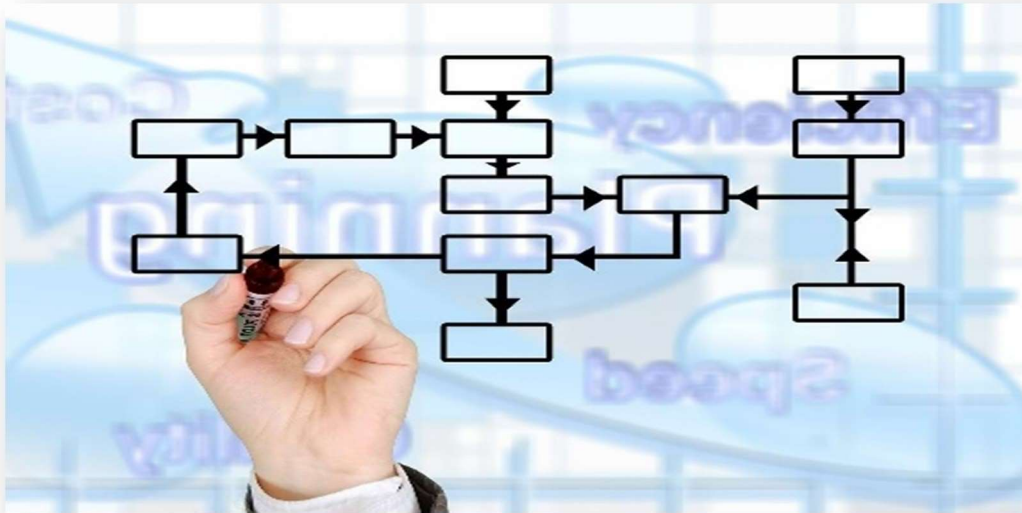




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκριτική μελέτη μεθόδων εξισορρόπησης γραμμής παραγωγής



Της φοιτήτριας

Περρή Ευφροσύνης

A.M. 51204274

Επιβλέποντες καθηγητές:

Σαγιάς Βασίλειος

Κονδύλη Αιμιλία

ΑΙΓΑΛΕΩ , ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κονδύλη Αιμλία
Καθηγήτρια

Παπαποστόλου Χριστιάνα
Επ.Καθηγήτρια

Σαγιάς Βασίλειος
ΕΕΠ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η υπογράφουσα Ευφροσύνη Περρή τουΜιχαήλ....., με αριθμό μητρώου 51204274 φοιτήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

Η Δηλούσα

2/8/2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι γραμμές παραγωγής (assembly lines) είναι, παραδοσιακά, συστήματα μαζικής συναρμολόγησης προϊόντων, που αποτελούνται από σταθμούς εργασίας κατά μήκος ενός μηχανισμού μεταφοράς. Οι απαιτήσεις σε κεφάλαια επενδύσεων κατά την εγκατάσταση ή τον επανασχεδιασμό μιας γραμμής συναρμολόγησης είναι υψηλές και το ενδιαφέρον των ερευνητών για τον τομέα αυτό είναι μεγάλο. Ο σχεδιασμός μιας γραμμής παραγωγής αφορά στην καταλληλότερη κατανομή του συνολικού φόρτου εργασίας για την κατασκευή κάθε μονάδας του προϊόντος που πρόκειται να συναρμολογηθεί μεταξύ των υπάρχοντων σταθμών εργασίας, στην μείωση των σταθμών εργασίας και του χρονικού κύκλου εργασιών με απώτερο στόχο την αύξηση της απόδοσης της γραμμής παραγωγής. Οι μέθοδοι εξισορρόπησης (Assembly Line Balancing, ALB) αφορούν στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας μαζικής παραγωγής μέσω διαίρεσης των εργασιών σε σταθμούς εργασίας και κατανομής ίσου χρόνου επεξεργασίας στον καθένα, χωρίς την ύπαρξη καθυστέρησης. Πολλές επιστημονικές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για την περιγραφή και την επίλυση των προβλημάτων εξισορρόπησης των γραμμών συναρμολόγησης (Assembly Line Balancing Problem, ALBP). Δυο είναι οι γενικές τάσεις που αφορούν την επίλυση των ALBP: η χρήση ευρετικών μεθόδων για τα σχετικά απλά ALB προβλήματα και χρήση μετα-ευρετικών μεθόδων για πιο σύνθετα προβλήματα. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή τριών ευρετικών μεθόδων (LCR, KWC, RPW) στην εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης σε πέντε διαφορετικές περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις επιτεύχθηκε η εξισορρόπηση της γραμμής με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση. Οι μέθοδοι LCR και RPW εμφανίζουν την ίδια αποτελεσματικότητα στην απόδοση γραμμής, ανεξαρτήτως του τρόπου αντιμετώπισης του προβλήματος (SALBP-1 ή SALBP -2), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η KWC μέθοδος έχει μικρότερη δυναμική στα προβλήματα εξισορρόπησης. Αναφορικά με την μείωση της καθυστέρησης εξισορρόπησης σε ποσοστιαίες μονάδες, είναι και αυτή ανεξάρτητη των μεθόδων που θα χρησιμοποιήσουμε, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα, αλλά εξαρτάται από την αύξηση της απόδοσης γραμμής.

