

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### Περιεχόμενα

|   |           |
|---|-----------|
| <b>9.1. Εισαγωγή στο Χρονικό Προγραμματισμό Παραγωγής.....</b>        | <b>2</b>  |
| <b>9.2. Κέντρο Εργασίας, Εργασίες και Ανθρώπινοι Πόροι.....</b>       | <b>5</b>  |
| 9.2.1 Κέντρο εργασίας.....  | 5         |
| 9.2.2 Διαχείριση κέντρων εργασιών.....                                | 5         |
| 9.2.3 Εργασίες, πόροι, κανόνες/ περιορισμοί και κριτήρια.....         | 6         |
| 9.2.4 Κατηγορίες Εργασιών Και Πόρων.....                              | 7         |
| 9.2.4.1 Κατηγορίες Εργασιών.....                                      | 7         |
| 9.2.4.2 Κατηγορίες Πόρων.....   | 8         |
| 9.2.4.3 Κατηγορίες Προβλημάτων.....                                   | 9         |
| <b>9.3. Λειτουργίες και Στόχοι του Χρονικού Προγραμματισμού.....</b>  | <b>11</b> |
| 9.3.1 Λειτουργίες χρονικού προγραμματισμού.....                       | 11        |
| 9.3.2 Στόχοι χρονικού προγραμματισμού.....                            | 11        |
| 9.3.3 Κριτήρια αξιολόγησης μεθόδων χρονικού προγραμματισμού.....      | 12        |
| <b>9.4. Χρονικός Προγραμματισμός σε job-shop Συστήματα.....</b>       | <b>14</b> |
| 9.4.1 Το πρόβλημα προγραμματισμού N/1 συστημάτων.....                 | 14        |
| 9.4.1.1 Περιγραφή Μεγεθών.....  | 14        |
| 9.4.2 Το Πρόβλημα Προγραμματισμού N/2 Συστήματος.....                 | 24        |
| 9.4.3 Το Πρόβλημα Προγραμματισμού N/M Συστήματος.....                 | 26        |
| 9.4.4 Προγραμματισμός και έλεγχος του φόρτου εργασίας.....            | 28        |
| <b>9.5. Προγραμματισμός σε flow-shop Συστήματα.....</b>               | <b>36</b> |
| 9.5.1 Προγραμματισμός και έλεγχος του φόρτου γραμμής.....             | 36        |
| <b>9.6. Προγραμματισμός Ανθρώπινων Πόρων.....</b>                     | <b>40</b> |
| <b>9.7. Έλεγχος Παραγωγικής Διαδικασίας (Shop Floor Control).....</b> | <b>41</b> |
| 9.7.1 Λειτουργίες του έλεγχου της παραγωγικής διαδικασίας.....        | 41        |
| 9.7.2 Εργαλεία του έλεγχου της παραγωγικής διαδικασίας.....           | 42        |
| <b>9.8. Ερωτήσεις.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>9.9. Παραδείγματα.....</b>   | <b>46</b> |

## 9.1. Εισαγωγή στο Χρονικό Προγραμματισμό Παραγωγής

Τα συστήματα παραγωγής μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα συστήματα συνεχούς ροής (flow-shop), τα συστήματα παραγωγής κατά παραγγελία (job-shop) και τα συστήματα κατασκευής έργων (projects). Εκτός από το στρατηγικό πρόβλημα του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού της δυναμικότητας αυτών των συστημάτων παραγωγής, τίθεται το πρόβλημα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού των απαιτούμενων πόρων, δηλαδή του μηχανολογικού εξοπλισμού, του ανθρώπινου δυναμικού καθώς και των οικονομικών πόρων, ώστε τα συστήματα να εκπληρώνουν τους στόχους τους, ανταποκρινόμενα στη ζήτηση των προϊόντων τους.

Στις επόμενες παραγράφους θα εξεταστεί το ζήτημα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού της παραγωγής στην περίπτωση των δυο πρώτων κατηγοριών συστημάτων παραγωγής, δηλαδή στα συστήματα συνεχούς ροής flow-shop και κατά παραγγελία job-shop. Ο προγραμματισμός συστημάτων κατασκευής έργων (projects) αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι του χρονικού προγραμματισμού δεν θα αναλυθεί στο παρόν κεφάλαιο.

Σε ένα σύστημα, ο προγραμματισμός της γραμμής παραγωγής επηρεάζει άμεσα τη ροή των οικονομικών εισροών στο σύστημα. Ο σωστός χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την αύξηση των οικονομικών εισροών στο σύστημα. Αντίθετα, οι μεγάλες καθυστερήσεις σε ένα σύστημα παραγωγής αποτελούν τροχοπέδη για τα οικονομικά αποτελέσματα. Σε γενικές γραμμές, οι αντικειμενικοί σκοποί του χρονικού προγραμματισμού της παραγωγής είναι:

- η αποτελεσματική χρησιμοποίηση μηχανών και προσωπικού,
- η ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής πελατών, αποθήκευσης και χρόνου εκτέλεσης.

Το κοινό χαρακτηριστικό πολλών προβλημάτων που παρουσιάζονται στον προγραμματισμό παραγωγής, (όπως για παράδειγμα η προετοιμασία μηνιαίου πλάνου παραγωγής μιας αυτοκινητοβιομηχανίας, η διαχείριση πρώτων υλών μιας εταιρείας τροφίμων ή ο προγραμματισμός του συνόλου των πτήσεων μιας μεγάλης αεροπορικής εταιρείας) είναι η επιτακτική ανάγκη για ορθή λήψη ανεξάρτητων στοιχειωδών αποφάσεων, ο συνδυασμός των οποίων θα αποτελέσει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα του προγραμματισμού.

Για την διευκόλυνση στη λήψη των σωστών αποφάσεων, στις περιπτώσεις όπου η υπολογιστική πολυπλοκότητα θεωρείται ως κυρίαρχο χαρακτηριστικό του προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης. Ο αριθμός των εφαρμογών πληροφορικής, οι οποίες περιλαμβάνουν τεχνικές βελτιστοποίησης, αυξάνεται σταθερά. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαρκή τεχνολογική εξέλιξη αλλά και στην αυξανόμενη προσδοκία για ενίσχυση του οπλοστασίου της επιχειρησιακής έρευνας. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης έκαναν την εμφάνισή τους στο πεδίο του διοικητικού προγραμματισμού με την ευρεία χρήση μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού.

Για την δημιουργία και την εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης, κάθε πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού ορίζεται από μια σειρά παραμέτρων, όπως η διαθέσιμη δυναμικότητα του συστήματος, οι απαιτήσεις για παραγωγή, που καθορίζονται από τη ζήτηση των προϊόντων και διάφοροι τεχνολογικοί και άλλοι περιορισμοί. Με βάση αυτές τις παραμέτρους ζητείται η καλύτερη δυνατή τιμή μιας συνάρτησης κόστους (ή οφέλους), δηλαδή η τιμή εκείνη που

αντιστοιχεί στην καλύτερη δυνατή επιλογή των μεταβλητών απόφασης. Οι μεταβλητές απόφασης μπορεί να αφορούν στο μέγεθος μιας παρτίδας παραγωγής, τη σειρά εκτέλεσης των παραγγελιών, την ανάθεση συγκεκριμένων παραγγελιών σε συγκεκριμένες μηχανές κλπ. Έτσι, από ένα σύνολο εφικτών προγραμμάτων, ζητείται το καλύτερο, αν και συχνά ο καθορισμός του είναι ανέφικτος, οπότε το ζητούμενο είναι να βρεθεί ένα πρόγραμμα, το οποίο ικανοποιεί τόσο τους περιορισμούς του προβλήματος (*Feasibility*) όσο κάποια ελάχιστα κριτήρια που απαιτούνται από το χρήστη (*Satisficing*).

Ειδικότερα, για την επίλυση ενός προβλήματος χρονικού προγραμματισμού, απαιτούνται αρχικά πληροφορίες σχετικά με τις απαιτήσεις για την παραγωγή των προϊόντων. Αυτές μπορούν να προκύψουν από τις παραγγελίες των πελατών, εάν αυτές είναι ήδη γνωστές, ή από προβλέψεις για τις μελλοντικές παραγγελίες. Οι απαιτήσεις αυτές μεταφράζονται με τη σειρά τους σε απαιτήσεις για παραγωγικούς πόρους, μέσω των πινάκων υλικών και των φασεολογιών (*Bill Of Resources – BOR*). Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά και ο αριθμός των μηχανών που απαιτούνται, οι διεργασίες και η σειρά που θα γίνουν, οι χρόνοι επεξεργασίας στις μηχανές και οι προθεσμίες παράδοσης των παραγγελιών.

Σημαντικοί παράγοντες στο πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού παραγωγής είναι οι περιορισμοί και οι κανόνες του συστήματος, που αφορούν στη δυναμικότητα του διαθέσιμου παραγωγικού εξοπλισμού, στις απαιτήσεις για τη συντήρηση και το στήσιμο των μηχανών, στην εκπλήρωση των απαιτήσεων που ορίζει η εκάστοτε τεχνολογία των μηχανημάτων και τα δεδομένα του προγράμματος παραγωγής για το συνολικό επίπεδο της παραγωγής, του ανθρώπινου δυναμικού και των αποθεμάτων.

Τέλος, η συνάρτηση κόστους/ οφέλους, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αφορά στην εκπλήρωση δεδομένων κριτηρίων που μπορεί να αναφέρονται στην γρηγορότερη εξυπηρέτηση των πελατών, στο συνολικό κόστος παραγωγής, στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης δυναμικότητας κλπ. Έτσι, ένα πρόγραμμα παραγωγής είναι καλύτερο από ένα άλλο αν το πρώτο ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια που έχουν τεθεί (π.χ. ικανοποιούνται ταχύτερα οι παραγγελίες), σύμφωνα με την τιμή που παίρνει αντίστοιχα η συνάρτηση κόστους/ οφέλους.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων προγραμματισμού που έχουν άμεση σχέση με την επιλογή τεχνικών βελτιστοποίησης για την καλύτερη εκπλήρωση των ζητούμενων κριτηρίων. Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών των εργασιών (*tasks*) που απαιτούνται να εκτελεστούν στο σύστημα, καθώς και των διαθέσιμων πόρων (*resources*) των παραγωγικών συστημάτων και δίνονται σχετικά παραδείγματα πραγματικών προβλημάτων.

Η επίλυση μεγάλων προβλημάτων προγραμματισμού εργασιών σε τακτικό ή επιχειρησιακό επίπεδο απαιτεί την ανάπτυξη συνθετότερων και ευφυέστερων μοντέλων, τυπικά παραδείγματα των οποίων είναι τα μοντέλα χρονοδρομολόγησης (*scheduling*) και προγραμματισμού διαδρομής (*routing*). Προβλήματα βραχυπρόθεσμου ορίζοντα, είναι δυνατό να αντιστοιχούν σε μοντέλα με τεράστιο αριθμό περιορισμών, εξαιρετικά υψηλή πολυπλοκότητα και μη γραμμικότητα. Πολλές από τις μεταβλητές είναι δυνατό να είναι διακριτές (ακέραιες ή δυαδικές), οπότε η επίλυση καθίσταται περαιτέρω δυσχερής. Μοντέλα αυτού του είδους, που βασίζονται σε διακριτές μεταβλητές, κατατάσσονται στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης αντιπροσωπεύουν αποφάσεις «ναι/όχι» ή άλλη πιθανή εκλογή διακριτών

εναλλακτικών. Η ανάλυση της δομής των προβλημάτων αυτών δεν θα αναλυθεί σε αυτό το κεφάλαιο.

## 9.2. Κέντρο Εργασίας, Εργασίες και Ανθρώπινοι Πόροι

### 9.2.1 Κέντρο εργασίας

Κέντρο εργασίας μιας επιχείρησης ονομάζεται η περιοχή στην οποία οργανώνονται οι παραγωγικοί πόροι και πραγματοποιούνται οι εργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή. Το κέντρο εργασίας μπορεί να είναι μία μεμονωμένη μηχανή, ένα σύνολο μηχανών ή περιοχή στην οποία μία συγκεκριμένη εργασία λαμβάνει χώρα. Σε ένα σύστημα job-shop, τα κέντρα εργασίας οργανώνονται ανάλογα με τις διεργασίες που εκτελούνται, ενώ σε ένα σύστημα flow-shop ανάλογα με τα προϊόντα. Στην περίπτωση ενός συστήματος job-shop, οι εργασίες δρομολογούνται μεταξύ λειτουργικά οργανωμένων κέντρων εργασίας, έτσι ώστε οι διεργασίες να εκτελεστούν σύμφωνα με τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

### 9.2.2 Διαχείριση κέντρων εργασιών

Οι μέθοδοι διαχείρισης των κέντρων εργασίας, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των μεθόδων προγραμματισμού που εφαρμόζονται, μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πρώτη κατηγοριοποίηση που ισχύει σχετίζεται με το πως η δυναμικότητα του συστήματος επηρεάζει τον προγραμματισμό. Έτσι διαχωρίζονται σε συστήματα απεριόριστης φόρτωσης (infinite loading) και συστήματα πεπερασμένης φόρτωσης (finite loading). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα εκείνα στα οποία δεν λαμβάνεται υπόψη αν υπάρχει η απαιτούμενη διαθεσιμότητα πόρων στο σύστημα για την ολοκλήρωση της εργασίας. Επίσης, δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε και η επικείμενη δρομολόγηση της εργασίας στους διάφορους πόρους του συστήματος. Συχνά, το μόνο που εκτελείται είναι ένας απλός έλεγχος για την διαθεσιμότητα των πιο σημαντικών πόρων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εργασίας και για το κατά πόσο μπορούν να αντεπεξέλθουν στην ολοκλήρωση της παραγωγής. Αυτό μπορεί να εκτιμηθεί, προσεγγίζοντας το χρόνο εκτέλεσης της εργασίας από τους πόρους καθώς και το χρόνο προετοιμασίας των πόρων. Συνολική εκτίμηση του χρόνου ολοκλήρωσης της εργασίας μπορεί να γίνει μόνο προσεγγιστικά λαμβάνοντας υπόψη τους δύο αυτούς χρόνους.

Στην δεύτερη κατηγορία, των συστημάτων πεπερασμένης φόρτωσης, μελετάται λεπτομερώς ο προγραμματισμός των πόρων του συστήματος για την εκτέλεση της εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη τους χρόνους που απαιτούνται από τους πόρους για την εκτέλεση της εργασίας, αλλά και τους χρόνους προετοιμασίας των πόρων. Στην πράξη, καθορίζονται επακριβώς τι θα εκτελείται και από ποιόν πόρο του συστήματος, ανά πάσα στιγμή. Θεωρητικά, σε ένα τέτοιο σύστημα, οι εργασίες που δρομολογούνται στο σύστημα είναι πάντα εφικτό να εκτελεστούν σύμφωνα με τον προγραμματισμό που έχει γίνει γι' αυτές.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση που εφαρμόζεται σχετίζεται με το αν ο προγραμματισμός μιας εργασίας γίνεται «προς τα εμπρός» (forward) ή «προς τα πίσω» (backward) στο χρόνο. Στην περίπτωση του «προς τα εμπρός» προγραμματισμού, ο οποίος είναι και ο πιο κοινά εφαρμοσμένος, το σύστημα παίρνει μία εργασία και στη συνέχεια προγραμματίζεται κάθε διεργασία που απαιτείται να ολοκληρωθεί προς τα εμπρός στο χρόνο. Σε ένα τέτοιο σύστημα,

αυτό που μπορεί να προβλεφθεί είναι η νωρίτερη ημερομηνία που μπορεί η εργασία να έχει ολοκληρωθεί.

Αντίθετα, στην περίπτωση του «προς τα πίσω» προγραμματισμού, ο προγραμματισμός αρχίζει από μία ημερομηνία στο μέλλον, η οποία συνήθως είναι η απαιτούμενη ημερομηνία παράδοσης και προγραμματίζονται οι διεργασίες που πρέπει να εκτελεστούν με αντίστροφη φορά προς τα πίσω στο χρόνο. Σε ένα τέτοιο σύστημα, αυτό που μπορεί να προβλεφθεί είναι πια ημερομηνία πρέπει να αρχίσει ένα σύστημα έτσι ώστε να έχει ολοκληρωθεί την απαιτούμενη ημερομηνία παράδοσης.

Μία τελευταία κατηγοριοποίηση των μεθόδων διαχείρισης ενός κέντρου εργασίας σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα σε πόρους που διαθέτει το κέντρο. Συγκεκριμένα, είναι σημαντικό να είναι γνωστό για τον προγραμματισμό του συστήματος εάν το κέντρο θεωρείται ότι είναι πιο πιθανό να έχει περιορισμούς από διαθεσιμότητα σε μηχανήματα (*machine limited*) σε σχέση με το ανθρώπινο δυναμικό ή το αντίστροφο (*labor limited*). Στην πράξη, τα περισσότερα συστήματα ανήκουν σε μία από τις δύο περιπτώσεις και πολύ σπάνια ισχύουν και οι δύο περιορισμοί.

