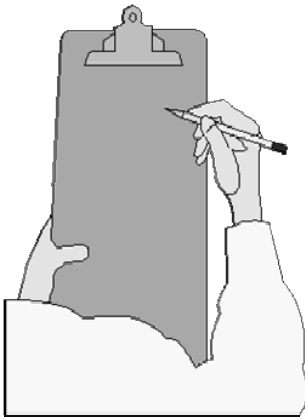


Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής

Flexible Manufacturing Systems

- Μηχανοποίηση, Αυτοματισμός, FMS
- Ευελιξία ενός συστήματος παραγωγής
- Δομή των FMS
- Διακίνηση υλικών στα FMS
- Σχεδιασμός και έλεγχος των FMS
 - Σχεδιασμός του συστήματος
 - Λειτουργία του συστήματος
 - Πρόβλημα επιλογής κομματιών
 - Πρόβλημα φόρτωσης
 - Βαθμίδες ελέγχου των FMS



Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής

Το βασικό χαρακτηριστικό των Ευέλικτων Συστημάτων Παραγωγής είναι η **αυτοματοποίηση**.

Συνδυασμός των υπολογιστών με τις τεχνολογίες αυτομάτου ελέγχου και μηχανών για την κατασκευή συστημάτων παραγωγής.

Αυτοματοποίηση πρώτου βαθμού (μηχανοποίηση εργασίας)

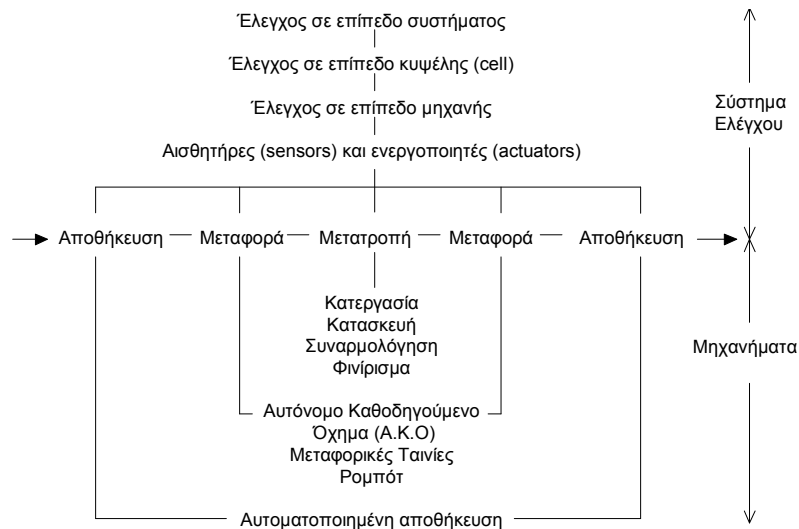
Αυτοματοποίηση δευτέρου βαθμού (μεγάλα κέντρα κατεργασίας)

Οι αυξανόμενες ανάγκες για συστήματα παραγωγής με **υψηλή παραγωγικότητα** και **ευελιξία**, οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας νέας γενιάς αυτοματοποιημένων συστημάτων παραγωγής.

Ο αυτοματισμός ασχολείται όχι μόνο με τη μηχανοποίηση απλών και σύνθετων μεθόδων παραγωγής, αλλά και με τα συστήματα μεταφοράς και ελέγχου που τις συνδέουν.

Η ευέλικτη αυτοματοποίηση βρίσκει εφαρμογή στους τομείς της επεξεργασίας, της κατασκευής, της συναρμολόγησης, του φινιρίσματος, της αποθήκευσης, της διαχείρισης και της μεταφοράς πρώτων υλών.

Τα ευέλικτα συστήματα αυτοματοποίησης περιλαμβάνουν εξελιγμένες μηχανές παραγωγής και επιθεώρησης (ποιοτικού ελέγχου), συστήματα ελέγχου με υπολογιστές, συστήματα επικοινωνίας καθώς και συστήματα διαχείρισης υλικών.

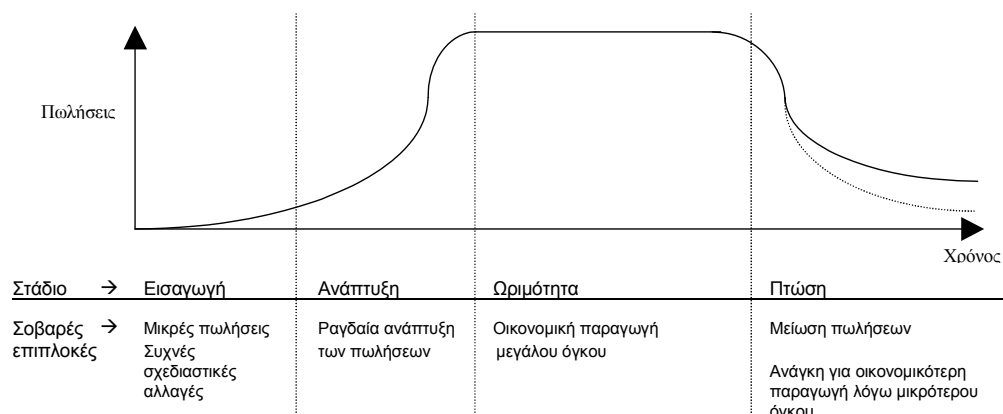


Η ευελιξία ενός συστήματος παραγωγής

Εσωτερική και εξωτερική ευελιξία: Η **εσωτερική** ευελιξία αφορά την ικανότητα του συστήματος παραγωγής να ανταποκρίνεται στις αλλαγές που προκαλούνται από την ίδια την επιχείρηση (π.χ. βελτίωση στο σχεδιασμό του προϊόντος) ενώ η **εξωτερική** ευελιξία αφορά την αντίδραση του συστήματος σε ερεθίσματα προερχόμενα από το ευρύτερο περιβάλλον (π.χ. την αγορά).

Ευελιξία προϊόντος

Ευελιξία καλούμε την ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου προϊόντος.