Λέξεις Κλειδιά: σύστημα παραγωγής, γραμμή συναρμολόγησης, μέθοδοι εξισορρόπησης γραμμής παραγωγής, ευρετική μέθοδος

ABSTRACT

Traditionally assembly lines are systems of mass production, consisting of workstations along a conveyor mechanism. Investment capital requirements when installing or redesigning an assembly line are high and the interest of researchers in this area is high too. The design of an assembly line has to do with the most appropriate allocation of total workload between the existing workstations, the reduction of the number of workstations and the cycle time in order to increase the efficiency of the line. The Assembly Line Balancing (ALB) is about the optimization of mass production process by dividing tasks into several workstations and allocating equal processing time to each one, without delay. Much scientific research has been carried out about solving Assembly Line Balancing Problems (ALBP). There are two main groups of solving problems methods: the group of heuristic methods, used for simple ALB problems and the group of meta-heuristic methods, used for more complex situations. In this thesis, a comparison was made between three heuristic methods (LCR, KWC, RPW) which were used for solving ALBPs in five case studies. In these case studies, assembling line balancing was achieved finally and the efficiency was increased. The LCR and RPW methods had the same efficiency increase in line performance, regardless of how the problem is addressed (SALBP-1 or SALBP -2), while in some cases the KWC method appears to be less effective in balancing problems. Regarding the percentage reduction of balancing delay, it turns out to be independent of the used method, but it depends on the increase of the line efficiency.

Keywords: production system, assembly line, timing, line balancing methods, production administration, heuristic method

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

Ακρωνύμια	Επεξήγηση
ALB	Assembly Line Balancing, <i>Εξισορρόπηση Γραμμής Συναρμολόγησης</i>
ALBP	Assembly Line Balancing Problem <i>Προβλήματα Εξισορρόπησης Γραμμής Συναρμολόγησης</i>
SALBP	Single Assembly Line Balancing Problem, <i>Πρόβλημα Εξισορρόπησης Μονής Γραμμής Συναρμολόγησης</i>
MiMALBP	Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem <i>Μεικτό Μοντέλο Προβλημάτων Εξισορρόπησης Γραμμής Συναρμολόγησης</i>
GALBP	General Assembly Line Balancing <i>Γενική Εξισορρόπηση Γραμμής Συναρμολόγησης</i>
RPW	Rank Positional Weight <i>Βάρος Θέσης Κατάταξης</i>
LCR	Largest Candidate Rule <i>Κανόνας Μεγαλύτερου Υποψηφίου</i>
KWC ή K-W	Kilbridge And Wester Column <i>Στήλη Kilbridge και Wester</i>

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΓΕΝΙΚΑ	13
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	17
1.3 ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΤΑΘΜΙΣΗ	19
1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο :ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	20
2.1 ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ASSEMBLY LINE BALANCING, ALB)	20
2.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEMS, ALBP)	21
2.3 ΣΤΑΘΜΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	23
2.4 ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ (CYCLE TIME, CT)	23
2.5 ΧΡΟΝΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	24
2.6 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ - ΝΕΚΡΟΣ ΧΡΟΝΟΣ (d)	24
2.7 ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ (Δ.Ο.)	25
2.8 ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (P)	25
2.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΔΟΧΗΣ	25
2.10 BALANCING EFFICIENCY (ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ)	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΕΙΔΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	27
3.1 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	29
3.2 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΞΗ	35
3.3 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΡΥΘΜΟ	39
3.4 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ALBP)	44
4.1 ΑΠΛΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING, SALB)	46
4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (GENERAL ASSEMBLY LINE BALANCING, GALB)	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	55
5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ (RANK POSITIONAL WEIGHT, RPW)	55
5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΥ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ (LARGEST CANDIDATE RULE, LCR).....	56
5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ KILBRIDGE ΚΑΙ WESTER (KILBRIDGE AND WESTER COLUMN, KWC ή K-W)	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ SALBP	59
6.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ I (Bakar, A.N., Ramli, M.F., Zakaria, Z.M., Sin, T.C., & Masran, H., 2020)	60
6.2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ II (Pachghare, V. & Dalu,R. S. , 2014)	66
6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΙΙΙ (Kumar, R.N., Mohan, R., & Gobinath, N., 2021)	69
6.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΙV (Sidar & Mishra, 2023)	72
6.5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ V (Mishra & Soni, 2021).....	75
ΣΥΖΗΤΗΣΗ : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	79
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86
ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΓΕΝΙΚΑ

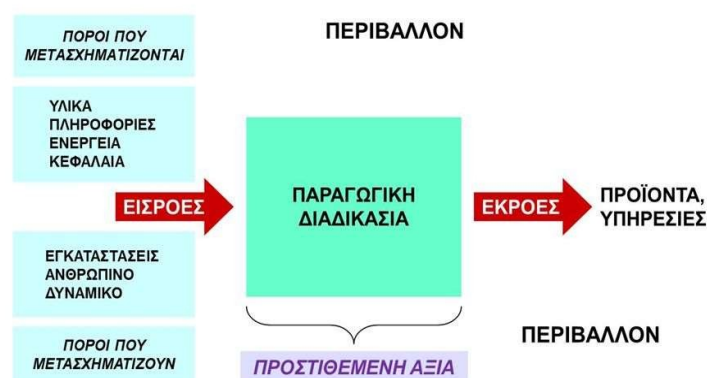
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε ένα διαρκώς αναπτυσσόμενο και άκρως ανταγωνιστικό εργασιακό περιβάλλον, η βελτιστοποίηση των συστημάτων παραγωγής ώστε να γίνουν όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά στο συντομότερο δυνατό χρόνο, είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της εξέλιξης.

Σε ένα τόσο απαιτητικό περιβάλλον απαιτείται η ύπαρξη συστημάτων παραγωγής τα οποία θα σχεδιάζονται ταχέως, θα προσαρμόζονται εύκολα στην παραγωγή καινούργιων προϊόντων, θα μπορούν να ενσωματώνουν τις νέες τεχνολογίες και θα είναι σε θέση να παράγουν μια μεγάλη ποικιλία ειδών σε διαφορετικά μεγέθη. Σε αυτές τις συνθήκες, η ύπαρξη μιας αποτελεσματικής γραμμής συναρμολόγησης έχει ιδιαίτερη σημασία στην βιομηχανία.

Με τον όρο *παραγωγικό σύστημα* εννοούμε κάθε οργανωμένο σύνολο δραστηριοτήτων και στοιχείων τα οποία παράγουν, κατόπιν επεξεργασίας, ένα σύνολο προϊόντων ή υπηρεσιών (εικόνα 1).

Σύστημα παραγωγής



Συστήματα Παραγωγής

5

Εικόνα 1. Συστήματα παραγωγής (πηγή <https://slideplayer.gr/slide/11424370/>)

Με το όρο *γραμμή παραγωγής* (assembly line) αναφερόμαστε σε ένα σύστημα μαζικής παραγωγής προϊόντων το οποίο περιλαμβάνει σταθμούς εργασίας (workstations) τοποθετημένους κατά μήκος ενός μηχανισμού μεταφοράς όπως είναι π.χ. ένα μεταφορικός ιμάντας. Οι σταθμοί εργασίας είναι ευθυγραμμισμένοι με ένα σειριακό

τρόπο και τα ημιτελή προϊόντα (workpieces) ακολουθώντας μια συνεχιζόμενη ροή, κινούνται από σταθμό σε σταθμό έως ότου ολοκληρωθεί η συναρμολόγησή τους (Boysen N. et al., 2008).

Η δημιουργία γραμμών παραγωγής αρχικά στόχευε την μαζική, αλλά ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτική, δημιουργία προϊόντων τα οποία θα ακολουθούν συγκεκριμένο πρότυπο, ενώ συγχρόνως θα παράγεται μια στρατιά υψηλά εξειδικευμένου προσωπικού (Scholl, 1999) (Shtub, A., Dar-El, E.M. , 1989). Οι γραμμές παραγωγής απέβλεπαν στην ταυτόχρονη εξοικονόμηση κόστους και χρόνου παραγωγής. Παρόλα αυτά η δυναμικότητά τους κάλυπτε μόνο τα ίδια ή παρεμφερή προϊόντα και δεν υπήρχε δυνατότητα πραγματοποίησης μετατροπών μέσα σε συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής.

Σύμφωνα με τον Sholl (1998), τα κύρια πλεονεκτήματα μιας γραμμής παραγωγής σε ένα εργοστάσιο είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Η υψηλή αξιοποίηση της χωρητικότητας σε συνδυασμό με τον μικρό χρόνο διεκπεραίωσης.
- ✓ Η χαμηλή στάθμη των αποθεμάτων που σχετίζονται με ημιτελείς εργασίες .
- ✓ Η ελεγχόμενη ροή των υλικών.
- ✓ Η όλο και σε μεγαλύτερη έκταση αντικατάσταση των χειροκίνητων διαδικασιών με αντίστοιχες μηχανοκίνητες.
- ✓ Οι μικρότερες απαιτήσεις σε χώρο για την αποθήκευσή και μετακίνηση των υλικών.
- ✓ Οι λιγότερες απαιτήσεις σε εξειδικευμένο προσωπικό λόγω του καταμερισμού της εργασίας.