### 9.2.3 Εργασίες, πόροι, κανόνες/ περιορισμοί και κριτήρια

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης του χρονικού προγραμματισμού σε ένα σύστημα αφορούν, εν γένει, στην επίτευξη παραγωγικών στόχων, κατά τον βέλτιστο τρόπο, με την ταυτόχρονη τήρηση ενός συνόλου περιορισμών. Στη γενική περίπτωση ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει:

- Εργασίες, οι οποίες πρέπει να περατωθούν.
- Πόρους, οι οποίοι απαιτούνται για την εκτέλεση των εργασιών.
- Κανόνες και περιορισμούς, οι οποίοι ανταποκρίνονται σε φυσικά/ παραγωγικά/ λειτουργικά/ οργανωτικά, κ.α. χαρακτηριστικά του προβλήματος και ορίζουν τον τρόπο παραγωγής των εργασιών.
- Κριτήρια, τα οποία επιτρέπουν την αξιολόγηση κάθε προτεινόμενης λύσης.

Κοινά παραδείγματα εργασιών είναι η παραγωγή αγαθών, οι υπηρεσίες και οποιοδήποτε σύνολο επικερδών ή αναγκαίων δράσεων.

Ως παράδειγμα πόρων αναφέρονται οι μηχανές, οι άνθρωποι, οι πρώτες ύλες, οι διαστάσεις (χωρητικότητες, όγκους, εμβαδά, αποστάσεις κ.λπ.) και ο χρόνος. Οι πόροι προς εκτέλεση των εργασιών είναι ως επί το πλείστον πεπερασμένοι, απαιτείται συνεπώς ελαχιστοποίηση της άσκοπης χρήσης τους.

Τόσο οι κανόνες/ περιορισμοί όσο τα κριτήρια είναι στενά συνυφασμένοι με τη φύση του προβλήματος και δεν κατηγοριοποιούνται συστηματικά. Πολλές φορές κάποιοι περιορισμοί ενδέχεται να λειτουργούν ως κριτήρια και το αντίστροφο. Σε αλγοριθμικό επίπεδο η ύπαρξη πολλών περιορισμών διευκολύνει την εύρεση λύσης καθώς ορίζει αυστηρά την αλληλεξάρτηση των τιμών των μεταβλητών του προβλήματος, περιορίζοντας σημαντικά το χώρο πιθανών λύσεων.

Τέλος, τα κριτήρια ενσωματώνουν τις προτιμήσεις και επιθυμίες της διοίκησης σχετικά με τη παραγωγή. Επίσης, επιτρέπουν την αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων. Κάποιες φορές οι ασθενείς περιορισμοί και τα κριτήρια είναι εναλλάξιμα, π.χ. η επιθυμία σεβασμού των

ημερομηνιών παραγωγής και παράδοσης (*deadline*) ενός προϊόντος μπορεί να θεωρηθεί ταυτόχρονα περιορισμός της παραγωγικής διαδικασίας αλλά και κριτήριο αξιολόγησης του προτεινόμενου πλάνου παραγωγής. Η επιλογή για το αν μια προτίμηση εμφανίζεται ως περιορισμός ή κριτήριο, ανήκει στη διοίκηση.

## **9.2.4 Κατηγορίες Εργασιών Και Πόρων**

### **9.2.4.1 Κατηγορίες Εργασιών**

Οι εργασίες σε ένα σύστημα μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

#### **1. Συνεχείς / Διακριτές**

Συνεχείς είναι οι εργασίες οι οποίες είναι μετρήσιμες σε συνεχή κλίμακα (π.χ. παραγωγή λιγνίτη), ενώ αντίθετα διακριτές είναι οι εργασίες, όπως η παραγωγή ενός αυτοκινήτου, η μεταφορά αγαθού σε πελάτη, η κατάληψη ή όχι χώρου σε αποθήκη, οι οποίες αποτελούν ξεχωριστές διαδικασίες και είτε εκτελούνται είτε όχι.

#### **2. Χρονικά Εξαρτημένες / Ανεξάρτητες**

Η πλειονότητα των εργασιών είναι χρονικά εξαρτημένες. Μερικές είναι σταθερές στο χρόνο, όπως ο καθορισμός πτήσεων μιας αεροπορικής εταιρείας. Άλλες απαιτούν, απλώς, συγκεκριμένο χρόνο εκτέλεσης, όπως η βάρδια ενός εργαζόμενου ή η ανάθεση διδασκαλίας μαθημάτων σε καθηγητή. Υπάρχουν, παράλληλα, εργασίες που συνδέονται χρονικά με άλλες και εκτελούνται αναγκαστικά πριν ή μετά από αυτές. Χρονικά ανεξάρτητες είναι εργασίες όπως η βελτιστοποίηση κοπής πρώτης ύλης όπου δεν υφίσταται έννοια χρονικών περιορισμών.

#### **3. Χωρικά Εξαρτημένες / Ανεξάρτητες**

Χωρικά εξαρτημένες είναι οι εργασίες που εκτελούνται σε συγκεκριμένη τοποθεσία ή αφορούν στη μεταβολή τοποθεσίας (μεταφορές). Ενώ, χωρικά ανεξάρτητες ονομάζονται οι εργασίες όπως τη δημιουργία χαρτοφυλακίου ή τον προγραμματισμό παραγωγής που είναι εν γένει ανεξάρτητες της τοποθεσίας εκτέλεσης.

#### **4. Διακοπτόμενες / Μη-διακοπτόμενες**

Διακοπτόμενες είναι οι εργασίες που είναι δυνατό να διακοπούν ανά πάσα στιγμή και να συνεχιστούν αργότερα. Κατά την εκτέλεση των εργασιών αυτών είναι δυνατή η αντικατάσταση, ανανέωση ή αφαίρεση πόρων. Η μεταφορά ενός αγαθού αποτελεί περίπτωση διακοπτόμενης εργασίας καθώς επιτρέπεται η μεταφορά αγαθών από ένα όχημα σε άλλο ή η ταυτόχρονη παράδοση αγαθών σε άλλους πελάτες. Αντίθετα, μη διακοπτόμενες είναι οι εργασίες που δεν είναι δυνατό να διακοπούν μετά την έναρξη τους. Ως τυπικό παράδειγμα αναφέρεται η επεξεργασία υλικών από μηχανές και η ενοίκιαση αυτοκινήτων σε πελάτες.

### **5. Εφάπαξ / Επαναλαμβανόμενες**

Εφάπαξ ονομάζονται οι εργασίες, οι οποίες εκτελούνται μία φορά κατά τη λύση του προβλήματος. Ως παράδειγμα αναφέρεται ο σχεδιασμός προγραμμάτων τοπικών συγκοινωνιών. Ακόμη κι αν τα δρομολόγια είναι επαναλαμβανόμενα, κάθε περίοδος αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστό πρόβλημα με εφάπαξ εργασίες. Επαναλαμβανόμενες είναι οι εργασίες που εκτελούνται κυκλικά σε τακτά χρονικά διαστήματα και συνήθως απαιτείται ο βέλτιστος σχεδιασμός του κύκλου, σε συνάρτηση με τις προηγούμενες και τις μελλοντικές εκτελέσεις. Βασικό χαρακτηριστικό των εργασιών αυτών είναι πως απαιτείται επαναφορά στην αρχική κατάσταση (αρχή κύκλου). Ως τυπικό παράδειγμα αναφέρεται προγραμματισμός συσκευών ανύψωσης (hoist scheduling).

#### **9.2.4.2 Κατηγορίες Πόρων**

##### **1. Σταθεροί/ Εναλλάξιμοι**

Σταθεροί ονομάζονται οι πόροι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την εκτέλεση μιας εργασίας και δεν υπάρχει περίπτωση μεταβολής ή αντικατάστασης τους. Ως παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση προβλημάτων job-shop όπου κάθε εργασία εκτελείται από συγκεκριμένο τύπο πόρων. Αντίθετα, εναλλάξιμοι είναι οι πόροι οι οποίοι μπορούν να αντικατασταθούν από άλλους προκειμένου να εκτελεστεί εργασία. Ως παράδειγμα αναφέρεται η αερομεταφορά φορτίων ή επιβατών η οποία μπορεί να εκτελεστεί από αεροπλάνα συγκεκριμένης δυναμικότητας αλλά δεν απαγορεύεται η χρήση ενός μεγαλύτερου σκάφους προκειμένου να εκτελεστούν με συνέπεια το δρομολόγιο.

##### **2. Ανανεώσιμοι/ Αναλώσιμοι/ Μεταβλητής κατάστασης**

Ανανεώσιμοι είναι οι πόροι οι οποίοι είναι διαθέσιμοι αμέσως μετά την εκτέλεση μιας εργασίας, π.χ. οι μηχανές ενός flow-shop προβλήματος. Ενώ, αναλώσιμοι είναι οι πόροι, οι οποίοι καταναλώνονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μιας εργασίας (καύσιμα, πρώτες ύλες, ανθρωπόωρες, κ.λ.π.) και δεν είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση τους. Τέλος, μεταβλητής κατάστασης είναι οι πόροι οι οποίοι αλλάζουν κατάσταση μετά την εκτέλεση μιας εργασίας. Τέτοιοι πόροι χρησιμοποιούνται σε μοντελοποίηση προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού όπου η αρχική κατάσταση του πόρου παίζει κρίσιμο ρόλο για τη μετέπειτα ανάθεση του σε εργασίες. Επίσης σε προβλήματα μεταφοράς όπου απαιτείται ο πόρος να επιστρέψει στο σημείο εκκίνησης ενώ η θέση του αλλάζει με την εκτέλεση κάθε εργασίας παράδοσης.

##### **3. Απλοί/ Πολλαπλοί**

Απλοί ονομάζονται οι πόροι οι οποίοι μοντελοποιούνται ξεχωριστά και διακριτά όπως για παράδειγμα στην περίπτωση δρομολόγησης ενός οχήματος. Αντίθετα, πολλαπλοί ονομάζονται οι πόροι, οι οποίοι μοντελοποιούνται μαζί, όπως για παράδειγμα στην κατάσταση εβδομαδιαίου προγράμματος μαθημάτων, όπου η επιλογή ώρας, καθηγητή και αίθουσας σχετίζονται άμεσα.



### **9.2.4.3 Κατηγορίες Προβλημάτων**

Η προαναφερθείσα ταξινόμηση μπορεί να διευκολύνει την ανάλυση των χαρακτηριστικών των προβλημάτων που εμφανίζονται στην παραγωγή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται στον πίνακα 9.1 που ακολουθεί:

|   | ΕΡΓΑΣΙΑ  |                               |                   |                 |                  | ΠΟΡΟΙ     |             |                       |
|---|----------|-------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------|-------------|-----------------------|
| <b>Βελτιστοποίηση ανάμιξης υλικών</b>                         | Συνεχής  | Ανεξάρτητη χρονικά και χωρικά | Εφάπαξ            |                 |                  | Πολλαπλοί | Σταθεροί    | Αναλώσιμοι            |
| <b>Βελτιστοποίηση κοπής υλικών</b>                            | Συνεχής  | Ανεξάρτητη χρονικά και χωρικά | Εφάπαξ            |                 |                  | Απλοί     | Σταθεροί    | Μεταβλητής κατάστασης |
| <b>Πρόβλημα πλανόδιου πωλητή (Traveling salesman problem)</b> | Διακριτή | Χρονικά ανεξάρτητη            | Χωρικά εξαρτημένη | Εφάπαξ          |                  | Απλοί     | Σταθεροί    | Μεταβλητής κατάστασης |
| <b>Δρομολόγηση στόλου οχημάτων</b>                            | Διακριτή | Χρονικά ανεξάρτητη            | Χωρικά εξαρτημένη | Διακοπτόμενη    | Εφάπαξ           | Πολλαπλοί | Εναλλάξιμοι | Μεταβλητής κατάστασης |
| <b>Προγραμματισμός προσωπικού</b>                             | Διακριτή | Χρονικά εξαρτημένη            | Χωρικά εξαρτημένη | Εφάπαξ          |                  | Απλοί     | Εναλλάξιμοι | Μεταβλητής κατάστασης |
| <b>Προγραμματισμός Job-Shop</b>                               | Διακριτή | Χρονικά εξαρτημένη            | Χωρικά ανεξάρτητη | Μη διακοπτόμενη | Εφάπαξ           | Απλοί     | Εναλλάξιμοι | Ανανεώσιμοι           |
| <b>Προγραμματισμός συσκευών ανύψωσης (Hoist scheduling)</b>   | Διακριτή | Χρονικά εξαρτημένη            | Χωρικά εξαρτημένη | Μη διακοπτόμενη | Επαναλαμβανόμενη | Απλοί     | Εναλλάξιμοι | Μεταβλητής κατάστασης |

Πίνακας 9.1 – Πίνακας Κατηγοριών Προβλημάτων

## 9.3. Λειτουργίες και Στόχοι του Χρονικού Προγραμματισμού

### 9.3.1 Λειτουργίες χρονικού προγραμματισμού

Έστω ένα σύστημα παραγωγής στο οποίο θα εφαρμοστεί χρονικός προγραμματισμός για τις διάφορες διεργασίες και πόρους που περικλείει. Οι λειτουργίες που πρέπει να εκτελεστούν για την εφαρμογή του προγραμματισμού μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

- Ανάθεση παραγγελιών, εξοπλισμού και ανθρωπίνων πόρων στο κέντρο εργασίας, το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των εργασιών
- Καθορισμός της σειράς εκτέλεσης των εργασιών (δρομολόγηση) καταρτίζοντας τις προτεραιότητες για τις εργασίες στο σύστημα.
- Κατανομή της εκτέλεσης των προγραμματισμένων εργασιών (*dispatching*).
- Έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας (*shop-floor control*), η οποία περιλαμβάνει:
  - α) Ανάλυση της κατάστασης και έλεγχος της εξέλιξης των εργασιών κατά τη διάρκεια που αυτές εκτελούνται.
  - β) Επίσπευση καθυστερημένων και κρίσιμων εργασιών.

Σε ένα κέντρο εργασίας, ο υπεύθυνος για τον χρονικό προγραμματισμό του συστήματος αρχικά επιλέγει και ταξινομεί τις διαθέσιμες εργασίες στις διάφορες θέσεις εργασίας του κέντρου. Οι αποφάσεις του υπευθύνου πρέπει να είναι βασισμένες στις λειτουργίες και στις απαιτήσεις δρομολόγησης της κάθε εργασίας, στην κατάσταση των υπαρχόντων εργασιών σε κάθε θέση εργασίας, στο χρόνο αναμονής που υπάρχει σε κάθε θέση, στις προτεραιότητες που χαρακτηρίζουν τις εργασίες, στην διαθεσιμότητα των υλικών, σε πιθανές εισόδους νέων εργασιών στο σύστημα και φυσικά στους διαθέσιμους πόρους του κέντρου εργασίας σε εξοπλισμό και σε ανθρώπινο δυναμικό.

### 9.3.2 Στόχοι χρονικού προγραμματισμού

Οι στόχοι του χρονικού προγραμματισμού σε ένα κέντρο εργασίας συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Σεβασμός προθεσμιών για τις ημερομηνίες παράδοσης (*Due Dates*).
- Ελαχιστοποίηση του μέσου χρόνου παραγωγής μιας παρτίδας ή μιας παραγγελίας (*Lead Time*).
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου ή κόστους προετοιμασίας και ρύθμισης του εξοπλισμού του κέντρου (*Setup Time*)
- Ελαχιστοποίηση των εκκρεμούντων εργασιών στο σύστημα (*Work in Progress – WIP*)
- Μεγιστοποίηση χρησιμοποίησης εξοπλισμού ή ανθρώπινου δυναμικού (*Machine or Labor Utilization*).

### 9.3.3 Κριτήρια αξιολόγησης μεθόδων χρονικού προγραμματισμού

Η διαδικασία καθορισμού της αλληλουχίας με την οποία οι εργασίες εκτελούνται στα κέντρα εργασίας είναι γνωστή ως δρομολόγηση εργασιών. Οι κανόνες προτεραιότητας είναι οι κανόνες που χρησιμοποιούνται για να προκύψει μία σειρά εκτέλεσης των εργασιών. Αυτοί οι κανόνες μπορεί να είναι απλοί και να απαιτούν την σύγκριση ενός μόνο χαρακτηριστικού των εργασιών όπως για παράδειγμα την απαιτούμενη ημερομηνία παράδοσής τους, ή να είναι εξίσου απλοί αλλά να απαιτούν τις πράξεις μεταξύ κάποιων χαρακτηριστικών των εργασιών όπως την αφαίρεση του απαιτούμενο χρόνου επεξεργασίας τους από την απαιτούμενη ημερομηνία παράδοσής τους, ή και τέλος να είναι υπολογιστικές μέθοδοι που θεωρούνται πιο περίπλοκοι. Οι σημαντικότεροι από αυτούς τους κανόνες περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Για την αξιολόγηση διαφόρων κανόνων προτεραιότητας των εργασιών, ώστε να προκύψει ο καλύτερος δυνατός, χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια απόδοσης, τα οποία εξαρτώνται από τον επιθυμητό στόχο του συστήματος. Συχνά μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα περισσότερα από ένα κριτήρια. Γενικά στον προγραμματισμό ενός παραγωγικού συστήματος, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, είναι επιθυμητή η καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών και η βέλτιστη εκμετάλλευση των παραγωγικών πόρων του. Τα κριτήρια απόδοσης που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση των εργασιών στο σύστημα είναι τα εξής:

#### **1. Μέσος χρόνος ροής.**

Το κριτήριο αυτό μετράει το μέσο χρόνο που δαπανά μια εργασία στο σύστημα. Το κριτήριο χρησιμοποιείται όταν επιδιώκεται γρήγορη εκτέλεση των εργασιών και τήρηση χαμηλών αποθεμάτων.