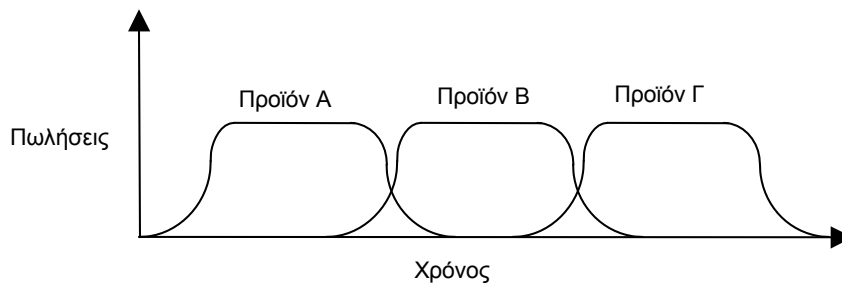


Ευελιξία ποικιλίας προϊόντων

Η ευελιξία ποικιλίας επικεντρώνεται:

- Στον αριθμό των διαφορετικών προϊόντων που παράγονται από το σύστημα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.
- Στη δυνατότητα του συστήματος παραγωγής να εναλλάσσεται μεταξύ δύο προϊόντων γρήγορα και με μικρό κόστος.
- Στις διάφορες παραλλαγές μεγέθους, σχήματος, πρώτων υλών, απαιτούμενων κατεργασιών κτλ.

Είναι σημαντικό, τα συστήματα παραγωγής να αντεπεξέρχονται δυναμικά στην εισαγωγή νέων προϊόντων και στην απόσυρση παλαιότερων με τις λιγότερες δυνατές διαταραχές. Η ικανότητα ταυτόχρονης διεκπεραίωσης πολλών εργασιών αναφέρεται και ως “**ευελιξία έργου**”.



Ευελιξία μεθόδων παραγωγής

Η ευελιξία μεθόδων παραγωγής είναι μέτρο του πόσο εύκολα μπορεί ένα σύστημα παραγωγής να ξεπερνάει τις *δυσκολίες που προκαλούνται εκ των έσω*.

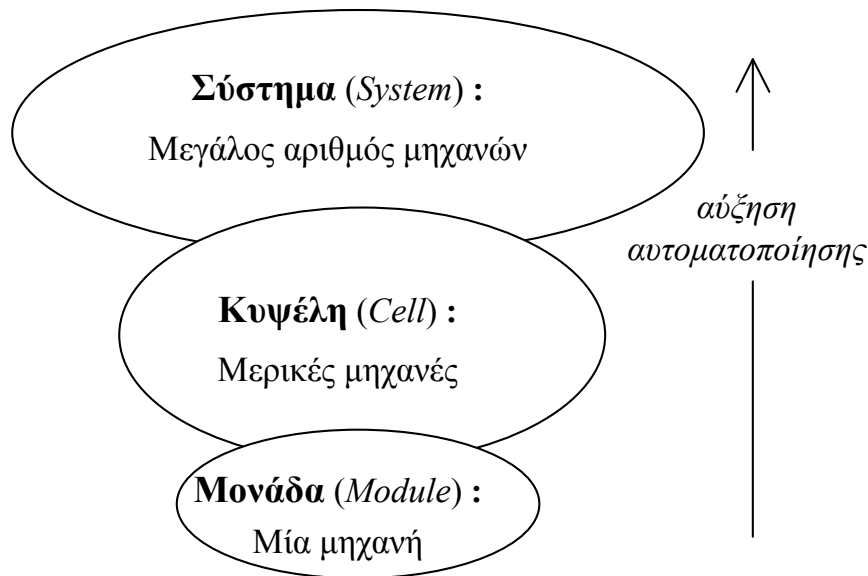
Η ικανότητα κατασκευής εξαρτημάτων και συναρμολογήσεων με *διαφορετικούς τρόπους* αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση (διευκολύνει τον προγραμματισμό, ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις από τις βλάβες του συστήματος).

Ευελιξία περιβάλλοντος

Επιδράσεις του ευρύτερου περιβάλλοντος στο παραγωγικό σύστημα:

- μεταβολές της ζήτησης και του κύκλου ζωής ενός προϊόντος
- οι τεχνολογικές αλλαγές: ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνικών
- νέες συνήθειες και γενικότερη κατάσταση της οικονομίας

Δομή ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής



Μονάδα (Module)

Μία αριθμητικά ελεγχόμενη εργαλειομηχανή με ενσωματωμένο μικροϋπολογιστή (CNC = Computerised Numerical Control). Περιλαμβάνει συσκευή αυτόματης αλλαγής εργαλείων, αποθήκη εργαλείων και ενδεχομένως αυτόματο σύστημα φόρτωσης / εκφόρτωσης και αποθήκευσης των προς κατεργασία κομματιών (μεταφορική ταινία, ρομποτικό βραχίονα, «ολοκληρωμένο» ρομπότ).

Κυψέλη (cell)

Μία κυψέλη αποτελείται από μικρό αριθμό συνδεδεμένων CNC μηχανών, με αυτόματη φόρτωση και εκφόρτωση (π.χ. ημικυκλική διάταξη γύρω από ένα ρομπότ ή γραμμική διάταξη με συνδεδεμένα π.χ. κέντρα κατεργασίας).

Μία κυψέλη είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει σύστημα παλετών, αποθήκη εργαλείων και σύστημα ελέγχου που επιτρέπει στην εγκατάσταση να είναι αυτό-ελεγχόμενη.

Σύστημα (system)

Ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει αυτόματα συστήματα διακίνησης υλικών και ελέγχου, τα οποία λειτουργούν συμπληρωματικά των εργασιών των κυψελών ή και των μονάδων. Το σύστημα είναι μεγαλύτερο της κυψέλης και περιέχει επιπροσθέτως αυτόματα συστήματα αποθήκευσης. Λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων που πιθανόν να υπάρχουν στο επίπεδο του συστήματος, τα υλικά και τα εξαρτήματα μεταφέρονται με αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα ή μεταφορικές ταινίες.



Διακίνηση Υλικών και Μεταφορά

Βασικές λειτουργίες ενός συστήματος διαχείρισης και μεταφοράς υλικών:

- Μεταφορά και αποθήκευση ετοιμών κομματιών κατά την διάρκεια λειτουργίας του παραγωγικού συστήματος.
- Είσοδος πρώτων υλών και έξοδος του τελικού προϊόντος.
- Μεταφορά και ανατροφοδότηση κενών παλετών.
- Διαχείριση βοηθητικών υλών, αποβλήτων, εργαλειοδετών, εξαρτημάτων και εργαλείων.