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα ενός συστήματος γραμμής ροής ισχύουν τα εξής:

- ✓ Το υψηλό κεφάλαιο που απαιτείται, ειδικά στην περίπτωση εγκατάστασης αυτοματοποιημένων συστημάτων.
- ✓ Το χαμηλό ποσοστό ικανοποίησης των εργαζομένων λόγω της υπεραπλουστευμένης και μονότονης εργασιακής καθημερινότητας.
- ✓ Η αρνητική επίδραση της έλλειψη ευελιξίας -λόγω της υψηλής εξειδίκευσης- στα συστήματα ροής ειδικά στην περίπτωση προϊόντων με μικρό κύκλο ζωής.

- ✓ Η υψηλή εξάρτηση από την συντήρηση και την επισκευή των μηχανήματων καθώς σε περίπτωση μηχανική βλάβης το σύστημα θα καταρρεύσει ολοκληρωτικά.
- ✓ Η ανάγκη ένταξης συστημάτων ποιοτικού ελέγχου στην παραγωγική διαδικασία.

Κατά τον προγραμματισμό μιας παραγωγικής διαδικασίας είναι αναγκαίο να δοθούν απαντήσεις αναφορικά με το *ποιες* είναι οι ζητούμενες παραγωγικές ποσότητες αλλά και *ποια* είναι η κατάλληλη σειρά των επιτελούμενων εργασιών ώστε να επιτευχθεί ένα στοχευμένο αποτέλεσμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητο να οριστεί η *βέλτιστη κατανομή των εργασιών* στα μέσα παραγωγής, καθώς υπάρχει η πιθανότητα να προκύψει σοβαρό πρόβλημα. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι ακόλουθες (Κώστογλου Β.,2015):

- Όταν υφίσταται μια μεγάλη γκάμα εργασιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν.
- Όταν υφίσταται μια μεγάλη γκάμα διαθέσιμων μέσων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επιτέλεση των εργασιών αυτών.
- Όταν διαφέρει η σειρά των εργασιών που πρέπει να εκτελεστούν (κάποιες γίνονται ταυτόχρονα και κάποιες διαδοχικά) και
- Όταν ένα μέσο είναι σε θέση να εκτελέσει πολλαπλές εργασίες.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος γραμμής συναρμολόγησης περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του αριθμού των σταθμών εργασίας, την ισοκατανομή του φόρτου εργασίας μεταξύ των σταθμών κ.α κάτι που βοηθά μια εταιρεία να αξιοποιήσει κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις ώστε να παράγει την στοχευμένη ποσότητα προϊόντος (Sivasankaran P.& Shahabudeen P., 2014)

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενός συστήματος γραμμής συναρμολόγησης (Panneerselvam R, 2005) είναι:

- Το δίκτυο εργασιών και προτεραιοτήτων.
- Οι πιθανοί χρόνοι εργασιών (οι οποίοι υπολογίζονται είτε με βάση την αίτια είτε με βάση την πιθανότητα).
- Ο χρόνος του κύκλου εργασιών ή ο αριθμός των σταθμών εργασίας.

Με την εφαρμογή μεθόδων εξισορρόπησης- βελτιστοποίησης της γραμμής παραγωγής όπως στην περίπτωση του δύσκολου και πολύπλοκου προβλήματος που αφορά στον

σχεδιασμό της χωροταξικής διάταξης παραγωγής, τα οφέλη μπορεί να είναι πολλαπλά (Κώστογλου Β.,2015), όπως :

- i. Η ελάττωση των καθυστερήσεων στην παραγωγική ροή η οποία οδηγεί στην άνοδο του ρυθμού παραγωγής
- ii. Η ελάττωση των αποστάσεων που πρέπει να διανύσουν τα υλικά, η οποία συνεπάγεται και την ελάττωση του κόστους μετακίνησης των υλικών αυτών.
- iii. Η καταλληλότερη χρήση των μέσων παραγωγής, της μετακίνησης των προϊόντων αλλά και η κατάλληλη διαρρύθμιση των χώρων παραγωγής οδηγεί στην ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων επενδύσεων.
- iv. Ο εργονομικός σχεδιασμός της παραγωγικής διαδικασίας και των θέσεων εργασίας οδηγεί στην αύξηση παραγόμενης της απόδοσης.
- v. Η θετική επίδραση των ανωτέρω χαρακτηριστικών στην ψυχολογία των εργαζομένων καθώς οδηγούν στην μείωση της εργασιακής ανασφάλειας.