#### **2. Μέση βραδύτερη περάτωση.**

Το κριτήριο μετράει το μέσο χρόνο των καθυστερήσεων στην εκτέλεση των εργασιών σε σχέση με τους απαιτούμενους από τον πελάτη χρόνους παράδοσης. Χρησιμοποιείται με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η συνολική επιβάρυνση του συστήματος λόγω υπέρβασης των χρόνων αυτών. Συνήθως υπάρχει κάποια ποινή, π.χ. με τη μορφή ποινικών ρητρών, για κάθε χρονική μονάδα καθυστέρησης.

#### **3. Μέσος χρόνος αναμονής.**

Το κριτήριο αυτό μετράει το μέσο χρόνο αναμονής που δαπανά μια εργασία στο σύστημα μέχρι να αρχίσει η επεξεργασία της. Το κριτήριο χρησιμοποιείται όταν ενδιαφέρει η ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής των εργασιών και των αποθεμάτων πρώτων υλών.

#### **4. Μέγιστη βραδύτερη περάτωση.**

Το κριτήριο παίρνει υπόψη του τη μέγιστη από τις καθυστερήσεις στην εκτέλεση των εργασιών και είναι χρήσιμο όταν η ποινή για κάθε χρονική μονάδα καθυστέρησης αυξάνει με το χρόνο καθυστέρησης.

#### **5. Αριθμός αργοπορημένων εργασιών.**

Το κριτήριο μετράει το πλήθος των εργασιών, των οποίων η εκτέλεση ολοκληρώνεται μετά από την ημερομηνία παράδοσης τους, και ενδιαφέρει όταν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των δυσαρεστημένων πελατών λόγω καθυστερήσεων.

Εκτός από τα παραπάνω κριτήρια χρησιμοποιούνται και άλλα, μεταξύ των οποίων και εκείνα που αναφέρονται ειδικότερα στην καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος, δηλαδή την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού και των μηχανών, καθώς και εκείνα που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους των ενδιάμεσων αποθεμάτων (*WIP*). Τα κριτήρια αυτά ενδιαφέρουν όταν ο αντίστοιχος πόρος έχει ιδιαίτερα υψηλή αξία ή είναι κρίσιμος για την παραγωγική διαδικασία, όπως για παράδειγμα η μισθοδοσία του ανθρώπινου δυναμικού σε συστήματα παροχής υπηρεσιών ή ένα ακριβό μηχάνημα σε σύστημα παραγωγής προϊόντων.

## 9.4. Χρονικός Προγραμματισμός σε job-shop Συστήματα

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί το ζήτημα του προγραμματισμού της παραγωγής στην περίπτωση των δυο βασικών κατηγοριών συστημάτων παραγωγής, δηλαδή των κατά παραγγελία (*job-shop*) και συνεχούς ροής (*flow-shop*). Αρχικά, θα εξεταστεί η περίπτωση των συστημάτων *job-shop*. Ο χρονικός προγραμματισμός παραγωγής σε τέτοια συστήματα αποτελεί μια εκτεταμένη περιοχή έρευνας, όπου τα προβλήματα που τίθενται χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας, τέτοιο που καθιστά πολλές φορές αδύνατη ή εξαιρετικά δυσχερή την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης. Ο βαθμός πολυπλοκότητας αυξάνει εκθετικά με το πλήθος των μηχανών, δηλαδή των μέσων παραγωγής όπου διεκπεριώνεται μια φάση της παραγωγικής διαδικασίας, όπως και με τον αριθμό των φάσεων που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Επίσης, αυξάνει με τον αριθμό των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση των εναλλακτικών προγραμμάτων.

### 9.4.1 Το πρόβλημα προγραμματισμού N/1 συστημάτων

#### 9.4.1.1 Περιγραφή Μεγεθών

Το πρώτο πρόβλημα που θα εξεταστεί είναι αυτό του χρονικού προγραμματισμού παραγωγής που αφορά στην εκτέλεση N εργασιών από ένα επεξεργαστή. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί μπορεί να θεωρηθεί ως δομικό στοιχείο γενικότερων, πιο πολύπλοκων προβλημάτων.

Για την εξέταση του προβλήματος ορίζονται τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση και ανάλυσή του:

Έστω ένα σύνολο N ανεξάρτητων εργασιών  $J_i \{i=1, \dots, n\}$  που θα εκτελεστούν από το μοναδικό επεξεργαστή του συστήματος. Για κάθε εργασία  $i$  έστω:

$T_{now}(i)$ : τρέχουσα χρονική στιγμή

$T_{επεξ}(i)$ : χρόνος εκτέλεσης

$T_s(i)$ : χρονική στιγμή έναρξης της εργασίας

$T_e(i)$ : χρονική στιγμή ολοκλήρωσης ( $T_s + T_{επεξ}$ ) της εργασίας

$T_r(i)$ : χρόνος που απομένει για την ολοκλήρωση της εργασίας ( $T_e - T_{now}$ )

$T_{dl}(i)$ : καθορισμένος χρόνος παράδοσης της εργασίας

$T_a(i)$ : χρονική στιγμή που είναι διαθέσιμη ή που φτάνει η εργασία στο σύστημα

$T_f(i)$ : χρόνος ροής, δηλαδή ο συνολικός χρόνος από την χρονική στιγμή άφιξης της εργασίας στο σύστημα μέχρι την ολοκλήρωσης της ( $T_e - T_a$ )

$T_q(i)$ : ο χρόνος αναμονής της εργασίας στο σύστημα μέχρι να αρχίσει η επεξεργασία της ( $T_s - T_a$ )

$T_i(i)$ : η απόκλιση της χρονικής στιγμής της ολοκλήρωσης μιας εργασίας σε σχέση με τον καθορισμένο χρόνο παράδοσης ( $T_e - T_{di}$ )

Ο χρόνος εκτέλεσης  $T_{επεξ}$  κάθε εργασίας είναι το χρονικό διάστημα (π.χ. ημέρες) που απαιτείται για να εκτελεστεί η εργασία. Γενικά, θεωρείται σταθερός στο πρόβλημα, αν και συχνά στην πράξη είναι μεταβλητός. Μία συνηθισμένη παραδοχή, για το χρόνο άφιξης της εργασίας στον σύστημα, είναι ότι όλες οι εργασίες φτάνουν στο σύστημα ή είναι διαθέσιμες στο σύστημα προς εκτέλεση τη χρονική στιγμή  $t=0$ , επομένως είναι  $T_a=0$  για κάθε εργασία  $i$ . Σε αυτήν την περίπτωση, ισχύει επίσης ότι ο χρόνος αναμονής της εργασίας στο σύστημα  $T_q$  ισούται με τη χρονική στιγμή έναρξης της εργασίας  $T_s$  λόγω της ταυτόχρονης άφιξης όλων των εργασιών τη στιγμή  $t=0$ . Γενικά, κάθε εργασία αναμένει στο σύστημα για ένα διάστημα  $T_q$  μέχρι να αρχίσει η εκτέλεση της, επομένως η εργασία που θα εκτελεστεί πρώτη έχει χρόνο αναμονής μηδενικό, ενώ η δεύτερη έχει χρόνο αναμονής ίσο με το χρόνο εκτέλεσης της πρώτης, η τρίτη ίσο με το άθροισμα του χρόνου εκτέλεσης της πρώτης και της δεύτερης κ.ο.κ. Ισχύει δηλαδή ότι, αν της εργασίας  $k$  προηγούνται οι εργασίες  $1,2,\dots,k-1$ , τότε:

$$T_q(k) = T_{επεξ}(1) + T_{επεξ}(2) + \dots + T_{επεξ}(k-1)$$

Ο χρόνος παράδοσης  $T_{di}$  είναι η ημερομηνία που απαιτείται να παραδοθεί η παραγγελία στον πελάτη και ορίζεται από τον πελάτη ή από το σύστημα. Από την ημερομηνία άφιξης  $T_a$  μιας εργασίας μέχρι την ημερομηνία ολοκλήρωσης της εκτέλεσής της  $T_e$  μεσολαβεί ένα διάστημα  $T_f$ , το οποίο ονομάζεται χρόνος ροής για την εργασία αυτή. Ισχύει, επομένως,  $T_f = T_e - T_a$  και επειδή συνήθως  $T_a=0$ , είναι  $T_f = T_e$ . Ισχύει επίσης ότι  $T_q = T_f - T_{επεξ}$ . Η χρονική στιγμή της ολοκλήρωσης  $T_e$  της εκτέλεσης μιας εργασίας δεν συμπίπτει πάντα με τον απαιτούμενο χρόνο παράδοσής της, αν και για ένα σύστημα παραγωγής αυτό είναι το επιθυμητό. Συχνά υπάρχει απόκλιση, είτε για κάποιους αντικειμενικούς λόγους, όπως για παράδειγμα την ταυτόχρονη άφιξη μεγάλου αριθμού εργασιών, είτε ακόμα και λόγω κακού προγραμματισμού. Τότε, υπάρχει υπέρβαση του χρόνου παράδοσης κατά ένα χρονικό διάστημα  $T_i$ . Μπορεί επίσης μια εργασία να ολοκληρωθεί νωρίτερα από την ημερομηνία που έχει συμφωνηθεί να παραδοθεί. Και στις δύο περιπτώσεις προκύπτει ένα κόστος για το σύστημα. Στην πρώτη περίπτωση, της βραδύτερης ολοκλήρωσης, δεν τηρείται η συμφωνία με τον πελάτη, πράγμα που συνεπάγεται συνήθως ένα κόστος φερεγγυότητας για το σύστημα ή ακόμη και καταβολή κάποιων ποινικών ρητρών. Στη δεύτερη περίπτωση, της νωρίτερης ολοκλήρωσης, προκύπτει το κόστος αποθέματος που συνδέεται με το γεγονός ότι η συγκεκριμένη εργασία παραμένει στο σύστημα κατά το χρονικό διάστημα που απομένει μέχρι τη συμφωνηθείσα χρονική στιγμή παράδοσης.

Το ζητούμενο στο πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού παραγωγής της εκτέλεσης  $N$  εργασιών από έναν επεξεργαστή είναι η δρομολόγηση των εργασιών, έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια απόδοσης, που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Κατά βάση, γίνεται επιλογή ποιο κριτήριο απόδοσης θα πρέπει να εκπληρωθεί, και όχι η ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των κριτηρίων, κάτι το οποίο δεν

είναι άλλωστε εφικτό συνήθως. Αν το σύνολο των εργασιών είναι  $N$ , όπως αναφέρθηκε, τότε μπορεί να υπάρξει ένα σύνολο  $n!$  διαφορετικών διατάξεων για την εκτέλεση των εργασιών. Ζητείται, δηλαδή να προσδιοριστούν από αυτό το σύνολο, εκείνες οι διατάξεις που ικανοποιούν καλύτερα τα κριτήρια. Για την επίλυση του προβλήματος γίνονται συνήθως οι εξής παραδοχές:

- Ο χρόνος προετοιμασίας (*setup time*) του επεξεργαστή περιλαμβάνεται στο χρόνο εκτέλεσης της εργασίας και είναι ανεξάρτητος της σειράς εκτέλεσης των εργασιών.
- Ο επεξεργαστής είναι συνεχώς διαθέσιμος, δηλαδή δεν συμβαίνουν βλάβες ή άλλες διακοπές της παραγωγής.
- Η εκτέλεση κάθε εργασίας δεν διακόπτεται, δηλαδή αν αρχίσει η εκτέλεση της συνεχίζει μέχρι να ολοκληρωθεί.

Για την αξιολόγηση των κανόνων προτεραιότητας που θα περιγραφούν παρακάτω θα εφαρμοστούν τα κριτήρια απόδοσης που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έχοντας τώρα προσδιορίσει τα διάφορα μεγέθη, τα κριτήρια απόδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εφαρμόζοντας του παρακάτω τύπους:

1. Μέσος χρόνος ροής: 
$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_f$$

2. Μέση βραδύτερη περατώση:  $T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ , όπου  $T_i$  αντιστοιχεί μόνο στις βραδύτερες περατώσεις και όχι στις νωρίτερες.

3. Μέσος χρόνος αναμονής: 
$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_q$$

4. Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση:  $T_{\max} = \max\{T_i\}$ , όπου  $T_i$  αντιστοιχεί μόνο στις βραδύτερες περατώσεις και όχι στις νωρίτερες. Και,

5. Αριθμός καθυστερημένων εργασιών:  $N_T$



#### 9.4.1.2 Κανόνες Προτεραιότητας

Για τη δρομολόγηση των εργασιών χρησιμοποιούνται στην πράξη και έχουν μελετηθεί διάφοροι κανόνες, που έχουν διαφορετικές επιδόσεις σε σχέση με τα κριτήρια απόδοσης. Οι συνηθέστεροι κανόνες είναι:

1. *Κανόνας της σειράς άφιξης στο σύστημα (FCFS: First Come, First Served)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες αυτές που φτάνουν πρώτες στο σύστημα.
2. *Κανόνας του ελάχιστου χρόνου επεξεργασίας (SPT: Shortest Processing Time)*. Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες με το μικρότερο χρόνο επεξεργασίας.
3. *Κανόνας της ημερομηνίας παράδοσης (DD: Due Date)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες εκείνες που προηγείται η ημερομηνία παράδοσής τους.
4. *Κανόνας του μικρότερου χρόνου έναρξης*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες εκείνες με το νωρίτερο χρόνο έναρξης.
5. *Κανόνας του ελάχιστου περιθωρίου (STR: Slack Time Remaining)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες εκείνες με το μικρότερο περιθώριο μεταξύ του χρόνου που απομένει για την ημερομηνία παράδοσης και του χρόνου επεξεργασίας που απομένει. Κατά τη στιγμή άφιξης μιας εργασίας στο σύστημα, το αντίστοιχο περιθώριο ισούται με τη διαφορά του συνολικού χρόνου επεξεργασίας από την ημερομηνία παράδοσης.
6. *Κανόνας του ελάχιστου περιθωρίου ανά εργασία (STR/OP: Slack Time Remaining Per Operation)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες εκείνες με το μικρότερο πηλίκο της διαφοράς του χρόνου που απομένει για την ημερομηνία παράδοσης με το χρόνο επεξεργασίας που απομένει δια τον αριθμό των εργασιών που απομένουν.
7. *Κανόνας του ελάχιστου κρίσιμου λόγου (CR: Critical Ratio)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες εκείνες με το μικρότερο πηλίκο της διαφοράς της ημερομηνίας παράδοσης με την τρέχουσα ημερομηνία δια το χρόνο επεξεργασίας που απομένει.
8. *Κανόνας του ελάχιστου λόγου αναμονής (QR: Queue Ratio)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες εκείνες με το μικρότερο πηλίκο του ελάχιστου περιθωρίου (Slack Time Remaining) δια το απομένοντα χρόνο αναμονής στο σύστημα.
9. *Κανόνας της σειράς βραδύτερης άφιξης στο σύστημα (LCFS: Last Come, First Served)*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, εκτελούνται πρώτα οι εργασίες αυτές που φτάνουν στο σύστημα τελευταίες.
10. *Κανόνας Moore*. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, οι εργασίες εκτελούνται με τέτοια σειρά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός αριθμός καθυστερημένων εργασιών.
11. *Τυχαία επιλογή εργασιών*.

### 9.4.1.3 Παράδειγμα Εφαρμογής Κανόνων Προτεραιότητας

Για την καλύτερη κατανόηση των κανόνων προτεραιότητας που περιγράφηκαν προηγουμένως, ακολουθεί παράδειγμα με την εφαρμογή τους σε 5 εργασίες που πρόκειται να επεξεργαστούν σε κάποιο σύστημα. Οι εργασίες με τους αντίστοιχους χρόνους επεξεργασίας και παράδοσης παρουσιάζονται στον πίνακα 10.2 και θεωρείται ότι έχουν αφιχθεί στο σύστημα με την σειρά, δηλαδή A-B-C-D-E.

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης |
|---------|---------------------|----------------------|
| A       | 3                   | 5                    |
| B       | 4                   | 6                    |
| C       | 2                   | 7                    |
| D       | 6                   | 9                    |
| E       | 1                   | 2                    |

**Πίνακας 10.2 – Πίνακας Εργασιών**

Πηγή: «Production and Operation Management», Chase, Aquilano, Jacobs

#### 1. Κανόνας της σειράς άφιξης στο σύστημα (FCFS):

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| A       | 3                   | 5                    | 3                | -2               |
| B       | 4                   | 6                    | 7                | +1               |
| C       | 2                   | 7                    | 9                | +2               |
| D       | 6                   | 9                    | 15               | +6               |
| E       | 1                   | 2                    | 16               | +14              |

**Πίνακας 9.3 – Κανόνας Άφιξης FCFS**

Μέσος χρόνος ροής:  $(3+7+9+15+16)/5=10$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(1+2+6+14)/5=4,6$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+3+7+9+15)/5=6,8$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 14 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 4 εργασίες

2. Κανόνας του ελάχιστου χρόνου επεξεργασίας (SPT).

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| E       | 1                   | 2                    | 1                | -1               |
| C       | 2                   | 7                    | 3                | -4               |
| A       | 3                   | 5                    | 6                | +1               |
| B       | 4                   | 6                    | 10               | +4               |
| D       | 6                   | 9                    | 16               | +7               |

Πίνακας 9.4 – Κανόνας SPT

Μέσος χρόνος ροής:  $(1+3+6+10+16)/5=7,2$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(1+4+7)/5=2,4$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+1+3+6+10)/5=4$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 7 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 3 εργασίες

3. Κανόνας της ημερομηνίας παράδοσης (DD: Due Date).

Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, οι εργασίες διατάσσονται έτσι, ώστε να εκτελούνται πρώτα εκείνες που προηγείται η ημερομηνία παράδοσής τους.