Εξοπλισμός ενός συστήματος διαχείρισης και μεταφοράς υλικών:

- Ρομπότ γενικής χρήσεως.
- Αυτομάτως οδηγούμενα οχήματα (Automatic Guided Vehicles, AGVs).
- Οχήματα που κινούνται σε ράγες, όπως τα βαγονάκια στα ορυχεία.
- Συστήματα μεταφορικών γραμμών.
- Περονοφόρα οχήματα (π.χ. κλαρκς).
- Εξειδικευμένα συστήματα αλλαγής παλετών (για κέντρα κατεργασίας).
- Εξειδικευμένοι ρομποτικοί χειριστές.



Ο εξοπλισμός του συστήματος διαχείρισης υλικών και μεταφοράς είναι σημαντικός για την συνολική ευελιξία και τους στόχους του βιομηχανικού συστήματος.

Η βασική διαφοροποίηση ανάμεσα στις μεθόδους μεταφοράς βρίσκεται στο αν μεταφέρονται τα αντικείμενα προς μια προκαθορισμένη σειρά μηχανών ή αν τα διάφορα υλικά δρομολογούνται με τυχαίο τρόπο βάση ενός προγράμματος (άμεση ή τυχαία πρόσβαση πιο ευέλικτη).

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος διαχείρισης υλικών είναι δύσκολη. Πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν

- η ευελιξία,
- το πόσο πρακτικό είναι,
- η απόσταση μεταφοράς,
- η ταχύτητα της μεταφοράς,
- οι δυνατότητες έλεγχου,
- ο τύπος των κομματιών που μεταφέρονται,
- οι δυσκολίες στην διαχείριση και
- το κόστος.

Π.χ. ρομπότ πιο κατάλληλα για μεταφορά υλικού σε μικρές αποστάσεις.

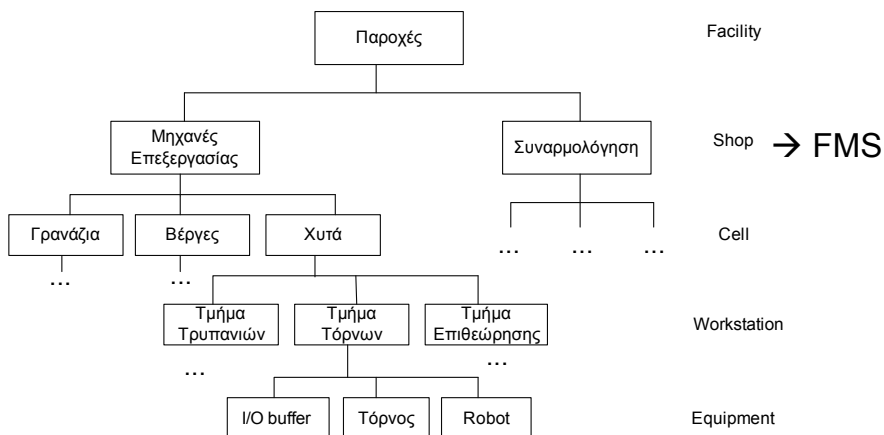
Σχεδιασμός και Έλεγχος των FMS

- «*τι*» πρέπει να επικοινωνεί (από τα στοιχεία του συστήματος)
- «*πως*» επικοινωνούν τα στοιχεία αυτά μεταξύ τους

Το Εθνικό Ινστιτούτο Τυποποίησης και Τεχνολογίας της Αμερικής (National Institute of Standards and Technology, NIST) παρουσίασε ένα μοντέλο το οποίο διαιρεί τις παραγωγικές δραστηριότητες σε πέντε επίπεδα:

Ροή των πληροφοριών μεταξύ γειτονικών στρωμάτων.

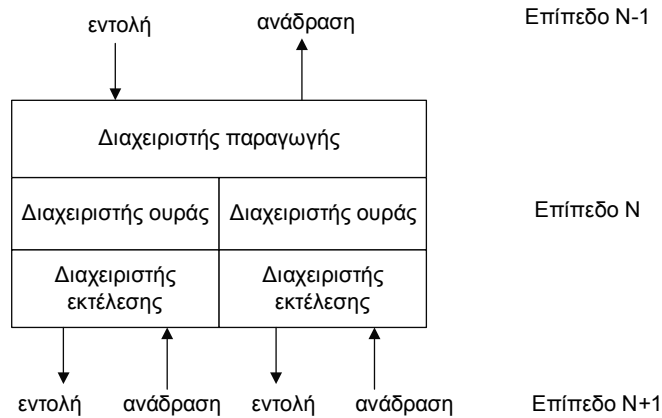
Π.χ. ο ελεγκτής του σταθμού κατεργασίας τόνων μπορεί να «μιλήσει» μόνο με τον ελεγκτή της κυψέλης στη οποία ανήκει, το ρομπότ, τη μηχανή και το buffer του, ενώ δεν μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα με τον ελεγκτή άλλης κυψέλης ή άλλου σταθμού κατεργασίας.



Ο σχεδιασμός εκτελείται σε κάθε επίπεδο αλλά ο ορίζοντας σχεδιασμού διαφέρει.

Επίπεδο	Ορίζοντας σχεδιασμού	Αποφάσεις
Παροχές (facility)	Μήνες - χρόνια	Cad (manufacturing eng), σχεδιασμός παραγωγής, λογιστικά, ετήσια απόδοση, δυναμικότητα, συνολική παραγωγή, ποιότητα
Κατάστημα (shop)	Εβδομάδες - μήνες	Ομαδοποίηση παραγγελιών και ταξινόμηση, προληπτική συντήρηση, έλεγχος αποθεμάτων
Κυψέλη (cell)	Ώρες - εβδομάδες	Ακολουθία παρτίδων, δρομολόγηση εργασιών
Σταθμός κατεργασίας (workstation)	Λεπτά - ώρες	Εκκίνηση εργασιών και προσαρμογή, επιθεώρηση
Εξοπλισμός (equipment)	Χιλιοστά του δευτερολέπτου - λεπτά	Έλεγχος σε επίπεδο μηχανής, Συλλογή δεδομένων από αισθητήρες

Γενικό μοντέλο ελέγχου για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού



Η ιεραρχία των αποφάσεων μπορεί να διαιρεθεί σε τρία βασικά βήματα:

- 1) ο (μακροπρόθεσμος) σχεδιασμός του συστήματος, ο οποίος αφορά την επιλογή των τύπων των κομματιών τα οποία θα ανατεθούν στο FMS και τον εξοπλισμό που απαιτείται για την κατασκευή αυτών των κομματιών,
- 2) ο μεσοπρόθεσμος σχεδιασμός, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τις εβδομαδιαίες ή ημερήσιες αποφάσεις σχετικά με το τι θα φορτωθεί στο σύστημα (τύποι κομματιών και εργαλεία), και
- 3) η βραχυπρόθεσμη λειτουργία η οποία περιλαμβάνει το χρονικό προγραμματισμό και τον έλεγχο των μηχανών και του συστήματος διακίνησης υλικών.