Δεδομένου ότι η εγκατάσταση μιας γραμμής συναρμολόγησης απαιτεί μεγάλη επένδυση κεφαλαίου αλλά και χρόνου, είναι σημαντικό ένα τέτοιο σύστημα να είναι προσεκτικά σχεδιασμένο ώστε να λειτουργεί όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Έτσι δεν αρκεί μόνο η αρχική εξισορρόπηση ενός νέου συστήματος, αλλά απαιτείται εκ νέου εξισορρόπηση περιοδικά ή αφότου πραγματοποιηθούν αλλαγές είτε στην διαδικασία είτε στο πρόγραμμα παραγωγής. Επειδή δε οι αποφάσεις εξισορρόπησης δύναται να έχουν μακροπρόθεσμη επίδραση, οι ενδιάμεσοι σκοποί θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά ώστε να υπηρετούν τους στρατηγικούς στόχους της επιχείρησης και ειδικά αυτούς που σχετίζονται με το κόστος και το κέρδος (Becker, C., & Scholl, A. ,2006).

Κατά το σχεδιασμό μιας γραμμής συναρμολόγησης πρέπει να τίθενται οι παρακάτω περιορισμοί (Ghutukade S, Sawant S.,2013) :

- I. Η ύπαρξη προτεραιοποίησης μεταξύ των διαφόρων εργασιών.
- II. Ο αριθμός των στοιχείων εργασίας δεν μπορεί να υπερβαίνει τον αριθμό των σταθμών εργασίας (ο οποίος πρέπει να είναι $>$ ή $=1$)
- III. Ο χρόνος για την συμπλήρωση του κύκλου εργασιών (cycle time) είναι μεγαλύτερος ή ίσος του μεγαλύτερου χρόνου σταθμού καθώς και του χρόνου των στοιχείων εργασίας.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Με τον όρο *Διοίκηση Παραγωγής* αναφερόμαστε στο σύνολο των δραστηριοτήτων οι οποίες αποσκοπούν στην διαχείριση των υλικών και ανθρωπίνων πόρων οι οποίοι εμπλέκονται στην παραγωγή προϊόντων ή και υπηρεσιών.

Η ανάγκη για διοίκηση παραγωγής δημιουργήθηκε με την έναρξη της μαζικής παραγωγής προϊόντων, γεγονός που αποτέλεσε μια από τις κορυφαίες αλλαγές που επέφερε η 1^η Βιομηχανική Επανάσταση, η οποία έλαβε χώρα μεταξύ των ετών 1760-1850.

Από το 1850 έως το 1880 εκτυλίχθηκε η 2^η Βιομηχανική Επανάσταση (γνωστή και ως Τεχνολογική Επανάσταση) με κύριο χαρακτηριστικό της την μαζική διάθεση προϊόντων και την *ραγδαία* εξάπλωση των σιδηροδρομικών και τηλεγραφικών δικτύων.

Στην περίοδο 1880 έως 1920, γνωστή ως «*Εποχή της Μαζικής Παραγωγής Μεγάλης Κλίμακας και Μεγάλης Ταχύτητας*» παρατηρείται μεγάλη άνθιση στις βιομηχανίες πετρελαίου, αλουμινίου, χάλυβα και καπνού στις οποίες και δημιουργήθηκαν παραγωγές εκτεταμένης κλίμακας (Dillon, P. , 2019).

Το 1913 ο Ford ήταν εκείνος που στην προσπάθεια του να ανεβάσει την αποδοτικότητα της επιχείρησής του, δημιούργησε την πρώτη «*κινητή γραμμή συναρμολόγησης*» (εικόνα 2) η οποία οδήγησε τελικά στην συναρμολόγηση ενός *Model T Ford* αυτοκίνητου κάθε 24 sec (Ghutukade Santosh, 2013), (Make, et al., 2017). Με αυτό τον τρόπο κατάφερε όχι μόνο να μειώσει κατακόρυφα τον χρόνο παραγωγής αλλά και να κάνει προσιτή την αγορά αυτοκίνητου στο ευρύ κοινό, αυξάνοντας τα κέρδη της Ford Motor Company (Royston, A. , 2016).



Εικόνα 2: Κινητή γραμμή συναρμολόγησης Ford, 2013 (πηγή: <https://www.drive.gr/posts/classic>)

Έκτοτε μια μεγάλη γκάμα βελτιώσεων και εξελίξεων έχουν αναφερθεί σχετικά με την επίλυση των ALB προβλημάτων και την βελτιστοποίηση της μεθόδου. Εκτός αυτού, το 1955, ο Salvesson παρουσίασε την πρώτη μαθηματική προσέγγιση για την επίλυση του ALB προβλήματος, ενώ στις μέρες μας η έρευνα συνεχίζεται με στόχο την εξέλιξη των προηγούμενων μεθόδων (Make, et al., 2017).