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| E       | 1                   | 2                    | 1                | -1               |
| A       | 3                   | 5                    | 4                | -1               |
| B       | 4                   | 6                    | 8                | +2               |
| C       | 2                   | 7                    | 10               | +3               |
| D       | 6                   | 9                    | 16               | +7               |

Πίνακας 9.5 – Κανόνας DD

Μέσος χρόνος ροής:  $(1+4+8+10+16)/5=7,8$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(2+3+7)/5=2,4$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+1+4+8+10)/5=4,6$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 7 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 3 εργασίες

4. Κανόνας του ελάχιστου περιθωρίου (STR)

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | STR | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|-----|------------------|------------------|
| E       | 1                   | 2                    | 1   | 1                | -1               |
| A       | 3                   | 5                    | 2   | 4                | -1               |
| B       | 4                   | 6                    | 2   | 8                | +2               |
| D       | 6                   | 9                    | 3   | 14               | +5               |
| C       | 2                   | 7                    | 5   | 16               | +9               |

Πίνακας 9.6 – Κανόνας STR

Μέσος χρόνος ροής:  $(1+4+8+14+16)/5=8,6$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(2+5+9)/5=3,2$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+1+4+8+14)/5=5,4$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 9 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 3 εργασίες

5. Κανόνας του ελάχιστου κρίσιμου λόγου (CR)

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | CR   | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------|------------------|------------------|
| B       | 4                   | 6                    | 1,5  | 4                | -2               |
| D       | 6                   | 9                    | 1,5  | 10               | +1               |
| A       | 3                   | 5                    | 1,67 | 13               | +8               |
| E       | 1                   | 2                    | 2    | 14               | +12              |
| C       | 2                   | 7                    | 3,5  | 16               | +9               |

Πίνακας 9.7 – Κανόνας CR

Μέσος χρόνος ροής:  $(4+10+13+14+16)/5=11,4$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(1+8+12+9)/5=6$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+4+10+13+14)/5=8,2$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 12 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 4 εργασίες

6. Κανόνας της σειράς βραδύτερης άφιξης στο σύστημα (LCFS):

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| E       | 1                   | 2                    | 1                | -1               |
| D       | 6                   | 9                    | 7                | -2               |
| C       | 2                   | 7                    | 9                | +2               |
| B       | 4                   | 6                    | 13               | +7               |
| A       | 3                   | 5                    | 16               | +11              |

Πίνακας 9.8 – Κανόνας LCFS

Μέσος χρόνος ροής:  $(1+7+9+13+16)/5=9,2$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(2+7+11)/5=4$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+1+7+9+13)/5=6$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 11 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 3 εργασίες

7. Κανόνας Moore

Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, η διάταξη των εργασιών γίνεται ως εξής:

Βήμα 1: Οι εργασίες διατάσσονται σύμφωνα με τον κανόνα της ημερομηνίας παράδοσης (DD). Αν προκύψει διάταξη, στην οποία υπάρχει το πολύ μια καθυστερημένη εργασία (που ολοκληρώνεται δηλαδή μετά την ημερομηνία παράδοσής της) τότε η διάταξη αυτή είναι η βέλτιστη. Διαφορετικά προχωράμε στο βήμα 2. Στο παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προκύπτουν τρεις καθυστερημένες εργασίες, οι B,C,D.

Βήμα 2: Προσδιορίζεται η πρώτη καθυστερημένη εργασία στη διάταξη που προέκυψε από το βήμα 1, καθώς και η εργασία με το μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας από όσες έχουν δρομολογηθεί πριν από αυτή και αυτή. Στο παράδειγμα η πρώτη καθυστερημένη εργασία είναι η B. Μέχρι να δρομολογηθεί η B, θα έχουν εκτελεστεί επίσης οι E και A, με χρόνους επεξεργασίας 1 και 3 ήμερες, αντίστοιχα. Άρα η εργασία με το μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας είναι η B.

Βήμα 3: Η εργασία με το μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας που προέκυψε από το βήμα 2 τοποθετείται τελευταία στη διάταξη που προκύπτει από το βήμα 1. Εξετάζεται ξανά αν έχει προκύψει το πολύ μια καθυστερημένη εργασία. Αν όχι, επαναλαμβάνεται το βήμα 2. Ο κανόνας ολοκληρώνεται όταν υπάρχει πλέον μόνο μια καθυστερημένη εργασία το πολύ ή όταν υπάρχει ατέρμων εναλλαγή μεταξύ συγκεκριμένων εργασιών, όπως θα φανεί και στο παράδειγμα, οι οποίες έχουν πάντα μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας από τις υπόλοιπες εργασίες στο σύστημα. Στόχος του κανόνα είναι να ελαχιστοποιήσει το κριτήριο απόδοσης του συνολικού αριθμού καθυστερημένων εργασιών NT.

Στο παράδειγμα μετά την πρώτη μετακίνηση της εργασίας Β, ισχύει:

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| E       | 1                   | 2                    | 1                | -1               |
| A       | 3                   | 5                    | 4                | -1               |
| C       | 2                   | 7                    | 6                | -1               |
| D       | 6                   | 9                    | 12               | +3               |
| B       | 4                   | 6                    | 16               | +10              |

Πίνακας 9.9 - Κανόνας Moore

Τώρα, η πρώτη καθυστερημένη εργασία είναι η D και η εργασία με το μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας που έχει εκτελεστεί μέχρι και την D είναι η ίδια η D. Άρα, σύμφωνα με τον κανόνα πρέπει να μετακινηθεί τελευταία στη διάταξη. Άρα:

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| E       | 1                   | 2                    | 1                | -1               |
| A       | 3                   | 5                    | 4                | -1               |
| C       | 2                   | 7                    | 6                | -1               |
| B       | 4                   | 6                    | 10               | +4               |
| D       | 6                   | 9                    | 16               | +7               |

Πίνακας 9.10 - Κανόνας Moore

Η πρώτη καθυστερημένη εργασία είναι η B, η οποία έχει και το μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας σε σχέση με τις E, A, C, έτσι η διάταξη που θα προκύψει με την μετακίνηση της στο τέλος θα είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου βήματος. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο εργασιών θα συνεχίζεται ατέρμονα. Μπορεί να γίνει δεκτή ως τελική διάταξη που προκύπτει από τον κανόνα του Moore η E-A-C-B-D λαμβάνοντας υπόψη ότι η B έχει μικρότερο χρόνο επεξεργασίας από την D. Τότε:

Μέσος χρόνος ροής:  $(1+4+6+10+16)/5=7,4$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(4+7)/5=2,2$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+1+4+6+10)/5=4,2$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 7 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 2 εργασίες

8. Τυχαία επιλογή εργασιών.

Έστω ότι γίνεται η αυθαίρετη επιλογή D-C-A-E-B, τότε:

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας | Ημερομηνία Παράδοσης | Χρόνος Παράδοσης | Χρονική Απόκλιση |
|---------|---------------------|----------------------|------------------|------------------|
| D       | 6                   | 9                    | 6                | -3               |
| C       | 2                   | 7                    | 8                | +1               |
| A       | 3                   | 5                    | 11               | +6               |
| E       | 1                   | 2                    | 12               | +10              |
| B       | 4                   | 6                    | 16               | +10              |

Πίνακας 9.11 – Τυχαία Επιλογή

Μέσος χρόνος ροής:  $(6+8+11+12+16)/5=10,6$  ημέρες

Μέση βραδύτερη περάτωση:  $(1+6+10+10)/5=5,4$  ημέρες

Μέσος χρόνος αναμονής:  $(0+6+8+11+12)/5=7,4$  ημέρες

Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση: 10 ημέρες

Αριθμός καθυστερημένων εργασιών: 4 εργασίες

Οι επιδόσεις των παραπάνω κανόνων προτεραιότητας στο συγκεκριμένο παράδειγμα, σε σχέση με τα κριτήρια απόδοσης, συνοψίζονται στον πίνακα 9.12.

|         |        | Κριτήρια          |                         |                       |                            |                                 |
|---------|--------|-------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|
|         |        | Μέσος χρόνος ροής | Μέση βραδύτερη περάτωση | Μέσος χρόνος αναμονής | Μέγιστη βραδύτερη απόκλιση | Αριθμός καθυστερημένων εργασιών |
| Κανόνες | FCFS   | 10                | 4,6                     | 6,8                   | 14                         | 4                               |
|         | SPT    | 7,2               | 2,4                     | 4                     | 7                          | 3                               |
|         | DD     | 7,8               | 2,4                     | 4,6                   | 7                          | 3                               |
|         | STR    | 8,6               | 3,2                     | 5,4                   | 9                          | 3                               |
|         | CR     | 11,4              | 6                       | 8,2                   | 12                         | 4                               |
|         | LCFS   | 9,2               | 4                       | 6                     | 11                         | 3                               |
|         | Moore  | 7,4               | 2,2                     | 4,2                   | 7                          | 2                               |
|         | Random | 10,6              | 5,4                     | 7,4                   | 10                         | 4                               |

Πίνακας 9.12 – Συγκριτικός Πίνακας Κανόνων Προτεραιότητων

Από τον πίνακα 9.12 προκύπτουν, για το συγκεκριμένο παράδειγμα, οι καλύτερες/ χειρότερες επιδόσεις στα διάφορα κριτήρια που σημειώνονται από τους διάφορους κανόνες. Από τον πίνακα προκύπτει ότι πολύ καλές επιδόσεις έχει ο κανόνας του ελάχιστου χρόνου επεξεργασίας και ο κανόνας του Moore, ο οποίος πλεονεκτεί φυσικά και ως προς το κριτήριο NT (συνολικός αριθμός καθυστερημένοι εργασιών). Τα αποτελέσματα

αυτά, αν και είναι ενδεικτικά των επιδόσεων των κανόνων, δεν θα παρατηρηθούν υποχρεωτικά σε άλλα παραδείγματα, με διαφορετική σύνθεση εργασιών.

Ας σημειωθεί ότι, από την εφαρμογή των διαφόρων κανόνων, εκτός από τις εργασίες που ολοκληρώνεται η επεξεργασία τους μετά την προβλεπόμενη ημερομηνία παράδοσης, προκύπτουν εργασίες που περατώνονται πριν από την ημερομηνία αυτή. Οι εργασίες αυτές και οι αντίστοιχοι χρόνοι, νωρίτερης περάτωσης διαφέρουν από κανόνα σε κανόνα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προκύπτει ένα κόστος για το σύστημα είτε στην περίπτωση της βραδύτερης ολοκλήρωσης είτε στην περίπτωση της νωρίτερης ολοκλήρωσης. Γενικότερα, αν στο παράδειγμα αθροιστούν οι απόλυτες τιμές των αποκλίσεων από την ημερομηνία παράδοσης όπως υπολογίστηκαν για τους διάφορους κανόνες, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

| Κανόνες       | Άθροισμα αποκλίσεων |
|---------------|---------------------|
| <b>FCFS</b>   | 25                  |
| <b>SPT</b>    | 17                  |
| <b>DD</b>     | 14                  |
| <b>STR</b>    | 18                  |
| <b>CR</b>     | 32                  |
| <b>LCFS</b>   | 23                  |
| <b>Moore</b>  | 14                  |
| <b>Random</b> | 30                  |

Πίνακας 9.13 – Αθροίσματα Αποκλίσεων

Φαίνεται, επομένως, ότι η μέση απόκλιση από τις ημερομηνίες παράδοσης είναι ελάχιστη στην περίπτωση των κανόνων της ημερομηνίας παράδοσης και του Moore και είναι μέγιστη στον κανόνα του κρίσιμου λόγου.

#### 9.4.2 Το Πρόβλημα Προγραμματισμού N/2 Συστήματος

Η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα για την εκτέλεση N εργασιών σε 2 επεξεργαστές βρίσκεται με την εφαρμογή του αλγόριθμου αλγόριθμος Johnson. Το κριτήριο απόδοσης που ικανοποιεί η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών. Το κριτήριο αυτό μετράει το ποσοστό αξιοποίησης των επεξεργαστών και επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του χρόνου που οι επεξεργαστές μένουν άεργοι. Ένα πρόγραμμα είναι τόσο καλύτερο όσο περισσότερο μειώνει τον άεργο χρόνο των επεξεργαστών κάνοντας αποτελεσματικότερη χρήση του μηχανολογικού εξοπλισμού του συστήματος.

Αν θεωρηθεί η ύπαρξη δύο επεξεργαστών 1 και 2, ο αλγόριθμος Johnson βασίζεται στα ακόλουθα: είναι λογικό η παραγωγική διαδικασία να αρχίσει με την εκτέλεση της εργασίας με τον ελάχιστο χρόνο επεξεργασίας στον επεξεργαστή 1. Έτσι, θα είναι ελάχιστος και ο αντίστοιχος χρόνος που ο επεξεργαστή 2 θα είναι άεργος, δηλαδή ο χρόνος που θα χρειαστεί να αναμείνει μέχρι να αρχίσει να απασχολείται με κάποια από τις εργασίες. Με τον ίδιο τρόπο, είναι λογικό η παραγωγική διαδικασία να τελειώσει με την εργασία με τον ελάχιστο χρόνο επεξεργασίας στον επεξεργαστή 2, επειδή, κατά το χρόνο αυτό η μηχανή



1 παραμένει άεργη. Η λογική αυτή μπορεί να επεκταθεί και στις υπόλοιπες εργασίες. Προκύπτει, λοιπόν, ότι για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος παραγωγής, οι εργασίες με το μικρότερο χρόνο επεξεργασίας στον επεξεργαστή 1 πρέπει να τοποθετηθούν προς την αρχή του προγράμματος, ενώ εκείνες με τον ελάχιστο χρόνο επεξεργασίας στον επεξεργαστή 2 πρέπει να τοποθετηθούν προς το τέλος.

Με βάση τη λογική που περιγράφηκε παραπάνω, ο αλγόριθμος Johnson μπορεί να εφαρμοστεί στη δρομολόγηση  $N$  εργασιών σε δύο μηχανές 1 και 2, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

*Βήμα 1:* Καταγραφή χρόνων επεξεργασίας εργασιών από τις μηχανές.

*Βήμα 2:* Επιλογή του συντομότερου χρόνου επεξεργασίας.

*Βήμα 3:* Εάν ο χρόνος επεξεργασίας αναφέρεται στην πρώτη μηχανή τότε η αντίστοιχη εργασία εκτελείται πρώτη από όλες. Αν αναφέρεται στη δεύτερη μηχανή η εργασία εκτελείται τελευταία.

*Βήμα 4:* Εξαιρέση της εργασίας και επανάληψη των βημάτων 2 και 3 έως ότου δρομολογηθούν όλες οι εργασίες.

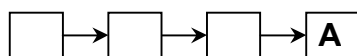
Για την καλύτερη κατανόηση παρατίθεται ένα παράδειγμα της εκτέλεσης 4 εργασιών από 2 μηχανές. Οι χρόνοι επεξεργασίας των εργασιών που απαιτούνται από τις δύο μηχανές φαίνονται στον πίνακα 9.14, ο οποίος αποτελεί και το Βήμα 1 του κανόνα.

| Εργασία | Χρόνος Επεξεργασίας στη Μηχανή 1 | Χρόνος Επεξεργασίας στη Μηχανή 2 |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| A       | 3                                | 2                                |
| B       | 6                                | 8                                |
| C       | 5                                | 6                                |
| D       | 7                                | 4                                |

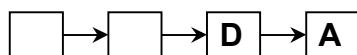
Πίνακας 9.14

*Βήμα 2:* Ο μικρότερος χρόνος επεξεργασίας από το σύνολο των εργασιών και για τις δύο μηχανές είναι για την εργασία A στην μηχανή 2 με χρόνο ίσο με 2.

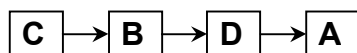
*Βήμα 3:* Σύμφωνα με τον κανόνα, η εργασία αυτή θα εκτελεστεί τελευταία στη σειρά.



*Βήμα 4:* Εξαιρείται τώρα η εργασία A, και επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3. Η μικρότερη τιμή πλέον είναι η τιμή 4 που αντιστοιχεί στην εργασία D στη μηχανή 2. Άρα, η εργασία D πρέπει να εκτελεστεί ακριβώς πριν την εργασία A.



Εξαιρώντας και την εργασία D, πλέον η μικρότερη τιμή είναι το 5 που αντιστοιχεί στην εργασία C και στη μηχανή 1. Άρα αυτή η εργασία θα εκτελεστεί πρώτη από όλες τις εργασίες και απομένει η εργασία B για να εκτελεστεί μετά από αυτή. Έτσι η τελική σειρά με την οποία θα δρομολογηθούν όλες οι εργασίες είναι η εξής:



Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, έχει ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος στον οποίο μένει άεργη μία από τις δύο μηχανές.

|                 |           |           |           |           |           |    |    |    |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|----|----|
| <b>Μηχανή 1</b> | Εργασία C | Εργασία B | Εργασία D | Εργασία A | Άεργη     |    |    |    |
| <b>Μηχανή 2</b> | Άεργη     | Εργασία C | Εργασία B | Εργασία D | Εργασία A |    |    |    |
|                 | 0         | 5         | 11        | 18        | 19        | 21 | 23 | 25 |

Σχήμα 9.1 – Δρομολόγηση κατά Johnson

Ο αλγόριθμος Johnson μπορεί να επεκταθεί σε μια ειδική περίπτωση του προβλήματος με N εργασίες σε 3 μηχανές, όπου ο μέγιστος χρόνος επεξεργασίας στη δεύτερη μηχανή δεν είναι μεγαλύτερος από τον ελάχιστο χρόνο στην πρώτη ή στην τρίτη. Στην περίπτωση αυτή μπορεί πράγματι να βρεθεί το βέλτιστο χρονικό πρόγραμμα παραγωγής, αν θεωρηθούν δύο μηχανές αντί τριών, με χρόνους επεξεργασίας το άθροισμα των χρόνων της πρώτης και της δεύτερης και της δεύτερης και τρίτης, αντίστοιχα, και εφαρμοστεί ο αλγόριθμος Johnson για τις δύο αυτές μηχανές. Όταν προκύπτουν προβλήματα μεγαλύτερη από  $N/3$ , τότε αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης που θα οδηγούν σε βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των εργασιών δεν υπάρχουν.