Σχεδιασμός συστήματος

(A) Επιλογή υλικού και λογισμικού (hardware and software) του συστήματος.

Υλικό του συστήματος: κέντρα κατεργασίας, κέντρα αλλαγής εργαλείων, συστήματα φόρτωσης/εκφόρτωσης παλετών, εργαλεία κοπής, παλέτες, εξαρτήματα, συστήματα αποθήκευσης, μηχανές προσωρινής αποθήκευσης, συστήματα μετακίνησης υλικών και συστήματα ελεγκτών.

Ιδιαίτερη προσοχή στη συμβατότητα των επιμέρους συστημάτων.

(B) Ποιοι τύποι κομματιών κατασκευάζονται σ' αυτό το FMS και ποια είναι η σειρά επεξεργασίας που θα ακολουθείται γι' αυτά τα κομμάτια;

Θεώρηση οικονομικού κριτηρίου: Για κάθε τύπο κομματιών υπολογίζεται το κόστος κατασκευής τους στο FMS, και το κόστος κατασκευής τους σε εναλλακτικές υπάρχουσες διαδικασίες (εσωτερικά με συμβατικές μηχανές ή NC μηχανές ή με υπεργολαβίες). Κάθε κομμάτι που έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής με το FMS είναι υποψήφιο να μπει στη λίστα των κομματιών που θα παράγονται με το FMS.

Το πρόβλημα επιλογής των κομματιών που θα παράγονται με το FMS ανάγεται στο κλασικό πρόβλημα του γυλιού (knapsack problem): παραγωγή κομματιών με το FMS με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους κάτω από τον περιορισμό της χωρητικότητας του FMS.

Έστω

- P ο διαθέσιμος χρόνος παραγωγής ανά περίοδο στο FMS,
- p_i ο χρόνος ανά περίοδο (χρόνος ανά μονάδα X μονάδες ανά περίοδο) που απαιτούν τα κομμάτια τύπου i , και
- s_i το κέρδος ανά περίοδο (κέρδος ανά μονάδα X μονάδες ανά περίοδο) αν το κομμάτι τύπου i προστεθεί στο FMS.

Χρησιμοποιώντας δυαδικές μεταβλητές X_i (1 αν ο τύπος i προστεθεί στο FMS, 0 αλλιώς) μοντελοποιούμε το πρόβλημα σαν πρόβλημα γυλιού:

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^N s_i X_i$$

κάτω από τους περιορισμούς

$$\sum_{i=1}^N p_i X_i \leq P$$
$$X_i \in \{0,1\}$$

Αλγόριθμος για την επιλογή των κομματιών που θα ανατεθούν στο FMS:

Βήμα 1: Ταξινομήστε τους τύπους από [1] μέχρι [N] έτσι ώστε

$$\frac{s_{[1]}}{p_{[1]}} \geq \frac{s_{[2]}}{p_{[2]}} \geq \dots \geq \frac{s_{[N]}}{p_{[N]}}$$

Βήμα 2: Για $i=1$ μέχρι N επιλέξτε το κομμάτι τύπου i αν $s_i > 0$ και η προσθήκη του στο FMS είναι εφικτή.

Παράδειγμα: Σε μια αυτοματοποιημένη κυψέλη πρόκειται να επεξεργάζονται 8 κομμάτια τα οποία αυτή τη στιγμή αγοράζονται από κάποιον προμηθευτή. Η κυψέλη θα έχει διαθεσιμότητα 250 ώρες ανά περίοδο. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται το μοναδιαίο τρέχων κόστος για κάθε τύπο κομματιού, το κόστος υλικών (που απαιτούνται για την κατασκευή τους στην κυψέλη), τη ζήτηση ανά περίοδο, και το χρόνο παραγωγής ενός κομματιού στην κυψέλη. Η κυψέλη επιβαρύνεται με 50€ / ώρα (περιέχονται όλα τα έξοδα λειτουργίας της). Ποια κομμάτια πρέπει να ανατεθούν στην κυψέλη;

	Τύποι κομματιών							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Τιμή αγοράς ανά κομμάτι	200	155	300	125	300	86	93	165
Κόστος υλικών	45	35	124	50	120	34	36	114
Ζήτηση ανά περίοδο	100	50	50	75	60	30	50	600
Ωρες ανά κομμάτι	1	2	4	1	2	1	1	0.5



- **Κέρδος ανά μονάδα** = τιμή αγοράς – [κόστος υλικών + κόστος επεξεργασίας].
κόστος επεξεργασίας = χρόνος επεξεργασίας στην κυψέλη * κόστος λειτουργίας της κυψέλης
Π.χ. κομμάτια τύπου 1, κέρδος $200 - (45 + 50 * 1) = 105$.
- **Κέρδος ανά περίοδο** (s_i) = κέρδος ανά κομμάτι * ζήτηση ανά περίοδο
Π.χ. $s_1 = 105 * 100 = 10500$
- **Ώρες ανά περίοδο** (p_i) = ώρες ανά κομμάτι * ζήτηση ανά περίοδο
- **Κέρδος ανά ώρα** (s_i/p_i) = Κέρδος ανά περίοδο / Ώρες ανά περίοδο



	Τύποι κομματιών							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά κομμάτι	105	20	-24	25	60	2	7	26
Κέρδος ανά περίοδο (s_i)	10500	1000	-	1875	3600	60	350	15600
Ώρες ανά περίοδο (p_i)	100	100	200	75	120	30	50	300
Κέρδος ανά ώρα (s_i/p_i)	105	10	-	25	30	2	7	-



Βήμα 1: Ταξινομούμε τα κομμάτια με φθίνουσα σειρά ως προς το κέρδος ανά ώρα. Σειρά: 1, 5, 4, 2, 7, 6.