Το 1961 πρωτοεμφανίζεται η *Kilbridge and Wester's Column Method (KWC)* για την επίλυση ALB προβλημάτων (Make, et al., 2017). Πρόκειται για μια **ευρετική** - παραγωγή από το αρχαίο ελληνικό ευρίσκω- τεχνική (*Heuristic Technique*) η οποία κάνει χρήση πρακτικών μεθόδων που δεν εγγυώνται το τέλειο ή το ορθολογικό αποτέλεσμα αλλά παρόλα αυτά είναι ικανές να επιτύχουν τον στόχο (Rafael M., Gerhard R., 2022).

Το 1961 οι Helgeson and Birnie εισάγουν την μέθοδο *Ranked Positional Weight (RPW)* (Make, et al., 2017), η οποία αποτελεί έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους ανάθεσης εργασιών στους σταθμούς εργασίας. Στη μέθοδο RPW, γίνεται ρύθμιση του κύκλου εργασιών και στην συνέχεια υπολογίζεται η εργασία στους σταθμούς που απαιτείται για την γραμμή παραγωγής ή αντίστροφα. Η μέθοδος υπολογίζει τον χρόνο επεξεργασίας, την καθυστέρηση της ισορροπίας, τον δείκτη ομαλότητας, την μεγαλύτερη απόδοση τροχιάς καθώς και την απόδοση του σταθμού (Supriyono, Suryanto D., Hendra F., Efenti R., 2020).

Η εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης είναι το κλειδί για την οργάνωση της παραγωγικότητα σε σχέση με τον μειωμένο αριθμό θέσεων εργασίας για έναν δεδομένο όγκο παραγωγής ανά βάρδια. Η εξισορρόπηση γραμμής μεικτών μοντέλων συναρμολόγησης υφίσταται σε πολλούς οργανισμούς. Οι Sivasankaran &

Shahabudeen, (2014) ανέπτυξαν τρεις γενετικούς αλγόριθμους για το πρόβλημα εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου, έτσι ώστε η συνδυασμένη απόδοση εξισορρόπησης (δηλ. ο μέσος όρος των αποδόσεων εξισορρόπησης των μεμονωμένων μοντέλων) να μεγιστοποιείται.

Η έρευνα εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης, η οποία παραδοσιακά επικεντρωνόταν σε απλά προβλήματα (SALBP) έχει πρόσφατα εξελιχθεί προς τη διαμόρφωση και επίλυση γενικευμένων προβλημάτων (GALBP) με διαφορετικά πρόσθετα χαρακτηριστικά όπως συναρτήσεις κόστους, επιλογή εξοπλισμού, παράλληλη διάταξη, διάταξη γραμμής σχήματος U και παραγωγή μικτών μοντέλων (Becker & Scholl, 2006).

1.3 ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΤΑΘΜΙΣΗ

Η κριτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας των προβλημάτων εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης παρέχει σε βάθος κατανόηση των διαφόρων κατηγοριών προβλημάτων και της σχετικής έρευνας. Οι επιστήμονες προσπαθούν να αναπτύξουν περισσότερες μετα-ευρετικές μεθόδους για προβλήματα ALB πολλαπλών μοντέλων π.χ. γενετικός αλγόριθμος, αλγόριθμος προσομοίωσης αναζήτησης tabu, αλγόριθμος ACO, αλγόριθμος PSO, GRASP, κ.λπ. Κατά την ανάπτυξη του γενετικού αλγόριθμου, οι ερευνητές αναζητούν διαφορετικές μεθόδους διασταύρωσης και να τις συγκρίνουν ως προς την αποτελεσματικότητά τους και ως προς την ακρίβεια της λύσης (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014).

Ομοίως, η ανάπτυξη του αλγόριθμου *Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing)*, ο οποίος προτάθηκε το 1983, από τους Kirkpatrick, Gelatt και Vecchi, αποτελεί μια μέθοδο για την επίλυση των ζητημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Ο όρος Ανόπτωση, ο οποίος βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην θερμοδυναμική, αναφέρεται στην διαδικασία σύμφωνα με την οποία ένα στερεό υλικό αρχικά θερμαίνεται μέχρι να φτάσει στο σημείο τήξης του και μετά ψύχεται με αργό ρυθμό ώστε η ενέργειά του να πέσει όσο πιο χαμηλά γίνεται στο τέλος της ψύξης. Κατά την συνδυαστική προσέγγιση της βελτιστοποίησης, οι ερευνητές αναζητούν τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό ευρετικών & μετα-ευρετικών μεθόδων δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό αλγόριθμο (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014).

