε το “Modern Production/Operations Management, Buffa και Sarin [13], όπου μπορεί να βρεθεί μια λεπτομερής ανάλυση των PERT και CPM, καθώς και τεχνικές λήψης αποφάσεων πολλαπλών μεταβλητών, μαζί με παραδείγματα. Ειδικά για το τμήμα, που αναφέρεται σε λήψη αποφάσεων, χρησιμοποιήθηκε υλικό από το “An Introduction to Management Science”, Cabot και Harnett [18].

Για το τμήμα, που αναφέρεται στα διαγράμματα Gantt, στα μέτρα απόδοσης, στις εφαρμογές του μαθηματικού προγραμματισμού και στις τεχνικές δυναμικού προγραμματισμού στην ανάθεση, χρησιμοποιήθηκε το “Sequencing and Scheduling”, French [2]. Το βιβλίο αυτό παρέχει μια περιεκτική αξιολόγηση των τεχνικών επιχειρησιακής έρευνας, όπως αυτές εφαρμόζονται στα συστήματα παραγωγής. Για την χρήση της ανάλυσης δικτύων για την διαχείριση των έργων, χρησιμοποιήθηκε το “Schedule Monitoring for Engineering Projects”, Schmidt [41]. Αυτή η διατριβή παρέχει μια καινοτομική προσέγγιση της πρόβλεψης της πιθανότητας ένα έργο να τελειώσει στον προκαθορισμένο χρόνο.

Βιβλιογραφία

1. Graves, S.C., "A Review of Production Scheduling," *Operations Research* (Vol. 29, 1981), pp. 646-675.
2. French, S., *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job Shop*, Ellis Horwood Limited, Chichester, West Sussex, England, 1982.
3. Rodammer, F.A., "A Recent Survey of Production Scheduling," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 18, No. 6, 1988), pp. 841-851.
4. Akella, R., Y. Choong and S.B. Gershwin, "Performance of a Hierarchical Production Scheduling Policy," *IEEE Transactions on Components Hybrid Manufacturing Technology* (Vol. CHMT 7, No. 3, 1984), pp. 225-238.
5. Gershwin, S.B., R.R. Hildebrandt, R. Suri and S.K. Mitter, "A Control Perspective on Recent Trends in Manufacturing Systems", *IEEE Control Systems* (1986), pp. 3-15.
6. Abraham, C., B. Dietrich, S. Graves and W. Maxwell, "A Research Agenda for Models to Plan and Schedule Manufacturing Systems", *IBM Watson Research Center*, working paper, 1985.
7. Ho, Y.C., "A Short Tutorial on Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Models to Plan and Schedule Manufacturing Systems", *Proceedings of the First ORSAITIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems* (1984), pp. 372-378.
8. Suri, R. and J.W. Dille, "On-Line Optimization of Flexible Manufacturing Systems Using Perturbation Analysis", *Proceedings of the First ORSAITIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems* (1984), pp. 379-384.
9. Bensana, E., G. Bel and D. Dubois, "OPAL: A Multi-Knowledge Based System for Industrial Job-Shop Scheduling," *International Journal of Production Research* (Vol. 26, No. 5, 1988), 795-819.
10. Anthony, R.N., *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis*, Harvard University Graduate School of Business Administration, Boston, MA, 1965.
11. Beuy, W.L., T.E. Vollman and D.C. Whybark, *Master Production Scheduling: Principles and Practice*, American Production and Inventory Control Society, Washington, D.C., 1979.
12. Melnyk, S.A., P.I. Carter, D.M. Dilts and D.M. Lyth, *Shop Floor Control*, Dow Jones-Irwin, Homewood, IL, 1985.
13. Buffa, E.S. and R.K. Sarin, *Modern Production / Operations Management*, John Wiley and Sons, New York, NY, 1987.
14. Bennet, D., C. Lewis and M. Oakley, *Operations Management*, Philip Allan, Oxford, 1988.
15. Nicholson, T.A.J. and R.D. Pullen, "A Practical Control System for Optimizing Production Schedule", *International Journal of Production Research* (Vol. 9, No.2, 1971), pp. 219-227.
16. Irastorza, J.C. and R.H. Deane, "Starve the Shop-Reduce Work-in-Process", *Production and Inventory Management* (Vol. 17, No. 2, 1976), pp. 20-25.
17. Davis, E.W., and J.H. Patterson, "A Comparison of Heuristic and Optimum Solutions in Resource Constrained Project Scheduling", *Management Science* (Vol. 21, 1975), pp. 944-955.
18. Cabot, A.V and D.L. Harnett, *An Introduction to Management Science*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1977.
19. Keeney, R.L. and H. Raiffa, *Decisions With Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, Wiley, New York, NY, 1976.
20. Philip, J., "Algorithms for the Vector Maximization Problem", *Mathematical Programming* (Vol. 2, 1972), pp. 207-229.
21. Zeleny, M., *Linear Multiobjective Programming*, Springer Verlag, Berlin, 1980.
22. Evans, J.P. and R.E. Steuer, "A Revised Simplex Method for Linear Multiple Objective Programs" *Mathematical Programming* (Vol. 5, 1973), pp. 54-72.
23. Geoffrion, A., J.S. Dyer and A. Feinberg, "An Interactive Approach for Multi-Criterion Optimization, with an Application to the Operation of an Academic Department" *Management Science* (Vol. 19, 1972), pp. 367-368.
24. Zoints, S. and J. Wallenius, "An Interactive Programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem", *Management Science* (Vol. 22, 1976), pp. 652-663.
25. Sarin, R.K., "Ranking of Multiattribute Alternatives and an Application to Coal Power Plant Siting" in *Multiple Criteria Decision Making: Theory and Applications*, G. Fandel and T.Gal (eds.), Springer Verlag, Berlin, 1980.