Βήμα 2: Ανάθεση:

1. Τα κομμάτια τύπου 1 ανατίθενται στο FMS. Ο χρόνος που χρειάζεται για να παραχθούν αυτά τα κομμάτια είναι 100 ώρες.
2. Τα κομμάτια τύπου 5 ανατίθενται στο FMS. Ο χρόνος που χρειάζεται για να παραχθούν αυτά τα κομμάτια είναι 120 ώρες. Άρα συνολικά χρειάζονται $100+120=220$ ώρες.
3. Τα κομμάτια τύπου 4 δεν μπορούν να ανατεθούν στο FMS. Ο χρόνος που χρειάζεται για να παραχθούν αυτά τα κομμάτια είναι 75 ώρες και στο FMS διατίθενται μόνο 30.
4. Τα κομμάτια τύπου 2 δεν μπορούν να ανατεθούν στο FMS. Ο χρόνος που χρειάζεται για να παραχθούν αυτά τα κομμάτια είναι 100 ώρες και στο FMS διατίθενται μόνο 30.
5. Τα κομμάτια τύπου 7 δεν μπορούν να ανατεθούν στο FMS για τον ίδιο λόγο (απαιτούν 50 ώρες).
6. Τα κομμάτια τύπου 6 ανατίθενται στο FMS. Ο χρόνος που χρειάζεται για να παραχθούν αυτά τα κομμάτια είναι 30 ώρες και είναι διαθέσιμος.

Στο FMS ανατίθενται οι τύποι 1, 5 και 6. Ο συνολικός χρόνος είναι $100+120+30=250$ ώρες ανά περίοδο και το κέρδος είναι $10500+3600+60=14160$.



Σχεδιασμός συστήματος (συν..)

(Γ) Το τελευταίο θέμα στο σχεδιασμό του συστήματος είναι η χωροταξική διάταξη των μηχανών, των χώρων προσωρινής αποθήκευσης και της κεντρικής αποθήκης, καθώς επίσης και η σχεδίαση διακίνησης υλικών.



Συνοψίζοντας, στο σχεδιασμό ενός FMS θα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις που αφορούν

- (1) στρατηγικούς στόχους και προϋπολογισμό,
- (2) δυναμικότητα του συστήματος (λειτουργίες που εκτελούνται σ' αυτό),
- (3) επιλογή μηχανών και στρατηγική ελέγχου αυτών,
- (4) σχεδιασμός και επιλογή κομματιών βάσει της χωρητικότητας του συστήματος και οικονομικά μεγέθη,
- (5) οριστικοποίηση της χωροταξικής διάταξης.



Λειτουργία του συστήματος

Ανάθεση των λειτουργιών και των αντίστοιχων εργαλείων που χρειάζονται οι μηχανές. Δύο περιπτώσεις είναι πιθανές.

- 1) μόνο ένα μέρος των εργαλείων μπορούν να «φορτωθούν» στη μηχανή σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, και
- 2) όλα τα απαιτούμενα εργαλεία είναι διαθέσιμα (μπορούν να «φορτωθούν») στη μηχανή οποιαδήποτε στιγμή.

Στην (1) περίπτωση τα κομμάτια ανατίθενται στο FMS κατά παρτίδες. Μια παρτίδα αποτελείται από τύπους κομματιών που απαιτούν επεξεργασία από κάποια συγκεκριμένα εργαλεία. Οι παρτίδες ανατίθενται στο FMS διαδοχικά. Όταν τελειώσει η επεξεργασία όλων των κομματιών που ανήκουν σε μια παρτίδα τότε αλλάζονται τα εργαλεία της μηχανής (retooled) και ανατίθεται η επόμενη παρτίδα.

- πρόβλημα επιλογής κομματιών που ανήκουν σε κάποια παρτίδα (part selection problem)
- πρόβλημα φόρτωσης (loading problem) επιλογή της σειράς με την οποία επεξεργάζονται τα κομμάτια και οι παρτίδες και περιλαμβάνει την ανάθεση των εργαλείων και των κομματιών στις μηχανές.

Πρόβλημα επιλογής κομματιών (part selection problem)

Στόχος είναι η επιλογή των κομματιών για το σχηματισμό συμβατών παρτίδων. Κάθε παρτίδα πρέπει να χρησιμοποιεί όλες τις μηχανές, με περιορισμένο αριθμό εργαλείων σε κάθε μηχανή και όλα τα κομμάτια να έχουν αντίστοιχες προθεσμίες.

Απλή προσέγγιση του προβλήματος:

Ανάθεση των κομματιών βασιζόμενη καταρχήν στις **προθεσμίες** τους και στη συνέχεια προσθέτοντας κομμάτια χωρίς να παραβιάζονται οι **περιορισμοί**.

Περιορισμοί:

- διαθέσιμος χώρος εργαλείων
- διαθέσιμος χρόνος σε κάθε μηχανή

Αν μια εργασία δεν μπορεί να εκτελεστεί γιατί δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος, τότε μπορεί να σπάσει και να επεξεργαστούν όσα περισσότερα κομμάτια γίνεται στην τρέχουσα περίοδο (βάρδια) και τα υπόλοιπα στην επόμενη.

Παράδειγμα: Θεωρούμε το σύνολο των κομματιών που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Διατίθενται 3 μηχανές τύπου A και 1 τύπου B και τα περισσότερα κομμάτια απαιτούν επεξεργασία και στους δύο τύπους μηχανών. Οι μηχανές ξεκινούν μια φορά την ημέρα και είναι διαθέσιμες για 12 ώρες η κάθε μια. Και τα δύο είδη μηχανών μπορούν να «κρατήσουν» 2 είδη εργαλείων. Στόχος είναι η επιλογή των κομματιών που θα επεξεργαστούν σήμερα.