1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία αφορά στην συγκριτική μελέτη μεθόδων εξισορρόπησης γραμμής παραγωγής, η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί απεικονίζεται στην παρακάτω ροή εργασιών:

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση των στοιχείων λειτουργίας μιας γραμμής συναρμολόγησης (ALB)
- Βιβλιογραφική ανασκόπηση των προβλημάτων μιας γραμμής συναρμολόγησης (ALBP)
- Βιβλιογραφική ανασκόπηση ευρετικών μεθόδων (LCR, KWC, RPW, SPT, LPT) εξισορρόπησης μιας γραμμής συναρμολόγησης,
- Καταγραφή πέντε (5) case studies που αφορούν σε πρακτική εφαρμογή ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης σε συγκεκριμένες γραμμές παραγωγής
- Σύγκριση αποτελεσμάτων εξισορρόπησης από την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο :ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

2.1 ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ASSEMBLY LINE BALANCING, ALB)

Ο όρος *εξισορρόπηση γραμμής συναρμολόγησης (ALB)* αναφέρεται στην ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης τα οποία στοχεύουν στην λήψη των κατάλληλων αποφάσεων ώστε να δημιουργηθούν αποτελεσματικά συστήματα συναρμολόγησης. Συγκεκριμένα η ALB αφορά στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας μαζικής παραγωγής μέσω διαίρεσης των εργασιών σε σταθμούς εργασίας και κατανομής ίσου χρόνου επεξεργασίας στον καθένα, χωρίς την ύπαρξη καθυστέρησης. Η γραμμή συναρμολόγησης στην οποία οι σταθμοί εργασίας έχουν ίσο χρόνο επεξεργασίας με λιγότερο ή καθόλου χρόνο αδράνειας θεωρούνται ιδανικοί. Επομένως, η εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης αναφέρεται στον στρατηγικό σχεδιασμό, εντοπισμό και αλληλουχία των σταθμών εργασίας με στόχο την διευκόλυνση της διαδικασίας παραγωγής.

Αρχικά οι επιστήμονες επικεντρώθηκαν στην ανάθεση καθηκόντων ανά σταθμό εργασίας καθώς και στον προσδιορισμό των προτεραιοτήτων των απαιτούμενων εργασιών ανά σταθμό . Αργότερα διερευνήθηκαν και άλλες παράμετροι όπως αλλαγή

της διάταξης της γραμμής π.χ. U-shape κλπ. (Scholl, A., Becker, C, 2006), η χρήση ευρετικών μεθόδων, γενετικών αλγορίθμων κλπ. για την βελτίωση της εξισορρόπησης.

2.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEMS, ALBP)

Στις μέρες μας οι γραμμές συναρμολόγησης εφαρμόζονται συχνά στους χώρους παραγωγής των εργοστασίων επειδή αυξάνουν την απόδοση των διαδικασιών παραγωγής. Λόγω των υψηλών απαιτήσεων των πελατών, οι αυξανόμενες ποσότητες παραγωγής και ο έντονος ανταγωνισμός προκαλούν σοβαρές διακυμάνσεις στα περιβάλλοντα παραγωγής. Αυτό έχει άμεση επίδραση και στις γραμμές συναρμολόγησης. Τα προβλήματα εξισορρόπησης που προκαλούνται από πολλές αιτίες στις γραμμές συναρμολόγησης αποτελούν έναν μεγάλο «πονοκέφαλο» των εταιρειών καθώς επηρεάζουν άμεσα την αποδοτικότητα τους και άρα και τα κέρδη τους.

Ανάμεσα στα πιο στοιχειώδη προβλήματα εξισορρόπησης (βλ. βελτιστοποίησης) των γραμμών παραγωγής - Assembly Line Balancing Problems ή ALBP – είναι εκείνο που αφορά στον καταμερισμό των εργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή οποιουδήποτε τμήματος του τελικού προϊόντος, το οποίο πρόκειται να συναρμολογηθεί στους διάφορους σταθμούς (Boysen, N.,Schuzle, P., Scholl, A. , 2022)

Ένα από τα ζητούμενα σε μια ALBP διαδικασία αποτελεί η απόκτηση των δεδομένων που απαιτούνται για την εξεύρεση της πιο κατάλληλης και αποδοτικής λύσης του προβλήματος. Συχνά θεωρείται ότι οι απαιτούμενες εργασίες δεν μπορούν να διαχωριστούν, δηλαδή κάθε μία πρέπει να εκτελεστεί σε έναν μόνο σταθμό. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει πάντα στην πράξη, όπου ο διαχωρισμός εργασιών μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε βελτιωμένη εξισορρόπηση γραμμής (Grzechca W., Foulds L.R., 2015).