### 9.4.3 Το Πρόβλημα Προγραμματισμού N/M Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα θα διερευνηθεί η γενική περίπτωση συστημάτων παραγωγής job-shop, όπου N εργασίες πρέπει να εκτελεστούν από M επεξεργαστές. Ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών των εργασιών αν έπρεπε να εκτελεστούν από έναν επεξεργαστή είναι N!. Δεδομένου όμως τώρα, ότι ο αριθμός των επεξεργαστών είναι M, ο συνολικός αριθμός των δυνατών συνδυασμών για την εκτέλεση όλων των εργασιών είναι  $(N!)^M$ .

Αυτό σημαίνει ότι, ακόμα και για πολύ μικρά προβλήματα, στη γενική περίπτωση των συστημάτων job-shop, ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών είναι εξαιρετικά μεγάλος. Για παράδειγμα, αν το πλήθος των εργασιών που πρέπει να εκτελεστούν είναι 6 και οι επεξεργαστές που είναι διαθέσιμοι είναι 3, τότε προκύπτουν συνολικά  $(6!)^3=373.248.000$  πιθανοί συνδυασμοί. Είναι φανερό ότι το πρόβλημα της εύρεσης του βέλτιστου από αυτούς τους συνδυασμούς είναι πολύ δύσκολο να λυθεί, ακόμα και από ένα ταχύτατο υπολογιστικό σύστημα, πόσο μάλλον για ένα σύστημα με περισσότερες από 6 εργασίες ή/και 3 επεξεργαστές, κάτι το οποίο είναι πολύ πιθανό στην πράξη.

Για την επίλυση προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού παραγωγής, στη γενική περίπτωση job-shop συστημάτων, απαιτούνται αλγόριθμοι που να δίνουν γρήγορα τη καλύτερη λύση, δηλαδή το καλύτερο συνδυασμό, σε σχέση με το επιλεγμένο κριτήριο απόδοσης. Τέτοιοι αλγόριθμοι, πράγματι, υπάρχουν για ορισμένα σχετικά απλά προβλήματα χρονικού προγραμματισμού παραγωγής, όχι όμως και για τα σύνθετα προβλήματα προγραμματισμού που συναντώνται συχνά σε παραγωγικά συστήματα και τα οποία στην πράξη παραμένουν άλυτα, από την άποψη της εύρεσης της βέλτιστης λύσης τους. Η πολυπλοκότητα ενός συστήματος μπορεί να μειωθεί με τη εισαγωγή ασθενών και ισχυρών περιορισμών, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι μειώνονται κατά συνέπεια και οι δυνατοί εναλλακτικοί συνδυασμοί εργασιών σε αυτούς μόνο που θα εκπληρώνουν τους περιορισμούς αυτούς.

Στις περιπτώσεις των σύνθετων προβλημάτων προγραμματισμού, δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία αντιμετώπισής τους. Η εμπειρική γνώση μπορεί να οδηγήσει σε μια σειρά κανόνων που απλοποιούν τη διαδικασία επίλυσης. Αναζητούνται συνήθως υποβέλτιστες λύσεις με τη χρήση των κανόνων καθώς και κάποιων διαδικασιών προγραμματισμού και γραφικών, και άλλων μεθόδων. Εξαιρετικά αποτελεσματικός έχει αποδεχθεί για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων ο συνδυασμός κανόνων και τυπικών εργαλείων της επιχειρησιακής έρευνας (υβριδισμός).

Στην περίπτωση της εκτέλεσης η εργασιών από έναν επεξεργαστή, παρουσιάστηκαν 11 διαφορετικοί κανόνες για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού για την καλύτερη εκτέλεση των εργασιών σύμφωνα με τα κριτήρια απόδοσης. Στην περίπτωση γενικού job-shop, η διαδικασία εκπόνησης χρονικού προγράμματος παραγωγής περιλαμβάνει τη χρήση των ίδιων κανόνων δρομολόγησης των εργασιών στους επεξεργαστές. Για την εφαρμογή των κανόνων αυτών εξετάζονται οι εργασίες και οι επιμέρους φάσεις που περιλαμβάνουν, ο αντίστοιχος χρόνος επεξεργασίας και οι επεξεργαστές. Ο κανόνας δρομολόγησης εφαρμόζεται όταν δύο ή περισσότερες εργασίες αναμένουν για να δρομολογηθούν σε έναν επεξεργαστή, ώστε να βρεθεί ποια έχει προτεραιότητα. Όταν τελειώσει μια φάση μιας εργασίας, η εργασία αυτή προστίθεται στις άλλες που αναμένουν να πάρουν σειρά σε άλλον επεξεργαστή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε μονάδα χρόνου, μέχρι να δρομολογηθούν όλες οι εργασίες.

Σε έρευνα των J. Kanet, J. Hauga, οι οποίοι επικεντρώθηκαν στους κανόνες που σχετίζονταν με την ημερομηνία παράδοσης, έχει προταθεί η χρήση των κανόνων της ημερομηνίας παράδοσης (DD), του ελάχιστου περιθωρίου (STR) και του κρίσιμου λόγου (CR) σε τέτοια συστήματα. Τρία κριτήρια που προτείνονται ότι πρέπει να εκπληρώνει ο κανόνας που θα επιλεγεί για συστήματα γενικού job-shop είναι:

- Να είναι σχετικά απλός κρίνοντας των μεγάλων αριθμό συνδυασμών που πρέπει να εξεταστούν.
- Να τον χαρακτηρίζει ευελιξία, δηλαδή να μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις αλλαγές που θα συμβαίνουν κατά τη διάρκεια που εκτελούνται οι εργασίες στο σύστημα.
- Πρέπει να βασίζεται στο περιθώριο που έχει η κάθε εργασία, δηλαδή στο χρόνο που απομένει μέχρι την ημερομηνία παράδοσης και στο χρόνο επεξεργασίας που απομένει για την εργασία.

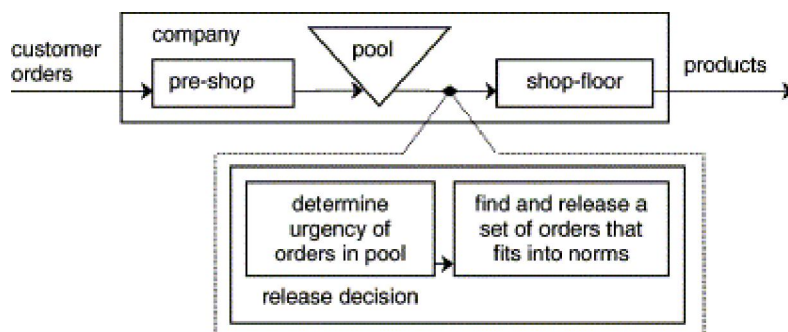
Μια διαδεδομένη προσέγγιση για τον προγραμματισμό της εργασίας σε job-shops ρεαλιστικού μεγέθους παρουσιάζεται στην ακόλουθη ενότητα.

#### 9.4.4 Προγραμματισμός και έλεγχος του φόρτου εργασίας

Σε μια παραγωγική διαδικασία job-shop μια παραγγελία περνά το 90% του συνολικού της χρόνου διέλευσης από αυτήν περιμένοντας σε ουρές αναμονής μπροστά από τους σταθμούς εργασίας, και μόνο το υπόλοιπο 10% είναι πραγματικός χρόνος επεξεργασίας. Αυτό οφείλεται στη μεταβλητότητα στοιχείων όπως είναι το μέγεθος κάθε παραγγελίας, η διαδρομή που ακολουθεί αυτή μέσα στο shop-floor και ο ρυθμός των αφίξεων των παραγγελιών. Εάν η διοίκηση ενός τέτοιου συστήματος απαιτούσε τη δραστική μείωση των ουρών αναμονής, το αποτέλεσμα θα ήταν μια εξίσου δραστική μείωση της αξιοποίησης (*utilization*) των σταθμών εργασίας. Με άλλα λόγια, οι ουρές αναμονής λειτουργούν ως προστατευτικό στρώμα (*buffer*) για την εξασφάλιση μιας ικανοποιητικής εκμετάλλευσης των παραγωγικών πόρων. Προκύπτει ως συμπέρασμα ότι σε μια παραγωγική διαδικασία job-shop, η έννοια του προγραμματισμού και ελέγχου της παραγωγής ταυτίζεται με αυτήν του προγραμματισμού και ελέγχου των ουρών αναμονής μπροστά από τους σταθμούς εργασίας, ή αλλιώς του προγραμματισμού και ελέγχου του φόρτου εργασίας (*workload*) μέσα στο σύστημα.

Ο έλεγχος του φόρτου εργασίας (*Workload Control - WLC*) είναι μια μέθοδος ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας, ειδικά προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά των job-shops. Αντιλαμβάνεται κάθε job-shop ως δίκτυο από ουρές αναμονής. Κατά τη ροή της μέσα στο shop-floor, μια παραγγελία περνά από διάφορους σταθμούς εργασίας. Κάθε φορά που φτάνει σε έναν από αυτούς, συναντά μια ουρά από παραγγελίες που περιμένουν ήδη την επεξεργασία τους από τον εν λόγω σταθμό. Κεντρικό στοιχείο κάθε μεθοδολογίας για την υλοποίηση του WLC είναι ο έλεγχος των ουρών αναμονής μπροστά από τους σταθμούς εργασίας. Ως αποτέλεσμα, το WLC είναι σχεδιασμένο για περιβάλλοντα όπου οι ουρές αναμονής είναι αναπόφευκτες.

Το WLC ελέγχει τις ουρές αναμονής ελέγχοντας την εισαγωγή των παραγγελιών μέσα στο shop-floor. Ο έλεγχος της εισαγωγής βασίζεται σε μια διαδικασία εξέτασης και απελευθέρωσης (*order review and release - ORR*) των παραγγελιών. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, οι παραγγελίες τοποθετούνται αρχικά σε ένα αρχείο (*backlog*) που ονομάζεται στη βιβλιογραφία *Pre-Shop-Pool (PSP)*. Στη συνέχεια, κάθε φορά που εκτελείται η φάση της απελευθέρωσης, ένα υποσύνολο των παραγγελιών στο backlog εισάγονται στο σύστημα για να αρχίσει η παραγωγή τους. Η ύπαρξη του backlog προστατεύει το shop-floor από τη μεταβλητότητα στις αφίξεις των παραγγελιών. Ο στόχος είναι να διατηρηθεί το shop-floor σε όσο πιο σταθερή κατάσταση γίνεται, ανεξάρτητα από αντιθέσεις μεταξύ της υπάρχουσας δυναμικότητας και των απαιτήσεων κάθε παραγγελίας. Η λογική του WLC αποτυπώνεται διαγραμματικά στο ακόλουθο σχήμα:



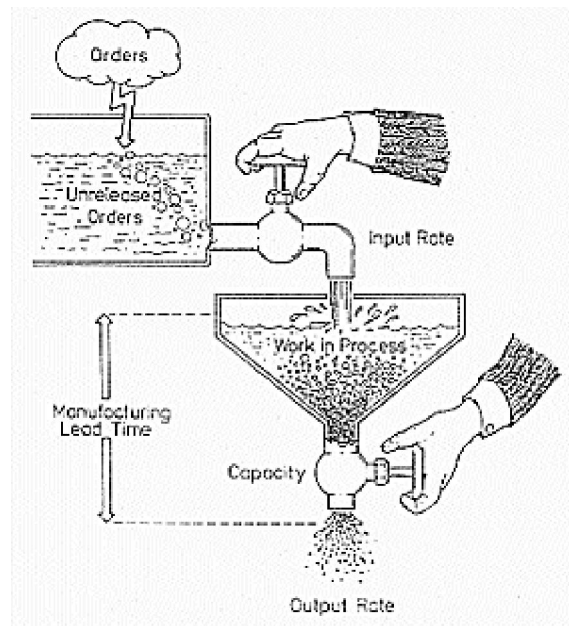
**Σχήμα 9.2 – Η λογική του WLC**

Πηγή: Peter Henrich, Martin Land και Gerard Gaalman, 2003. *Exploring applicability of the workload control concept*

Προκύπτει ότι το WLC ελέγχει τη κατανομή του χρόνου διέλευσης από το shop-floor, αλλά όχι και αυτή του χρόνου που μεσολαβεί από τη στιγμή της άφιξης μιας παραγγελίας στην εταιρεία μέχρι τη στιγμή της παραλαβής της από τον πελάτη. Με άλλα λόγια, το WLC δεν ελέγχει το χρόνο παραμονής των παραγγελιών μέσα στο PSP. Ο έλεγχος του PSP εκτελείται κατά την αποδοχή των παραγγελιών από το Τμήμα Πωλήσεων της επιχείρησης.

Παρά το γεγονός πως υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την υλοποίηση του WLC, οι περισσότερες βασίζονται στον έλεγχο της εισόδου των παραγγελιών με τη χρήση ορίων (*workload norms*) για το φόρτο εργασίας μπροστά από κάθε σταθμό εργασίας. Ο έλεγχος του φόρτου μπροστά από έναν σταθμό εργασίας συνεπάγεται και τον έλεγχο του χρόνου διέλευσης των παραγγελιών από αυτόν. Οι χρόνοι αυτοί χρησιμοποιούνται, με τη σειρά τους, για τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής που πρέπει να εισέλθει στο σύστημα μια παραγγελία (*προγραμματισμένη ημερομηνία εισόδου*) ώστε να τηρηθεί η συμφωνημένη ημερομηνία παράδοσής της στον πελάτη. Η προγραμματισμένη ημερομηνία εισόδου κάθε παραγγελίας προκύπτει ως διαφορά μεταξύ της ημερομηνίας παράδοσής της (*due date*) και του αθροίσματος των αναμενόμενων χρόνων διέλευσης από τους σταθμούς εργασίας που αποτελούν τμήμα της διαδρομής της. Κατά τη συνηθέστερη εκδοχή, οι παραγγελίες εισάγονται στο shop-floor περιοδικά, με αυτές που έχουν την πιο πρόσφατη προγραμματισμένη ημερομηνία εισόδου να έχουν και τη μεγαλύτερη προτεραιότητα, και αφού ελεγχθεί κάθε μια ως προς τις επιπτώσεις που θα έχει η είσοδός της στο φόρτο εργασίας του συστήματος. Ο τρόπος που υπολογίζονται οι επιπτώσεις αυτές προσδιορίζει τη μέθοδο απελευθέρωσης (*release method*) που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του WLC.

Πίσω από την ιδέα του WLC βρίσκεται το γεγονός πως τόσο ένας μεμονωμένος σταθμός εργασίας όσο και ένα ολόκληρο παραγωγικό σύστημα, μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση ενός μοντέλου γνωστού στη βιβλιογραφία ως *funnel model* (Σχήμα 9.3). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η επεξεργασία των παραγγελιών από έναν σταθμό εργασίας μπορεί να περιγραφεί ως ροή ενός υγρού μέσα από μια χοάνη. Οι εισερχόμενες παραγγελίες, μετρούμενες ως χρόνος απαιτούμενης εργασίας, δημιουργούν ένα απόθεμα (*WIP*) που πρέπει να περάσει από την έξοδο της χοάνης, η διάμετρος της οποίας προσδιορίζεται από τη μέγιστη απόδοση που μπορεί να πετύχει ο εν λόγω σταθμός, μετρούμενη στις ίδιες μονάδες χρόνου.