Τύπος κομματιού	Μέγεθος παραγγελίας	Προθεσμία	Χρόνος επεξεργασίας ενός κομματιού (ώρες)		Εργαλεία
			Μηχανή τύπου A	Μηχανή τύπου B	
a	5	0	0.1	0.3	A1, B2
b	10	1	1.2	0.0	A2
c	25	1	0.7	0.4	A3, B4
d	10	1	0.1	0.2	A1, B2
e	4	2	0.3	0.2	A5, B3
a	10	4	0.3	0.2	A1, B2

Τα κομμάτια ταξινομούνται ως προς τις προθεσμίες. Επαναληπτικά επιλέγονται τα κομμάτια που θα σχηματίσουν την πρώτη παρτίδα. Διατίθενται συνολικά 36 ώρες επεξεργασίας και 6 εργαλεία στις μηχανές τύπου Α και 12 ώρες και 2 εργαλεία στις μηχανές τύπου Β. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Βήμα	Παραγγελίες	Χρόνος		Εργαλεία	
		A	B	A	B
1	a	0.5	1.5	A1	B2
2	a, b	12.5	1.5	A1, A2	B2
3	a, b, c	30.0	11.5	A1, A2, A3	B2, B4
4	a, b, c, d(2/10)	30.2	11.9	A1, A2, A3	B2, B4
5	a, b, c, d(2/10)	30.2	11.9	A1, A2, A3	B2, B4
6	a, b, c, d(2/10)	30.2	11.9	A1, A2, A3	B2, B4

Το πρόβλημα επιλογής κομματιών μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν πρόβλημα μικτού-ακέραιου προγραμματισμού.

D_{it} παραγγελίες κομματιών i στην περίοδο t ,
 P_j διαθέσιμος χρόνος της μηχανής j ανά περίοδο,
 p_{ij} χρόνος επεξεργασίας ενός κομματιού i από τη μηχανή j ,
 K_j θέσεις εργαλείων (tool slots) της μηχανής j ,
 k_{ij} αριθμός θέσεων που απαιτούνται από το εργαλείο i στη μηχανή j ,
 b_i κόστος ανά περίοδο για το κομμάτι i ,
 $y_{ijt} = 1$ αν το εργαλείο τύπου i ανατίθεται στη μηχανή j την περίοδο t και 0 αλλιώς
 x_{it} αριθμός κομματιών i που παράγονται την περίοδο t .

Το μοντέλο ελαχιστοποίησης του κόστους είναι το εξής

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T b_i \sum_{r=1}^t (x_{it} - D_{ir})$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{r=1}^t x_{ir} \geq \sum_{r=1}^t D_{ir} \quad \forall i, t$$

$$\sum_{i=1}^N p_{ij} x_{it} \leq P_j \quad \forall j, t$$

$$x_{it} \leq M \cdot y_{ijt} \quad \forall j(i), t$$

$$\sum_{l=1}^L k_{lj} y_{ljt} \leq K_j \quad \forall j, t$$

$$0 \leq x_{it} \quad y_{ijt} = 0 \text{ ή } 1$$

Η δυσκολία του είναι μόνο ο μεγάλος αριθμός των δυαδικών μεταβλητών που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση των εργαλείων που χρησιμοποιούνται.

Αν υπάρχει αρκετός χώρος για όλα τα εργαλεία τότε το πρόβλημα γίνεται πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και λύνεται εύκολα.



Σταδιακές μεταλλαγές στο πρόβλημα επιλογής κομματιών (Incremental Part Selection)

Διακριτές ποσότητες για το χρόνο και τον αριθμό των παρτίδων → στο τέλος κάθε περιόδου αλλαγή των εργαλείων που χρησιμοποιούν οι μηχανές. Μηχανές μένουν άεργες κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου ενώ μπορεί να ήταν επίσης άεργες σ' ένα μεγάλο διάστημα της προηγούμενης περιόδου → μείωση του ρυθμού χρησιμοποίησης των μηχανών.

Ο χρόνος μιας παρτίδας αντιστοιχεί σε μια οργανωτική περίοδο π.χ. μια βάρδια ή μια μέρα. Το σύστημα όμως λειτουργεί σε συνεχή βάση. Άρα το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί: *κάθε φορά που ολοκληρώνεται μια παραγγελία ή έρχεται κάποια νέα το πρόβλημα ξαναλύνεται με τα καινούργια δεδομένα θεωρώντας ότι το σύστημα λειτουργεί συνεχώς.*



Πρόβλημα φόρτωσης (loading problem)

Η παρτίδα των κομματιών που πρόκειται να επεξεργαστεί σε μια περίοδο έχει καθοριστεί. Στόχοι του προβλήματος η ελαχιστοποίηση:

- του χρόνου επεξεργασίας,
- του κόστους των εργαλείων ή
- του μεταβαλλόμενου κόστους λειτουργίας των μηχανών.

Μοντελοποίηση του προβλήματος

Έστω

- P_j οι διαθέσιμες ώρες λειτουργίας της μηχανής τύπου j ανά χρονική περίοδο
- p_{ij} οι ώρες επεξεργασίας ενός κομματιού τύπου i στη μηχανή τύπου j
- οι μηχανές τύπου j διαθέτουν K_j θέσεις εργαλείων και
- το εργαλείο τύπου l απαιτεί k_{lj} θέσεις στη μηχανή j

Επίσης

- c_{ij} το κόστος της επεξεργασίας i (για όλα τα κομμάτια) στη μηχανή j
- $l(i)$ το εργαλείο που απαιτείται για την επεξεργασία i
- n_l ο αριθμός των εργαλείων τύπου l

Ορίζουμε τις μεταβλητές

x_{ij} = ποσοστό της επεξεργασίας i που ανατίθεται στη μηχανή j και

$$y_{lj} = \begin{cases} 1 & \text{αν το εργαλείο } l \text{ ανατίθεται στη μηχανή } j \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Το μοντέλο ελαχιστοποίησης του κόστους είναι το εξής

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{υπό τους περιορισμούς} \quad \sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i$$

$$\sum_{i=1}^I p_{ij} x_{ij} \leq P_j \quad \forall j$$

$$\sum_{l=1}^L k_{lj} y_{lj} \leq K_j \quad \forall j$$

$$x_{ij} - y_{l(i),j} \leq 0 \quad \forall i, j$$

$$\sum_{j=1}^J y_{lj} \leq n_l \quad \forall l$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad y_{lj} = 0 \text{ ή } 1$$

Ο μεγάλος αριθμός των μεταβλητών του παραπάνω μοντέλο πολλές φορές καθιστά απαγορευτική τη χρήση του. Όταν το πρόβλημα είναι «μικρό» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη επίλυση του προβλήματος, καθώς όμως «μεγαλώνει» αυξάνει και χρόνος επίλυσης του (π.χ. για 6 μηχανές, 14 τύπους κομματιών και 311 εργαλεία χρειάστηκαν 25 λεπτά για την επίλυση).