26. Baker, K.R., "Priority Dispatching in the Single Channel Queue with Sequence-Dependent Set-ups", *Journal of Industrial Engineering* (Vol. 19, No. 4, 1968).
27. Buffa, E.S. and J.G. Miller, *Production Inventory Systems-Planning and Control*, Third edition, Richard D. Irwin Inc., Homewood, IL, 1979.
28. Conway, R.W., W.L. Maxwell and L.W. Miller, *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1967.
29. Jackson, J.R., "Simulation Research on Job-Shop Production", *Naval Research Logistics Quarterly* (Vol. 4, No. 4, 1957).
30. Rowe, A.J., "Toward a Theory of Scheduling", *Journal of Industrial Engineering* (Vol. 11, No. 2, March 1960).
31. Malstrom, E.M., "A Literature Review and Analysis Methodology for Traditional Scheduling Rules in a Flexible Manufacturing System", *Final Technical Report performed under CAM-I Contract LA-83-FM-01*, 1983.
32. Blackstone, J.H., D.T. Philips and G.L. Hogg, "A State of the Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations", *International Journal of Production Research* (Vol. 20, No. 1, 1982), pp. 27-45.
33. Conway, J.H., B.M. Johnson and W.L. Maxwell, "An Experimental Investigation of Priority Dispatching", *Journal of Industrial Engineering* (Vol. 11, No. 3, 1960).
34. Moodie, C.L. and S.D. Roberts, "Experiments with Priority Dispatching Rules in a Parallel Processor Shop", *The International Journal of Production Research* (Vol. 6, No. 4, 1968).
35. Elvers, D.E., "The Sensitivity of the Relative Effectiveness of Job Shop Dispatching Rules with Various Arrival Distributions", *Transactions of the American Institute of Industrial Engineers* (Vol. 6, 1974), pp. 41.
36. Nanot, Y.R., "An Experimental Investigation and Comparative Evaluation of Priority Disciplines in Job-shop-like Queuing Networks", *Management Sciences Research Project, UCLA*, Research Report No. 87, 1963.
37. Panwalker, Y.R. and W. Iskander, "A Survey of Scheduling Rules", *Operations Research* (Vol. 25, 1977), pp. 48.
38. Rochette, R. and R.P. Sadowski, "A Statistical Comparison of the Performance of Simple Dispatching Rules for a Particular set of Job Shops", *International Journal of Production Research* (Vol. 14, 1976), pp. 63.
39. Wagner, H.M., "An Integer Programming Model for Machine Scheduling", *Naval Logistics Research Quarterly* (Vol. 6, 1959), pp. 131-140.
40. Held, M. and R.M. Karp, "A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* (Vol. 10, 1962), pp. 196-210.
41. Schmidt, M.J., "Schedule Monitoring for Engineering Projects", *IEEE Transactions on Engineering Management* (Vol. 35, No. 2, 1988), pp. 108-114.
42. Fisher, H. and G.L. Thomson, "Probabilistic Learning Combinations of Local Job Shop Scheduling Rules", in *Industrial Scheduling*, edited by J.F. Muth and G.L. Thomson, Prentice-Hall, (1963), pp. 225-251.
43. Gere, W.S. "Heuristics in Job Shop Scheduling", *Management Science* (Vol. 13, 1966), pp. 167-190.
44. Trybula, W.J. and R.G. Ingalls, *Simulation of Hybrid Automation*, General Electric Company, Electronics Automation Application Center, Charlottesville, Virginia, 1985.
45. Wu, S.Y. and R.A. Wysk, "An Application of Discrete-event Simulation to On-line Control and Scheduling in Flexible Manufacturing", *International Journal of Production Research* (Vol. 27, No. 9, 1989), pp. 1603-1623.
46. Mentink, W., B. van der Pluym, B. Goedhart, H. de Swann Arons, and H. Steinen, "Realtime Expert Systems in CIM", *Proceedings of Artificial Intelligence Applications* (1988), pp. 577-581.
47. van der Pluym, B. "Knowledge-based Decision-Making for Job Shop Scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (Vol. 3, No. 6, 1990), pp. 354-363.
48. Chryssolouris, G., "MADEMA: An Approach to Intelligent Manufacturing Systems", *CIM Review* (Spring 1987), pp. 11-17.
49. Chryssolouris, G., K. Wright, J. Pierce and W. Cobb, "Manufacturing Systems Operation: Dispatch Rules Versus Intelligent Control", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (Vol. 4, No. 3/4, 1988), pp. 531-544.
50. Chryssolouris, G., J. Pierce and K. Dicke, "A Decision-Making Approach to the Operation of Flexible Manufacturing Systems", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* (Vol. 4, 1991).

51. Chrysolouris, G ., K. Dicke, M. Lee, "An Approach to Short Interval Scheduling for Discrete Parts Manufacturing", *International Journal of Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 4, No. 3, 1991), pp. 157-168.

LIMS