**Σχήμα 9.3 – Το μοντέλο χοάνης**

Πηγή: Wiendahl, Hans-Peter, 1995, *Load-oriented Manufacturing Control*

Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, προκύπτει μια πρώτη σχέση ανάμεσα στο μέσο WIP μπροστά από έναν σταθμό κατά τη διάρκεια μιας περιόδου και στη μέση απόδοση που μπορεί να επιτύχει αυτός κατά την ίδια περίοδο:

$$WIP = TH \cdot R$$

όπου

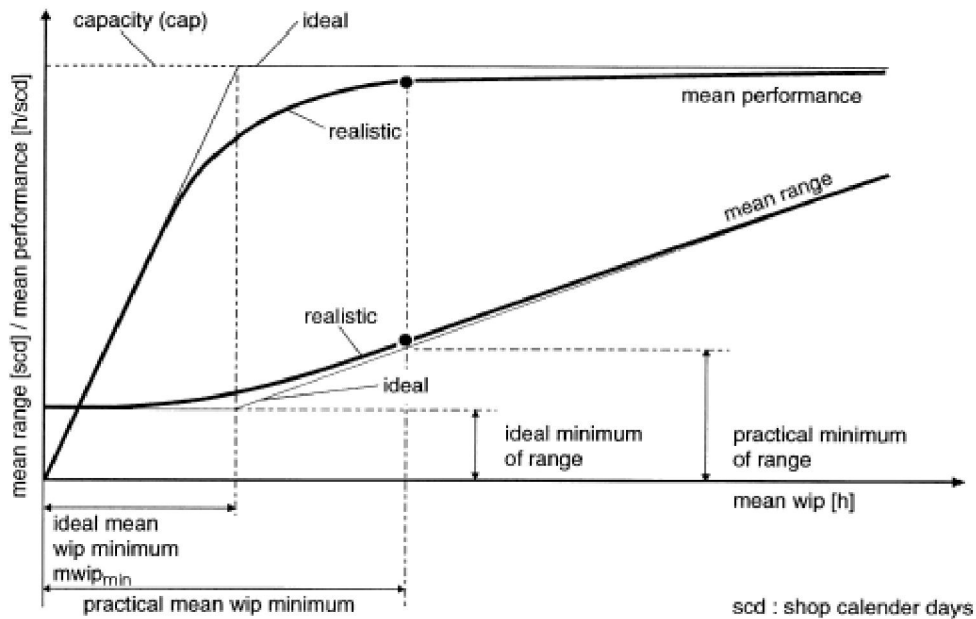
**WIP** είναι το μέσο WIP μετρούμενο σε χρόνο εργασίας [ώρες],

**TH** είναι η μέση απόδοση του σταθμού (*throughput*) [ώρες/ημέρα]

**R** είναι ο μέσος χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία όλου του WIP που βρέθηκε μπροστά από το σταθμό στη διάρκεια της περιόδου (*range*) [ημέρες]

Ωστόσο, ο παραπάνω τύπος δεν αρκεί για να περιγραφεί πλήρως η σχέση ανάμεσα στο μέσο WIP και στην μέση απόδοση ενός σταθμού, αφού η μέση απόδοση είναι και μόνη της μια ξεχωριστή συνάρτηση του μέσου WIP. Όταν τα επίπεδα του WIP ενός σταθμού είναι χαμηλά, αυτός συχνά θα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής για την άφιξη νέων παραγγελιών, με αποτέλεσμα απώλειες στο βαθμό αξιοποίησης και τη μείωση της απόδοσής του. Η απόδοσή του αυξάνεται με την αύξηση του WIP, μέχρι να φτάσει το άνω όριό της που είναι η πρακτικά διαθέσιμη μέγιστη δυναμικότητά του. Προκύπτει ότι το

στοιχείο που λείπει είναι η λογιστική καμπύλη λειτουργίας (*logistic operating curve*) του σταθμού αυτού. Μια τέτοια καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα 9.4.



**Σχήμα 9.4 – Η σχέση ανάμεσα στο μέσο throughput και το μέσο WIP**

Πηγή: Breithaupt, Land και Nyhuis, 2002. *The workload control concept: Theory and practical extensions of load oriented order release*

Η καμπύλη αυτή δείχνει ότι:

- Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβλητότητα ενός παραγωγικού συστήματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέσο WIP που απαιτείται για να δουλεύει ένας σταθμός με την πρακτικά μέγιστη απόδοσή του. Με άλλα λόγια, η ρεαλιστική καμπύλη λειτουργίας του σχήματος αποκλίνει από την ιδεατή τόσο περισσότερο όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβλητότητα μέσα στο σύστημα. Η ιδεατή καμπύλη λειτουργίας περιγράφει μια ροή παραγγελιών με JIT (*Just-in-Time*) χαρακτηριστικά. Μια ροή, δηλαδή, όπου καμία παραγγελία δεν περιμένει σε ουρά αναμονής μπροστά από το σταθμό, και ο σταθμός ποτέ δεν περιμένει αδρανής την άφιξη της επόμενης παραγγελίας.
- Υπάρχει μια τιμή για το μέσο WIP μπροστά από έναν σταθμό εργασίας, το λεγόμενο κρίσιμο WIP (*critical WIP*), τέτοια ώστε η περαιτέρω αύξησή του να μην μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη απόδοση, και άρα σε μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίησης του σταθμού αυτού. Αντίθετα, δεν υπάρχει άνω όριο για το χρόνο διέλευσης. Αυτός αυξάνεται γραμμικά με το WIP, όταν η τιμή του τελευταίου περάσει αυτήν του κρίσιμου.

Κοιτώντας την καμπύλη λειτουργίας ενός σταθμού, μπορεί κανείς να εντοπίσει τρεις περιοχές λειτουργίας. Η πρώτη είναι η περιοχή της υποφόρτωσης, όπου το μέσο WIP

μπροστά από το σταθμό δεν επαρκεί για την χωρίς διακοπές λειτουργία του. Η δεύτερη είναι η περιοχή της υπερφόρτωσης. Εδώ το μέσο WIP είναι πολύ μεγαλύτερο από το κρίσιμο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν παραγγελίες οι οποίες αντί να περιμένουν στο αρχείο backlog, θα περιμένουν ως μισοτελειωμένο απόθεμα μέσα στο shop-floor. Το WLC προσπαθεί να εντοπίσει αυτές τις παραγγελίες πριν εισέλθουν στο σύστημα, και να τις κρατήσει στο backlog μέχρι να βρεθεί το περιθώριο για την εισαγωγή τους. Και το κάνει αυτό, προσπαθώντας να διατηρεί διαχρονικά τον μέσο φόρτο μπροστά από κάθε σταθμό σε μια τιμή όσο γίνεται πιο κοντά στο κρίσιμο WIP. Ωστόσο, ο περιορισμός της μέσης τιμής του φόρτου μπροστά από κάθε σταθμό δεν είναι αρκετός. Θα πρέπει να μειωθεί παράλληλα και η μεταβλητότητα του φόρτου. Ως αποτέλεσμα, τα φορτία μπροστά από σταθμούς που είναι πιθανά στενώματα στην παραγωγή (*bottlenecks*) θα πρέπει να διατηρούνται μέσα σε μια περιοχή γύρω από την τιμή του κρίσιμου φορτίου. Αυτή είναι και η τρίτη περιοχή, η περιοχή της βέλτιστης λειτουργίας, όπου διασφαλίζεται η μέγιστη χρήση της υπάρχουσας δυναμικότητας με το μικρότερο κόστος των WIP αποθεμάτων.

Για τον υπολογισμό του ιδεατού κρίσιμου WIP, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$WIP_{\min} = TO_m + \frac{TO_s^2}{TO_m}$$

όπου το  $TO_m$  είναι η μέση τιμή των χρόνων εργασίας των παραγγελιών που φτάνουν μπροστά από το σταθμό μέσα στην εν λόγω περίοδο, και το  $TO_s$  είναι η τυπική απόκλιση των χρόνων αυτών.

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, θα περιγραφεί μία μέθοδος επιλογής των προς είσοδο στο shop-floor παραγγελιών, η μέθοδος **LOOR** (*Load-Oriented Order Release*). Παρά το γεγονός πως όλες οι έρευνες έχουν καταδείξει ότι καμία μέθοδος δεν υπερέχει πλήρως των υπολοίπων, η παραπάνω επιλέχθηκε ως η πιο χαρακτηριστική. Μέχρι σήμερα, η LOOR έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές λογισμικού όπως οι SAP R/2 (SAP), debis-PPS (debis SHE), MAS 90 BWR (IBM), PIUSS PENTA και PIUSS-O (PSI).

Για να περιγραφεί χρειάζονται οι παρακάτω μεταβλητές και δείκτες:

|           |   |
|-----------|---|
| $m, n$    | Δείκτες σταθμών εργασίας  |
| $j$       | Δείκτης παραγγελιών   |
| PP        | Η περίοδος προγραμματισμού ( <i>Planning Period</i> )   |
| $LL_m$    | Το όριο για το φορτίο του σταθμού $m$ ( <i>Load Limit</i> ), κατά τη διάρκεια της περιόδου προγραμματισμού                                      |
| $K_{jmn}$ | Το σύνολο των σταθμών εργασίας από το οποίο έχει προγραμματιστεί να περάσει μια παραγγελία $j$ , για να φτάσει από τον σταθμό $m$ , μπροστά από |



|              |  |
|--------------|--|
|              | τον οποίο ήδη περιμένει, στον σταθμό n (περιλαμβάνει τον m, αλλά όχι τον n)  |
| $P_{jmn}$    | Η πιθανότητα να φτάσει μια παραγγελία j από τον σταθμό m, μπροστά από τον οποίο ήδη περιμένει, στον σταθμό n, μέσα στην τρέχουσα περίοδο προγραμματισμού |
| $TH_{m,max}$ | Το πρακτικά μέγιστο throughput που μπορεί να πετύχει ο σταθμός m μέσα σε μια περίοδο ίση με PP, εκφραζόμενο ως άθροισμα χρόνων εργασίας                  |
| $PR_{jm}$    | Ο χρόνος εργασίας που απαιτεί η παραγγελία j από το σταθμό m.  |

Σύμφωνα με τη μέθοδο LOOR, το όριο για το φορτίο μπροστά από κάθε σταθμό, για μια περίοδο, αφορά στο φορτίο που υπάρχει μπροστά του στην αρχή της περιόδου και στο φορτίο που προστίθεται από τις παραγγελίες που φτάνουν στο σταθμό αυτό μέχρι το τέλος της ίδιας περιόδου. Η φάση της απελευθέρωσης παραγγελιών εκτελείται στην αρχή κάθε περιόδου προγραμματισμού, οπότε τη στιγμή της απελευθέρωσης το αρχικό φορτίο κάθε σταθμού είναι γνωστό. Ως αποτέλεσμα, το όριο καθορίζει τις επιτρεπόμενες εισροές σε αυτόν, κατά τη διάρκεια της περιόδου.

Οι εισροές στο φορτίο ενός σταθμού εξαρτώνται από τις παραγγελίες που βρίσκονται ήδη στο shop-floor και από αυτές που θα εισαχθούν σε αυτό, με την προϋπόθεση ότι ο εν λόγω σταθμός αποτελεί τμήμα της διαδρομής των παραγγελιών αυτών. Μέσα σε μια περίοδο προγραμματισμού, κάποιες από τις παραπάνω παραγγελίες θα φτάσουν μπροστά από το σταθμό, και κάποιες άλλες όχι.

Για να υπολογίσει τις εισροές σε κάθε σταθμό, η LOOR χρησιμοποιεί μια τεχνική που ονομάζεται *load conversion algorithm*. Σύμφωνα με αυτήν, εάν το φορτίο μπροστά από έναν σταθμό m φτάσει το όριο  $LL_m$ , τότε αναμένεται να περάσει από το σταθμό αυτό μέρος του φόρτου ίσο με  $TH_{m,max} / LL_m$ . Ως αποτέλεσμα, εάν θεωρήσει κανείς ότι κάθε παραγγελία έχει την ίδια πιθανότητα να επιλεγεί προς επεξεργασία, η πιθανότητα μια παραγγελία j, που βρίσκεται μπροστά από το σταθμό m στην αρχή της τρέχουσας περιόδου, να φύγει από το σταθμό αυτόν μέχρι το τέλος της, είναι  $TH_{m,max} / LL_m$  εάν  $PR_{jm} < TH_{m,max}$ , και μηδέν σε διαφορετική περίπτωση.

Άρα, η πιθανότητα  $P_{jmn}$  μια παραγγελία j, που βρίσκεται μπροστά από το σταθμό m στην αρχή της τρέχουσας περιόδου, να βρεθεί μπροστά από το σταθμό n μέχρι το τέλος της, είναι το γινόμενο των  $TH_{u,max} / LL_u$ , για όλους τους σταθμούς u που ανήκουν στο  $K_{jmn}$ , εφόσον ισχύει για όλους  $PR_{ju} < TH_{u,max}$ , και μηδέν σε διαφορετική περίπτωση.

Έστω, τώρα, ότι ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας μιας παραγγελίας  $j$  από τον σταθμό  $n$  είναι  $PR_{jn}$ . Τότε, εάν η παραγγελία βρίσκεται στην αρχή της περιόδου στο σταθμό  $m$ , η αναμενόμενη εισροή φορτίου από αυτήν στο σταθμό  $n$  μέσα στην ίδια περίοδο, είναι  $PR_{jn} \cdot P_{jmn}$ .

Η απόφαση για την απελευθέρωση νέων παραγγελιών λαμβάνεται περιοδικά, στην αρχή κάθε περιόδου προγραμματισμού. Αρχικά, μετράται το φορτίο μπροστά από κάθε σταθμό εργασίας, συνυπολογίζοντας και το χρόνο που απομένει για την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των παραγγελιών που βρίσκονται ήδη πάνω σε αυτούς. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο παραπάνω αλγόριθμος για να υπολογιστούν οι αναμενόμενες εισροές κατά τη διάρκεια της περιόδου, στο φόρτο κάθε σταθμού, από τις παραγγελίες που βρίσκονται ήδη στο shop-floor και περιλαμβάνουν στην προγραμματισμένη διαδρομή που τους απομένει και το σταθμό αυτό. Οι παραγγελίες στο backlog έχουν διαταχθεί σύμφωνα με τις προγραμματισμένες ημερομηνίες εισόδου τους. Ακολουθώντας αυτή τη σειρά, η LOOR επιλέγει παραγγελίες μέχρι οι αναμενόμενες εισροές να ξεπεράσουν το όριο φόρτου κάποιου σταθμού. Σε αυτή την περίπτωση, δεν μπορεί να επιλεγεί καμιά άλλη παραγγελία εάν ο παραπάνω σταθμός βρίσκεται στη διαδρομή της. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να μην μπορεί να βρεθεί παραγγελία που να μπορεί να εισέλθει στο σύστημα. Οι υπόλοιπες παραγγελίες θα πρέπει να περιμένουν μια επόμενη περίοδο.

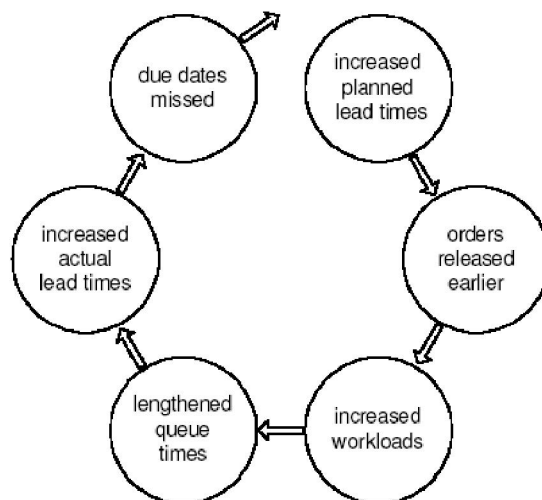
Επειδή, ωστόσο, μια τέτοια διαδικασία μπορεί να επιλέξει παραγγελίες με μεγάλο περιθώριο αναμονής προς είσοδο (*ahead of schedule*), ορίζεται συνήθως ένα χρονικό όριο για τη διαφορά ανάμεσα στη τρέχουσα ημερομηνία και σε αυτή της προγραμματισμένης εισόδου, έτσι ώστε παραγγελίες που ξεπερνούν το όριο αυτό να μην μπορούν να εισέλθουν στο σύστημα ακόμα και εάν το επιτρέπουν τα φορτία των σταθμών εργασίας.

Όταν οι παραγγελίες εισέλθουν στο shop-floor, η δρομολόγησή τους στους σταθμούς παραγωγής πραγματοποιείται με τη χρήση των κανόνων προτεραιότητας της ενότητας 9.4.1 του παρόντος κεφαλαίου.

Η ιδέα του WLC, και πιο συγκεκριμένα η ιδέα της χρήσης ορίων για τα φορτία μπροστά από τους σταθμούς εργασίας, έχει να προσφέρει στον προγραμματισμό της παραγωγής δύο βασικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι το γεγονός πως τα ελεγχόμενα φορτία συνεπάγονται ελεγχόμενους χρόνους διέλευσης από τους σταθμούς εργασίας, κάτι που απλοποιεί τη διαδικασία του προγραμματισμού της παραγωγής, μετατρέποντας το πρόβλημα του προγραμματισμού της φόρτισης των σταθμών εργασίας (*resource loading*) σε αυτό του προγραμματισμού της εισόδου των παραγγελιών μέσα στο shop-floor.

Το δεύτερο πλεονέκτημα της ύπαρξης των ορίων είναι η αποφυγή αυτού που η βιβλιογραφία ονομάζει *lead time syndrome*. Το «σύνδρομο» αυτό σχετίζεται με τον φαύλο κύκλο που δημιουργείται όταν οι προγραμματισμένοι χρόνοι διέλευσης από το σύστημα αυξάνουν για να αντισταθμίσουν την αύξηση του φόρτου μέσα σε αυτό. Ο εν λόγω κύκλος φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 9.5. Το WLC σπάει αυτόν τον κύκλο ακριβώς στο δεύτερο στάδιό του. Η εισαγωγή των παραγγελιών στο shop-floor δεν μπορεί να οδηγήσει σε φορτία μεγαλύτερα από τα όρια που έχουν θεσπιστεί. Αυτό, στην πραγματικότητα,

σημαίνει ότι μια παραγγελία δεν μπορεί να μπει στο shop-floor ακόμα και εάν η παραγωγή της έχει ήδη αργήσει (*behind of schedule*), όταν ο προγραμματισμένος φόρτος έχει καλυφθεί από παραγγελίες μεγαλύτερης ή ίσης προτεραιότητας.