Άμεση ανάγκη για την εύρεση απλών αλγορίθμων οι οποίοι μπορούν να ικανοποιήσουν πολλά κριτήρια κάτω από σύνθετους περιορισμούς.

Κριτήρια:

- η εξισορρόπηση του φόρτου των μηχανών,
- ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων ανάμεσα στις μηχανές,
- διατήρηση της ευελιξίας του συστήματος και
- ελαχιστοποίηση της επένδυσης των εργαλείων.



Ευρεστικός αλγόριθμος επίλυσης

Φάση I: Ανάθεση εργασιών στις μηχανές (απαιτείται μόνο αν μία εργασία μπορεί να ανατεθεί σε περισσότερες από μία μηχανές).

Προσπάθεια εξισορρόπησης του φόρτου εργασίας όλων των μηχανών.

1. Οι εργασίες ταξινομούνται με βάση τον αριθμό των διαφορετικών (εναλλακτικών) τύπων μηχανών στις οποίες μπορούν να ανατεθούν.
2. Από τις εργασίες με τις λιγότερες εναλλακτικές επιλογές επιλέγουμε εκείνη με το μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας, και
3. την αναθέτουμε στη μηχανή που χρησιμοποιήθηκε λιγότερο (με το μικρότερο χρόνο χρήσης).

Ελπίζουμε στη δημιουργία μιας εφικτής ανάθεσης στην οποία όλες οι μηχανές έχουν περίπου τον ίδιο φόρτο εργασίας. Αν αποτύχουμε να βρούμε μια εφικτή ανάθεση επιστρέφουμε στην αρχή και ξανακάνουμε την ανάθεση με διαφορετικό τρόπο.



Φάση II

Βήμα 1: Ομαδοποίηση των εργασιών σε cluster. Μια ακολουθία εργασιών οι οποίες γίνονται σε ένα κομμάτι συγχωνεύονται σε μια εργασία (cluster). Τα clusters αντικαθιστούν τις εργασίες. Μειώνεται το μέγεθος του προβλήματος, μειώνονται οι μετακινήσεις ανάμεσα στις μηχανές.

Βήμα 2: Ομαδοποίηση μηχανών, από μηχανές ίδιου τύπου με όμοια εργαλεία. Ενίσχυση ευελιξίας του συστήματος.

Ελάχιστος αριθμός εφικτών ομάδων = ο μικρότερος ακέραιος που ξεπερνάει το κλάσμα (αριθμός θέσεων εργαλείων που απαιτούνται/ αριθμός θέσεων εργαλείων που διατίθενται).

Βήμα 3: Ανάθεση των εργασιών στις ομάδες των μηχανών βάσει του κανόνα LPT (Longest Processing Time) (θεωρία αναμονής). Εξισορρόπηση φόρτου εργασίας. Ενίσχυση της ευελιξίας του συστήματος και σ' αυτό το βήμα (επειδή πολλές εργασίες (cluster) μπορεί να απαιτούν τα ίδια εργαλεία).

Παράδειγμα: Μια ομάδα μηχανών προγραμματίζεται να επεξεργαστεί τρεις τύπους κομματιών. Οι βασικές λειτουργίες μπορούν να γίνουν σε περισσότερους από έναν τύπο μηχανών με διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας. Για κάθε επεξεργασία όμως πρέπει να επιλεγεί ένας τύπος μηχανής μόνο. Η ομάδα περιλαμβάνει 2 μηχανές τύπου Α, 2 τύπου Β και 1 τύπου C. Οι μηχανές τύπου Α έχουν 3 θέσεις εργαλείων, οι Β 1 θέση και οι C 4 θέσεις. Κάθε μηχανή αναμένεται ότι θα είναι διαθέσιμη 800 λεπτά ανά περίοδο. Να βρεθεί μια καλή ανάθεση των εργαλείων και των εργασιών στις μηχανές. Τα κριτήρια που μας ενδιαφέρουν είναι η ευελιξία του συστήματος, η ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων και η εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας των μηχανών.

Κομμάτι	Ζήτηση	Επεξεργασία	Χρόνος επεξεργασίας (min)			Εργαλείο
			A	B	C	
1	40	1	12	11	10	a
		2	13	15	∞	b
		3	14	14	∞	c
2	100	1	2	4	∞	a
		2	2	6	6	c
3	100	1	4	∞	∞	d
		2	5	∞	6	e
		3	∞	∞	4	f

Φάση Ι

E ^(*1)	Μηχανές που μπορούν να ανατεθούν οι εργασίες								Eρ ^(*2)	M ^(*3)	Διαθεσιμότητα	
	11	12	13	21	22	31	32	33			Χρ ^(*4)	Εργ ^(*5)
1	A,B,C	A,B	A,B	A,B	A,B,C	A	A,C	C	33	C	400	3.0
2	A,B,C	A,B	A,B	A,B	A,B	A	A	-	32	A	550	2.5
3	A,B,C	A,B	A,B	A,B	A,B	A	-	-	31	A	350	2.0
4	A,B,C	A,B	A,B	A,B	A,B	-	-	-	13	B	520	1.0
5	A,B,C	A,B	-	A,B	A,B	-	-	-	12	B	260	0.0
6	A,B	-	-	A	A	-	-	-	21	A	250	1.5
7	A,C	-	-	-	A	-	-	-	22	A	150	1.0
8	C	-	-	-	-	-	-	-	11	C	0	2.0

(*1) Επανάληψη

(*4) Χρόνος και

(*2) Εργασία που επιλέγεται

(*5) Θέσεις εργαλείων που απομένουν ανά μηχανή

(*3) Μηχανή που επιλέγεται



Φάση II

Βήμα 1: Ομαδοποίηση εργασιών για τη μηχανή Α. Τα κομμάτια τύπου 2 (εργασίες 21 και 22) μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ένα cluster. Οι εργασίες όμως που αφορούν τα κομμάτια τύπου 3 δεν μπορούν να ομαδοποιηθούν γιατί ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας τους ανέρχεται στα 900 (400+500) λεπτά και η κάθε μηχανή διαθέτει μόνο 800. Άρα σχηματίζουμε τα cluster {21, 22}, 31 και 32.

Βήμα 2: Ομαδοποίηση μηχανών. Για να εκτελεστούν οι εργασίες οι οποίες αποφασίστηκε να ανατεθούν στις μηχανές Α απαιτούνται 4 εργαλεία. Κάθε μηχανή μπορεί να «κρατήσει» 3 εργαλεία. Ελάχιστος αριθμός των εφικτών ομάδων= $\lceil 4/3 \rceil = 2$. Συνεπώς αφού απαιτούνται 2 ομάδες κάθε μηχανή Α αποτελεί μια ομάδα.

Βήμα 3: Ανάθεση εργασιών. Οι εργασίες που πρέπει να ανατεθούν είναι οι {21, 22}, 31 και 32 με αντίστοιχους χρόνους 400, 400, και 500. Βάσει του κανόνα LPT λοιπόν ξεκινάμε την ανάθεση από την 32 η οποία πάει στην πρώτη μηχανή Α με εργαλείο e. Το επόμενο cluster {21, 22} δεν μπορεί να ανατεθεί στην ίδια μηχανή (λόγω διαθέσιμου χρόνου) και συνεπώς ανατίθεται στη δεύτερη μηχανή Α με εργαλεία a και c. Τέλος η 31 πρέπει να ανατεθεί στη δεύτερη μηχανή Α (με εργαλείο d) επειδή έχει τον περισσότερο διαθέσιμο χρόνο.



Φάση II (συνέχεια)

Βήμα 1: Ομαδοποίηση εργασιών για τη μηχανή Β. Οι εργασίες 12 και 13 δεν μπορούν να ομαδοποιηθούν επειδή χρειάζονται διαφορετικά εργαλεία και η μηχανή Β μπορεί να κρατήσει μόνο ένα εργαλείο. Εξάλλου και ο διαθέσιμος χρόνος δεν επαρκεί γι' αυτή την ομαδοποίηση (600+560).

Βήμα 2: Ομαδοποίηση μηχανών. Απαιτούνται $\lceil 2/1 \rceil = 2$ ομάδες. Άρα κάθε μηχανή αποτελεί μια ομάδα.

Βήμα 3: Ανάθεση εργασιών. Βάσει του κανόνα LPT η εργασία 12 (με χρόνο 600 λεπτά) ανατίθεται στην πρώτη μηχανή Β και η 13 (με χρόνο 560 λεπτά) ανατίθεται στη δεύτερη μηχανή.

Βήμα 1: Ομαδοποίηση εργασιών για τη μηχανή C. Επειδή υπάρχει μόνο μία μηχανή C οι εργασίες 11 και 33 ανατίθενται σ' αυτή τη μηχανή (φυσικά αυτό είναι εφικτό, χρόνος 400+400 και η μηχανή μπορεί να «κρατήσει» τα δύο εργαλεία που χρειάζονται).



Βαθμίδες ελέγχου των FMS

Σ' ένα FMS υπάρχει ευελιξία ως προς την ποσότητα και την πορεία των κομματιών μέσα στο σύστημα. Αυτή η ευελιξία εκφράζεται με τις τρεις βαθμίδες ελέγχου που μπορούμε να ασκήσουμε στο σύστημα και που ουσιαστικά είναι τα 3 μεγάλα προβλήματα των FMS.

1. Έλεγχος ροής (flow control). Ο έλεγχος εδώ ρυθμίζει τους (μέσους) **ρυθμούς παραγωγής** κάθε εργασίας έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της ζήτησης λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά αξιοπιστίας των μηχανών και τις στάθμες αποθέματος στους χώρους εναποθήκευσης.
2. Έλεγχος δρομολόγησης (routing control). Έχοντας προσδιορίσει τους συνολικούς ρυθμούς παραγωγής από την ιεραρχία (1) προσδιορίζουμε τη **βέλτιστη δρομολόγηση κομματιών** στην κάθε μηχανή με σκοπό να έχουμε τους ζητούμενους ρυθμούς παραγωγής και την ελαχιστοποίηση των ουρών μπροστά από τις μηχανές.
3. Έλεγχος ακολουθίας (sequence control). Αυτός ο έλεγχος καθορίζει τους **χρόνους** που κάθε εργασία φτάνει στο σύστημα, την **ακολουθία** τους μέσα στο σύστημα έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι (1) και (2).



Παραδείγματα ελέγχου δρομολόγησης:

- SPT: μικρότερος χρόνος επεξεργασίας (shortest processing time)
- LPT: μεγαλύτερος χρόνος επεξεργασίας (longest processing time)
- FOPR: λιγότερες εναπομένουσες επεξεργασίες για κάθε κομμάτι (fewest operations remaining)
- MOPR: περισσότερες εναπομένουσες επεξεργασίες (most operations remaining)
- SPT·TOT: μικρότερος χρόνος της συγκεκριμένης επεξεργασίας πολλαπλασιασμένος με το συνολικό χρόνο επεξεργασίας όλης της εργασίας
- SPT/TOT,
- LPT·TOT,
- LPT/TOT κτλ.

Τέτοιοι κανόνες είναι ευρεστικοί και ελέγχονται με προσομοίωση σχετικά με κάποιο πρωτόκολλο λειτουργίας και για κάποιο μέτρο απόδοσης (π.χ. συνολική παραγωγή ή μέγεθος ουρών και αποθεμάτων).

Παράδειγμα FMS της Caterpillar

Το σύστημα αυτό παράγει εξωτερικά καλύμματα δύο μεγεθών αυτομάτων κιβωτίων. Για το κάθε κάλυμμα απαιτείται ένα κιβώτιο και το καπάκι. Τα κομμάτια φεύγουν από το σύστημα σαν συναρμολογημένα ζεύγη. (Παρατηρούμε την ύπαρξη πλεονασμού μηχανών για να υπάρχει ευελιξία.)

Για το συγκεκριμένο σύστημα έχει βρεθεί ότι ο κανόνας δρομολόγησης SPT/TOT δίνει το μέγιστο ρυθμό συνολικής παραγωγής (throughput rate).