**Σχήμα 9.5 – Ο φαύλος κύκλος του ελέγχου της παραγωγής**

Πηγή: Plossl, 1988, *Throughput time control*

## 9.5. Προγραμματισμός σε flow-shop Συστήματα

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των συστημάτων παραγωγής job-shop σε σχέση με τα συστήματα παραγωγής flow-shop είναι ότι στην πρώτη περίπτωση, η σειρά των επεξεργασιών διαφέρει γενικά από παραγγελία σε παραγγελία, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η σειρά είναι πάντα η ίδια, για κάθε μονάδα προϊόντος. Ένα σύστημα flow-shop μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση ενός συστήματος job-shop με  $m$  επεξεργαστές, όπου η εκτέλεση κάθε παραγγελίας περιλαμβάνει μέχρι  $m$  επεξεργασίες, μία σε κάθε επεξεργαστή. Γενικά υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων flow-shop. Η πρώτη ονομάζεται «καθαρό» σύστημα flow-shop, όπου όλες οι παρτίδες παραγωγής ενός προϊόντος για να εκτελεστούν περνούν από όλους τους επεξεργαστές, και η δεύτερη ονομάζεται «γενικό» flow-shop, όπου κάθε παρτίδα, αν και ακολουθεί την ίδια κατεύθυνση μέσα στο σύστημα, δεν περνάει υποχρεωτικά από όλους τους επεξεργαστές.

Παράδειγμα καθαρού συστήματος flow-shop είναι μια γραμμή συναρμολόγησης, όπου η παραγωγή πραγματοποιείται από φάση σε φάση στην ίδια πάντα κατεύθυνση και περνώντας από όλους τους σταθμούς παραγωγής. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ή στην περίπτωση παραγωγής ενδυμάτων, η ίδια διαδοχή επεξεργασιών απαιτείται για ένα μεγάλο αριθμό κομματιών μιας παραγγελίας, ενώ η διαδοχή αυτή μπορεί να αλλάζει από παραγγελία σε παραγγελία. Ένα τέτοιο σύστημα θεωρείται γενικό σύστημα flow-shop. Σε άλλες περιπτώσεις, πάλι, η παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί ότι διεξάγεται σε δύο φάσεις, που αντιστοιχούν στους δυο τύπους συστημάτων, job-shop και flow-shop. Παράδειγμα τέτοιου συστήματος αποτελεί μια βιομηχανία επίπλων, όπου η βασική διαμόρφωση του επίπλου πραγματοποιείται στις αρχικές φάσεις της παραγωγής, όμοια για όλα τα προϊόντα (flow-shop κομμάτι) ενώ στις τελευταίες φάσεις (τοποθέτηση ταπετσαρίας, βαφή, κ.λπ.) η παραγωγή διαφοροποιείται και εξατομικεύεται (job-shop κομμάτι).

Όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια που αναφέρθηκαν σε παραγωγικά συστήματα job-shop, έτσι και τώρα ο χρονικός προγραμματισμός σε παραγωγικά συστήματα flow-shop αφορά την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου δρομολόγησης των εργασιών, δηλαδή τέτοιας που να ικανοποιεί στο μέγιστο βαθμό τα επιλεγμένα κριτήρια απόδοσης, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τους υπάρχοντες περιορισμούς. Όμως, όπως και στην περίπτωση των συστημάτων job-shop, ακόμα και για σχετικά απλά προβλήματα δεν είναι εύκολο να βρεθούν βέλτιστες λύσεις. Μέθοδοι για την εύρεση τέτοιων λύσεων έχουν προσδιοριστεί σε ένα πολύ μικρό αριθμό προβλημάτων.

Μια διαδεδομένη προσέγγιση για τον προγραμματισμό της εργασίας σε flow-shops ρεαλιστικού μεγέθους παρουσιάζεται στην ακόλουθη ενότητα.

### 9.5.1 Προγραμματισμός και έλεγχος του φόρτου γραμμής

Ένα σύστημα παραγωγής μοντελοποιείται ως ένα δίκτυο από διαδρομές που ακολουθούν τα παραγόμενα προϊόντα. Κάθε διαδρομή αποτελείται από διεργασίες (*processes*) και χώρους αποθήκευσης (*stock points*) των προϊόντων. Κάθε διεργασία μοντελοποιείται ως

μία ουρά αναμονής. Στην περίπτωση των flow-shops, το παραγωγικό σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί από έναν μικρό αριθμό διακριτών γραμμών παραγωγής, όπως αυτή του ακόλουθου σχήματος:



Σχήμα 9.6 – Μια γραμμή παραγωγής

Σε μια γραμμή παραγωγής, μπορούν να εντοπιστούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

**Ρυθμός στενώματος (Bottleneck Rate -  $r_b$ ):** Ο ρυθμός (τεμάχια ανά μονάδα χρόνου) του σταθμού εργασίας με το μεγαλύτερο μέσο βαθμό απασχόλησης (utilization) ή ισοδύναμα ο ρυθμός του πιο αργού σταθμού εργασίας.

**Καθαρός χρόνος κατεργασίας ( $PR_o$ ):** Άθροισμα των μέσων χρόνων κατεργασίας των σταθμών της γραμμής παραγωγής.

**Κρίσιμο WIP ( $W_o$ ):** Το μέσο επίπεδο WIP για το οποίο μια γραμμή παραγωγής επιτυγχάνει μέγιστο μέσο throughput ( $r_b$ ) με το μικρότερο δυνατό μέσο χρόνο διέλευσης των παραγγελιών ( $PR_o$ ) (λειτουργεί δηλαδή χωρίς συμφόρηση ή ισοδύναμα όλοι οι χώροι αποθήκευσης είναι άδειοι και οι χρόνοι αναμονής μηδενικοί).

Ισχύει:

$$W_o = r_b \cdot PR_o$$

Έστω, για παράδειγμα, ότι η μέση δυναμικότητα κάθε σταθμού του σχήματος 9.6 αποτυπώνεται στον ακόλουθο πίνακα:

| Σταθμός | Δυναμικότητα (τεμάχια / min) |
|---------|------------------------------|
| A       | 0,05                         |
| B       | 0,04                         |
| C       | 0,06                         |
| D       | 0,07                         |

Πίνακας 9.15

Προκύπτουν:

Μέγιστο δυνατό μέσο throughput:  $r_b = 0,04$  τεμ. / min

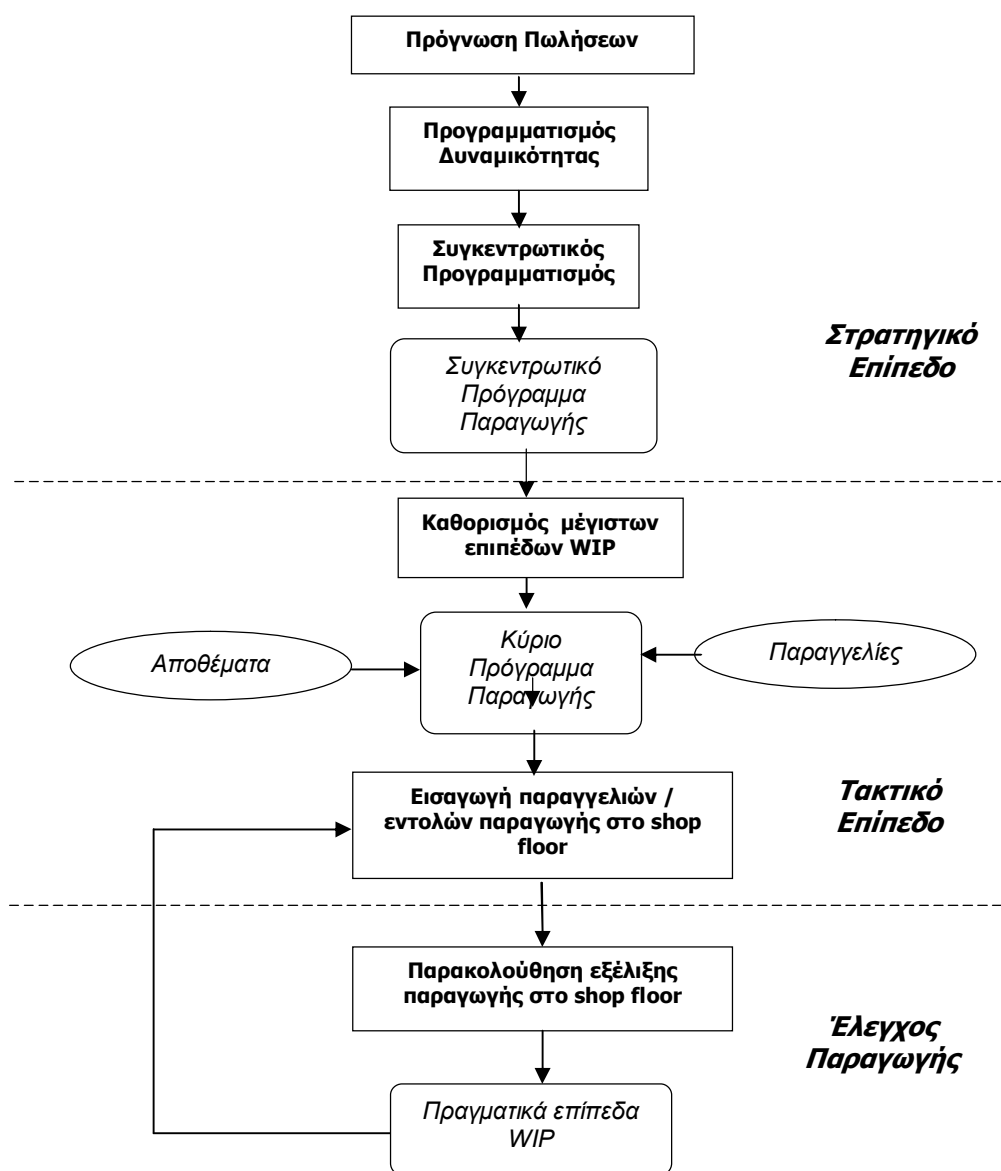
Μικρότερος δυνατός μέσο χρόνος διέλευσης παραγγελίας από τη γραμμή (cycle time):  
 $PR_o = 76$  min

$$W_o = r_b \cdot PR_o = 0,04 \times 76 = 3,04 \text{ τεμ.} < 4 \text{ (συνολικός αριθμός μηχανών)}$$

Συμπέρασμα: Μια μη ισορροπημένη γραμμή παραγωγής (οι σταθμοί έχουν διαφορετική δυναμικότητα μεταξύ τους) λειτουργεί χωρίς συμφόρηση όταν όλες οι μηχανές πλην του bottleneck υποαπασχολούνται.

Σε αντιστοιχία με τον προγραμματισμό και έλεγχο του φόρτου εργασίας σε ένα job-shop, μπορεί κανείς να θέσει άνω όριο στο φόρτο εργασίας κάθε γραμμής σε ένα flow-shop. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κανόνας για την είσοδο μιας παραγγελίας ή εντολής παραγωγής μέσα στο shop floor είναι της μορφής: «Μια παραγγελία ή εντολή παραγωγής μπορεί να εισέλθει στη γραμμή μόνο όταν μια άλλη παραγγελία ή εντολή παραγωγής ολοκληρωθεί και αποχωρήσει από τη γραμμή». Ο κανόνας αυτός είναι γνωστός στη βιβλιογραφία ως CONWIP (COnstant WIP).

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 8 για τον μακροπρόθεσμο και τον τακτικό προγραμματισμό της παραγωγής, η ιεραρχία των αποφάσεων προκειμένου για την εφαρμογή του κανόνα CONWIP σε ένα flow-shop αποτυπώνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 9.7 – Η ιεραρχία των αποφάσεων για την εφαρμογή του κανόνα CONWIP

Το Συγκεντρωτικό Πρόγραμμα Παραγωγής ορίζει τις ποσότητες των προϊόντων που θα παραχθούν από κάθε γραμμή. Αυτές ισοδυναμούν με έναν ρυθμό λειτουργίας του bottleneck σταθμού ίσο με  $r_p < r_b$ . Αν ο ζητούμενος χρόνος διέλευσης από τη γραμμή μιας παραγγελίας ή εντολής παραγωγής είναι  $CT < PR_o$ , τότε το απαιτούμενο WIP είναι:

$$W = r_p \cdot CT$$

## 9.6. Προγραμματισμός Ανθρώπινων Πόρων

Στην περίπτωση συστημάτων που παρέχουν υπηρεσίες (τράπεζες, υπερκαταστήματα, οργανισμοί τηλεπικοινωνιών, νοσοκομεία, οργανισμοί αστικών συγκοινωνιών κ.λπ.) είναι πολύ σημαντικός ο χρονικός προγραμματισμός του προσωπικού και του εξοπλισμού που παράγει τις υπηρεσίες. Σε αυτή την περίπτωση, ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος:

- Με εφαρμογή κάποιας από τις μεθόδους βελτιστοποίησης που αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.
- Με την εφαρμογή της Θεωρίας Αναμονής, όταν οι αφίξεις πελατών στο σύστημα ή/ και ο χρόνος εξυπηρέτησης ανά πελάτη είναι στοχαστικές μεταβλητές, που υπακούουν σε κάποιο στατιστικό νόμο (π.χ. αφίξεις σύμφωνα με την κατανομή Poisson, χρόνος εξυπηρέτησης σύμφωνα με την κατανομή Erlang).
- Με κάποια μέθοδο η οποία είναι κατάλληλη όταν οι αφίξεις πελατών για εξυπηρέτηση ή/ και ο χρόνος εξυπηρέτησης τους ακολουθούν ένα σταθερό πρότυπο.

Στις περιπτώσεις προγραμματισμού της δυναμικότητας ενός συστήματος, τα ζητούμενα είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ή/και ο προγραμματισμός των παραγωγικών πόρων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ένας επιθυμητός βαθμός εξυπηρέτησης των πελατών. Γενικά, ο προγραμματισμός της απασχόλησης του ανθρώπινου δυναμικού στην περίπτωση συστημάτων παραγωγής υπηρεσιών επιδιώκεται να βασίζεται σε όσο το δυνατόν καλύτερες προβλέψεις των απαιτήσεων της ζήτησης.



## 9.7. Έλεγχος Παραγωγικής Διαδικασίας (Shop Floor Control)

### 9.7.1 Λειτουργίες του έλεγχου της παραγωγικής διαδικασίας

Ο προγραμματισμός απαιτούμενων υλικών και ο χρονικός προγραμματισμός παραγωγής, όπως αυτοί περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, αποτελούν ένα κομμάτι του Ελέγχου Παραγωγικής Διαδικασίας (Shop Floor Control). Ο ορισμός, που δίνει το American Production and Inventory Control Society (APICS), για ένα σύστημα ελέγχου παραγωγικής διαδικασίας είναι ο εξής:

*«Ένα σύστημα το οποίο εκμεταλλεύεται τα δεδομένα από το χώρο παραγωγής, καθώς και διάφορα επεξεργασμένα αρχεία δεδομένων, με σκοπό να διατηρεί και να μεταβιβάζει τις πληροφορίες κατάστασης των παραγγελιών παραγωγής και των κέντρων εργασίας».*

Οι βασικές λειτουργίες του ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ανάθεση προτεραιότητας σε κάθε παραγγελία
- Παρακολούθηση / καταγραφή όγκου παραγωγής
- Ενημέρωση κεντρικών συστημάτων για την κατάσταση (status) κάθε εργασίας
- Παραγωγή πραγματικών δεδομένων για αποτελεσματικό έλεγχο χωρητικότητας
- Παραγωγή πραγματικών δεδομένων -ανά μηχανή- για λογιστική παρακολούθηση και έλεγχο αποθεμάτων.
- Μέτρηση αποτελεσματικότητας, βαθμού χρησιμοποίησης και παραγωγικότητας ανθρώπων / μηχανών

Στο προγραμματισμό εργασιών και στον έλεγχο της ισορροπίας του φόρτου εργασίας των μηχανών στο χώρο παραγωγής, προτείνεται από τους Pruett και Schartner η προσέγγιση με βάση τις τρεις παρακάτω μεθόδους, δηλαδή της διαδοχικής προσέγγισης (*successive approach*), της προσέγγισης με αλληλεπίδραση (*interactive approach*) και της προσέγγισης με ημι-αλληλεπίδραση (*semi-interactive approach*).

Η διαδοχική προσέγγιση χαρακτηρίζεται από τον αυτόματο χρονικό προγραμματισμό των παραγγελιών μέσω ενός υπολογιστικού συστήματος, με βάση έναν κανόνα προτεραιότητας (π.χ. ελάχιστου χρόνου επεξεργασίας), αδιαφορώντας για πληροφορίες που έχουν να κάνουν με το φόρτο εργασίας στις μηχανές του κέντρου παραγωγής. Στην προσέγγιση αλληλεπίδρασης το χαρακτηριστικό της είναι ότι υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας στον προγραμματισμό παραγωγής. Συγκεκριμένα, ο άνθρωπος και όχι ένα υπολογιστικό σύστημα αποφασίζει για τον προγραμματισμό μίας παραγγελίας μετά την άφιξή της στο σύστημα. Ο υπεύθυνος για τον προγραμματισμό λαμβάνει υπόψη του και τα χαρακτηριστικά για τη δρομολόγηση της παραγγελίας, τα οποία λαμβάνονται υπόψη και στους κανόνες προτεραιότητας, όπως για παράδειγμα της ημερομηνίας παράδοσης, αλλά λαμβάνει παράλληλα υπόψη του και τη διαθέσιμη χωρητικότητα στις μηχανές στο χώρο παραγωγής. Τέλος, η προσέγγιση ημι-αλληλεπίδρασης είναι ένας συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων περιπτώσεων. Έτσι ο προγραμματισμός των παραγγελιών καθορίζεται

αυτόματα από ένα υπολογιστικό σύστημα (*successive approach*), αλλά λαμβάνοντας υπόψη τα προκαθορισμένα όρια του φόρτου εργασίας των μηχανών. Έτσι, όταν ένα όριο υπερβαίνεται, τότε η διαδικασία σταματάει και ο ανθρώπινος παράγοντας (*interactive approach*) υπεισέρχεται για να τροποποιήσει κατάλληλα τον αρχικό προγραμματισμό ώστε να υπερκεραστεί ο περιορισμός που έχει προκύψει. Όταν συμβεί αυτό, τότε το σύστημα επανέρχεται και συνεχίζει τη διαδικασία του αυτόματου προγραμματισμού.

### 9.7.2 Εργαλεία του έλεγχου της παραγωγικής διαδικασίας

Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας είναι:

- Οι ημερήσιες λίστες διεκπεραίωσης (*daily dispatch list*), οι οποίες περιέχουν τις παραγγελίες που πρέπει να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια της ημέρας, την προτεραιότητα της κάθε μίας, καθώς και το χρόνο επεξεργασίας της.
- Διάφορες αναφορές κατάστασης καθώς και επακόλουθες εξαιρέσεις.
  - Η αναφορά των πιθανά καθυστερούμενων παραγγελιών. Δημιουργείται μία ή δύο φορές την εβδομάδα και προβλέπει αν θα υπάρξουν μεγάλες καθυστερήσεις σε κάποιες παραγγελίες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν πρόβλημα στον όλο προγραμματισμό της παραγωγής.
  - Η αναφορά των υπολειμμάτων κατά την παραγωγή.
  - Η αναφορά των εργασιών που έχουν αναθεωρηθεί.
  - Η περιληπτική αναφορά που περιλαμβάνει τον αριθμό και το ποσοστό των παραγγελιών που έχουν ολοκληρωθεί εντός προγράμματος, που έχουν καθυστερήσει ή είναι ανεκτέλεστες, τον όγκο της εξόδου του συστήματος παραγωγής κ.ο.κ.
  - Η αναφορά έλλειψης υλικών.
- Η αναφορά ελέγχου εισόδου/ εξόδου στο σύστημα, η οποία χρησιμοποιείται για την επίβλεψη του φόρτου εργασίας καθώς και της διατιθέμενης χωρητικότητας σε κάθε θέση εργασίας.

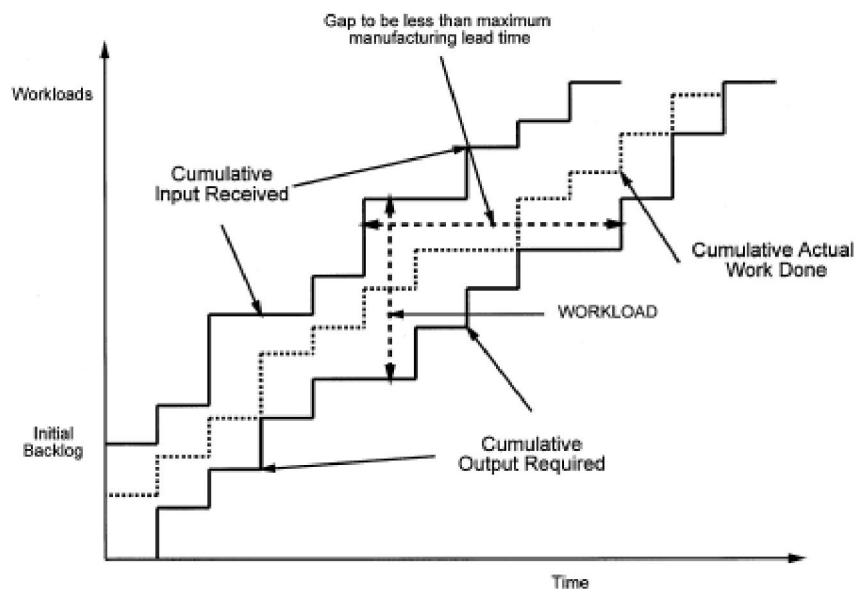
Ένα βασικό χαρακτηριστικό για τον έλεγχο και προγραμματισμό της παραγωγικής διαδικασίας είναι ο έλεγχος της εισόδου και της εξόδου του συστήματος (*Input/Output Control*). Η βασική του αρχή είναι ότι οι προγραμματισμένες εργασίες στη είσοδο ενός κέντρου εργασίας δεν πρέπει ποτέ να υπερβαίνουν τις προγραμματισμένες εργασίες για την έξοδο του συστήματος. Εάν η είσοδος υπερβεί την έξοδο, τότε συναθροίζονται πολλές εργασίες στην είσοδο, δημιουργώντας μεγάλη χρονική αναμονή για τις παραγγελίες καθώς και μεγάλο χρόνο παραμονής στο σύστημα και η επεξεργασία των παραγγελιών γίνεται μη αποδοτική.

Σύμφωνα με τον έλεγχο της εισόδου και της εξόδου ενός συστήματος, οι σχέσεις που διέπουν κάθε σταθμό εργασίας είναι οι ακόλουθες:

Έστω  $t$  ο δείκτης που καθορίζει την αρχή κάθε περιόδου προγραμματισμού. Η τρέχουσα περίοδος είναι η περίοδος 1, με αρχή τη χρονική στιγμή  $t=0$ , ενώ η περίοδος  $T$  είναι η τελευταία. Η επιλογή της διάρκειας κάθε περιόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάθε παραγωγικής διαδικασίας. Συνήθως είναι η μικρότερη περίοδος για την οποία το *commitment* είναι αποδεκτό. Με τον όρο *commitment* χαρακτηρίζονται οι αποφάσεις που παίρνονται στο επίπεδο του μεσοπρόθεσμου προγραμματισμού (*planning*), και που περιορίζουν στη συνέχεια τις αποφάσεις που λαμβάνονται σε αυτό του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού (*scheduling*).

Έστω, επίσης,  $n$  ο δείκτης που προσδιορίζει κάθε σταθμό εργασίας, και  $N$  ο συνολικός αριθμός των σταθμών μέσα στο shop-floor. Τότε, ορίζεται το  $In_{n,t}$  ως το άθροισμα των απαιτήσεων σε χρόνο εργασίας πάνω στο σταθμό  $n$  (*input*), όλων των παραγγελιών που έχουν προγραμματιστεί να βρεθούν μπροστά του, μέσα στην περίοδο  $t$ . Ορίζεται, επίσης, το  $OUT_{n,t}$  ως οι προγραμματισμένες εκροές του σταθμού  $n$  κατά την περίοδο  $t$ . Συνεπάγεται ότι το  $In_{n,0}$  είναι το άθροισμα των απαιτήσεων σε χρόνο εργασίας πάνω στο σταθμό  $n$ , όλων των παραγγελιών που βρίσκονται ήδη στο shop-floor, και δεν έχουν περάσει ακόμα από τον σταθμό αυτό.

Ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούνται οι εισροές  $In_{n,t}$  και οι εκροές  $OUT_{n,t}$  για έναν σταθμό εργασίας, φαίνεται στο Σχήμα 9.8. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της καμπύλης των αθροιστικών εισροών και αυτής των αθροιστικών εκροών δίνει την τιμή του φορτίου μπροστά από τον σταθμό, στην αρχή κάθε περιόδου.



**Σχήμα 9.8 – Οι καμπύλες των αθροιστικών εισροών και εκροών**

Πηγή: Kingsman, 2000, *Modelling input-output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems*

Για την καλύτερη κατανόηση της αναφοράς ελέγχου εισόδου/ εξόδου σε ένα σύστημα παραγωγής, ακολουθεί ένα παράδειγμα.

Στον πίνακα 9.16 δίνονται ο αριθμός των προγραμματισμένων και πραγματικών εισόδων στο σύστημα καθώς και των αντίστοιχων εξόδων από το σύστημα.

| Εβδομάδα                         | 1 <sup>η</sup> | 2 <sup>η</sup> | 3 <sup>η</sup> | 4 <sup>η</sup> |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Προγραμματισμένες εισοδοι</b> | 210            | 210            | 210            | 210            |
| <b>Πραγματικές εισοδοι</b>       | 110            | 150            | 140            | 130            |
| <b>Συνολική απόκλιση</b>         | -100           | -160           | -230           | -310           |
| <b>Προγραμματισμένες εξοδοι</b>  | 210            | 210            | 210            | 210            |
| <b>Πραγματικές εξοδοι</b>        | 140            | 120            | 160            | 120            |
| <b>Συνολική απόκλιση</b>         | -70            | -160           | -210           | -300           |

Πίνακας 9.16

Παρατηρώντας με μία γρήγορη ματιά το τμήμα του πίνακα που αφορά την έξοδο του συστήματος, μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι οι πραγματικές έξοδοι από το σύστημα είναι πολύ λιγότερες από τις προγραμματισμένες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι υπάρχει πρόβλημα χωρητικότητας στο σύστημα το οποίο δεν μπορεί να εκτελεί τον προγραμματισμένο αριθμό παραγγελιών. Στην πραγματικότητα όμως παρατηρώντας και την είσοδο του συστήματος, οι πραγματικές τιμές των εισόδων είναι και αυτές με τη σειρά τους μικρότερες από τις προγραμματισμένες. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα χωρητικότητας (*bottleneck*) βρίσκεται πριν από το συγκεκριμένο κέντρο εργασίας σε κάποιο προηγούμενό του, το οποίο δεν έχει την δυνατότητα να παρέχει στην έξοδό του, και κατά συνέπεια στην είσοδο του επόμενου, τον προγραμματισμένο αριθμό παραγγελιών.

Γενικά, αξίζει να παρατηρηθεί ότι πλέον ο έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας σε ένα σύγχρονο σύστημα με τη βοήθεια της τεχνολογίας περιλαμβάνει μηχανογραφημένα συστήματα. Η πληροφορία κατάστασης στη οποία βρίσκεται μία εργασία μεταβιβάζεται ανά πάσα στιγμή, από την είσοδο της εργασίας στο κέντρο εργασίας μέχρι την έξοδό του, στο υπολογιστικό σύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο για την πλήρη καταγραφή. Μέθοδοι που αξιοποιούν bar codes και optical scanners έχουν πλέον διαδοθεί ιδιαίτερα σε πολλές επιχειρήσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ευκολία στη δημιουργία των διαφόρων αναφορών που αναφέρθηκαν προηγουμένως καθώς και στην ελαχιστοποίηση των λαθών εισόδου πληροφοριών σε αυτές.

## 9.8. Ερωτήσεις

---

1. Σε ποιες κατηγορίες ταξινομούνται τα συστήματα παραγωγής;
2. Ποιοι είναι οι βασικοί σκοποί του χρονικού προγραμματισμού της παραγωγής και γιατί είναι σημαντικός ο χρονικός προγραμματισμός;
3. Τι είναι κέντρο εργασίας και σε ποιες κατηγορίες μπορεί να χωριστεί;
4. Σε τι κατηγορίες μπορούν να διακριθούν οι εργασίες σε ένα σύστημα;
5. Ποιες είναι οι κατηγορίες πόρων σε ένα σύστημα;
6. Ποιος ο στόχος του χρονικού προγραμματισμού και ποιες λειτουργίες πρέπει να εκτελεστούν για τη λειτουργία του;
7. Ποια κριτήρια χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του χρονικού προγραμματισμού;
8. Να αναφερθούν 7 κανόνες προτεραιότητας για το πρόβλημα προγραμματισμού N/1 συστημάτων.
9. Ποια κριτήρια πρέπει να εκπληρώνει ο κανόνας που θα επιλεγεί για συστήματα γενικού job-shop;
10. Πως επιλύεται το Πρόβλημα Προγραμματισμού N/M Συστήματος;
11. Ποιες οι διαφορές μεταξύ συστημάτων flow-shop και job-shop; Να δοθούν παραδείγματα.
12. Ποια βήματα ακολουθεί ο αλγόριθμος Johnson;
13. Με ποιες μεθόδους γίνεται ο προγραμματισμός ανθρωπίνων πόρων;
14. Πως ορίζεται και πως γίνεται ο έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας;
15. Ποιες μέθοδοι προτείνονται για την προσέγγιση του προγραμματισμού εργασιών και του ελέγχου της ισορροπίας του φόρτου εργασίας των μηχανών στο χώρο παραγωγής;
16. Ποια είναι τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον σωστό έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας;

## 9.9. Παραδείγματα

### Παράδειγμα 9.1 Χρονικός Προγραμματισμός N εργασιών σε 2 μηχανές

Ο κ. Φ. Κόπης είναι διευθυντής μιας μικρής επιχείρησης φωτοαντιγράφων που αναλαμβάνει την αναπαραγωγή και βιβλιοδέτηση εγγράφων για λογαριασμό μιας μεγάλης δικηγορικής εταιρείας. Στην αρχή της ημέρας ένας πελάτης παρέδωσε πέντε ογκώδεις φακέλους για αναπαραγωγή και βιβλιοδέτηση και ζήτησε να του παραδοθούν σε λιγότερο από τέσσερις ώρες. Ο κ. Κόπης εκτίμησε τους απαιτούμενους χρόνους αναπαραγωγής και βιβλιοδέτησης κάθε φακέλου (ο φάκελος Β χρειάζεται μόνο βιβλιοδέτηση) και κατήρτισε τον πίνακα που ακολουθεί:

| Φάκελος  | Χρόνος Αναπαραγωγής (min) | Χρόνος βιβλιοδέτησης (min) |
|----------|---------------------------|----------------------------|
| <b>A</b> | 60                        | 30                         |
| <b>B</b> | -                         | 40                         |
| <b>Γ</b> | 50                        | 20                         |
| <b>Δ</b> | 80                        | 60                         |
| <b>E</b> | 40                        | 10                         |

Με δεδομένο πως η σειρά βιβλιοδέτησης των φακέλων ακολουθεί τη σειρά αναπαραγωγής τους, ο κ. Κόπης έχει τις ακόλουθες ερωτήσεις:

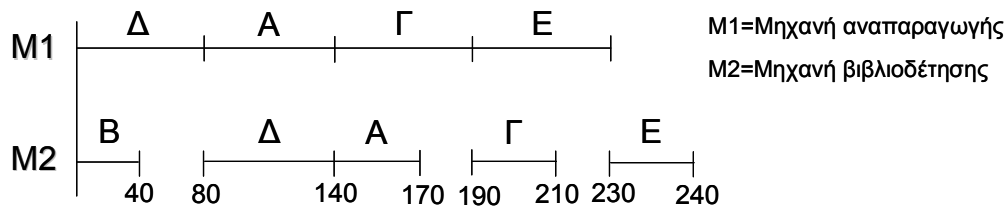
- Είναι δυνατή η ολοκλήρωση όλων των εργασιών σε λιγότερο από 4 ώρες;
- Ανεξάρτητα από την παραπάνω απάντηση, να καταστρωθεί πλάνο δρομολόγησης των εργασιών αναπαραγωγής / βιβλιοδέτησης που να εξασφαλίζει τον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσής τους.
- Το πλάνο γίνεται αποδεκτό και η εφαρμογή του αρχίζει στις 10:00 πμ. Στις 10:15 ο κ. Κόπης ερωτά: Πότε το νωρίτερο θα είναι ο φάκελος Α;
- Στις 12:30 επανέρχεται. Είναι δυνατόν, χωρίς να μεταβάλλουμε το πλάνο:
  - Να παρεμβάλουμε μια έκτακτη, «εξωτερική» εργασία βιβλιοδέτησης, διάρκειας 10 λεπτών, ώστε να ολοκληρωθεί πριν τις 13:20;
  - Να παρεμβάλουμε μια άλλη έκτακτη «εξωτερική» εργασία αναπαραγωγής, διάρκειας 2 λεπτών, ώστε να ολοκληρωθεί πριν τις 13:30;

Λύση:

- Πρόκειται για πρόγραμμα χρονοδρομολόγησης 2 εργασιών σε 2 μηχανές. Εφαρμόζεται ο κανόνας του Johnson. Πρώτα θα εκτελεστεί η εργασία Β γιατί απαιτεί μηδενικό χρόνο στην πρώτη «μηχανή». Η Ε τίθεται τελευταία διότι έχει μικρότερο χρόνο που αντιστοιχεί στη 2η «μηχανή». Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει ότι η σειρά θα είναι η εξής:
- 



Το ακόλουθο διάγραμμα χρονοδρομολόγησης (πλάνο) δείχνει τον ολικό χρόνο που θα χρειαστεί:



Ο συνολικός χρόνος είναι 240 min δηλαδή 4 ώρες, και δεν μπορεί να γίνει γρηγορότερα. (Επίσης θεωρείται ότι οι 2 μηχανές μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα).

3. Όπως φαίνεται παραπάνω.
4. Αν στις 10:00 π.μ. αντιστοιχηθεί ο χρόνος 0, στις 10:15 π.μ. είναι το σημείο  $t=15$  min. Από τον διάγραμμα φαίνεται ότι ο φάκελος ολοκληρώνεται στο  $t=170$  min. (δηλ. 170 min μετά τις 10:00 π.μ.) δηλ. στις 12:50 μ.μ.

Η ώρα 12:30 μ.μ. αντιστοιχεί στο  $t=150$  min και η 1:20 μ.μ. στο  $t=200$  min. Είναι προφανές ότι μπορεί να παρεμβληθεί μια 10λεπτη εργασία που απαιτεί βιβλιοδεσία μεταξύ  $t=170$  και  $t=190$ . Αντίθετα, δεν μπορεί να παρεμβληθεί καμιά εργασία αναπαραγωγής διότι η μηχανή M1 απασχολείται διαρκώς.