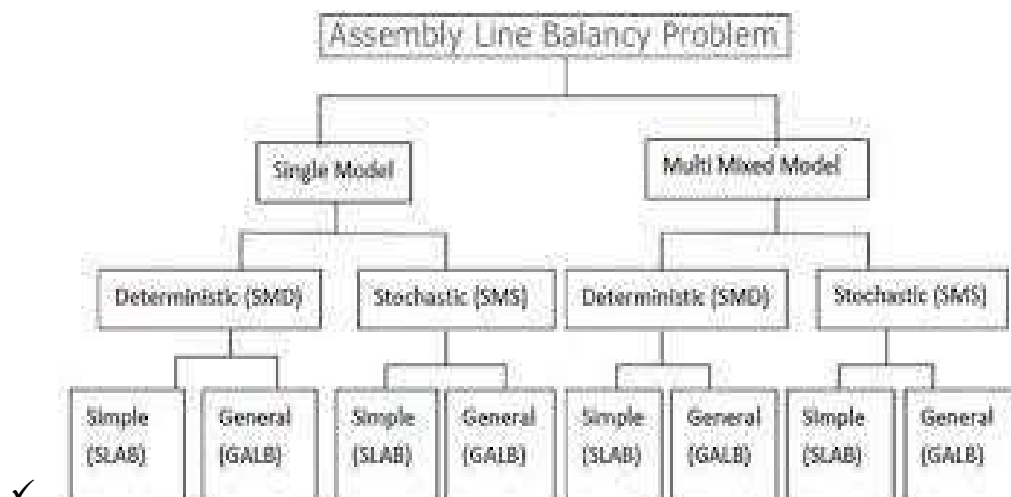
Τα πλέον συνηθισμένα ALBP αναφέρονται στην μεγιστοποίηση της χωρητικότητας της γραμμής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της αποτελεσματικότητας της. Στην περίπτωση των ντετερμινιστικών γραμμών παραγωγής ενός μοντέλου, η αποτελεσματικότητα της γραμμής εξαρτάται μόνο από τον χρονικό κύκλο και τον αριθμό των σταθμών. Οπότε στις περιπτώσεις αυτές είτε ελαχιστοποιείται ο αριθμός

των σταθμών για έναν συγκεκριμένο χρονικό κύκλο, είτε μειώνεται ο χρονικός κύκλος για έναν συγκεκριμένο αριθμό σταθμών. Φυσικά υπάρχουν και οι περιπτώσεις εκείνες στις οποίες η αύξηση της παραγωγικότητας επιτυγχάνεται μέσω της συρρίκνωσης του χρόνου ροής, του χρόνου αναμονής, του χρόνου καθυστέρησης ισορροπίας κλπ (Sholl, 1998)

2.2.1 Ταξινόμηση Προβλημάτων εξισορρόπησης Γραμμής Παραγωγής

Τα ALBPs (εικόνα 3) δύναται να ταξινομηθούν με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Sivasankaran P. & Shahabudeen P., 2014) :

- **Τον αριθμό των μοντέλων που παράγονται στη γραμμή συναρμολόγησης.** Υπάρχει η γραμμή παραγωγής ενός μοντέλου (*Singe model ALB*), η γραμμή παραγωγής μεικτών μοντέλων (*Mixed -Model ALB*) και η γραμμή παραγωγής πολλαπλών μοντέλων (*Multi Mixed Model ALB*).
- ✓ **Το είδος του χρόνου της κάθε εργασίας.** Υπάρχουν τα *ντετερμινιστικά (Deterministic) μοντέλα* γραμμών συναρμολόγησης όπου κάθε εργασία έχει αφενός προγραμματισμένη διάρκεια και αφετέρου μία προκάτοχο και μία διάδοχο εργασία. Σε αντίθεση με αυτά, υπάρχουν και τα *πιθανολογικά (Stochastic) μοντέλα* στα οποία ο χρονικός κύκλος δεν είναι σταθερός και συχνά υπάρχει υπέρβαση του σε τουλάχιστον έναν σταθμό εργασίας.
- ✓ **Την διάταξη της γραμμής συναρμολόγησης.** Η γραμμή μπορεί να είναι ευθεία, κυκλική, τύπου- U κλπ.
- ✓ **Τον τύπο του ALB προβλήματος.** Ο απλούστερος τύπος προβλήματος ALB είναι γνωστός ως *Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP)* όπου ένα ομοιογενές προϊόν συναρμολογείται σε ευθεία γραμμή. Υπάρχουν όμως και προβλήματα πολύ πιο περίπλοκα από το SALBP και αυτά αναφέρονται ως *General Assembly Line Balancing Problem (GALBP)*



✓ **Εικόνα 3:** Ταξινόμηση Προβλημάτων εξισορρόπησης Γραμμής Παραγωγής (πηγή : <http://www.industrialnews.in/articles/3178-assembly-line-balancing-problem-solution-techniques.html>)

2.3 ΣΤΑΘΜΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πρόκειται για την θέση στην οποία πραγματοποιούνται μια ή περισσότερες ομοειδείς εργασίες. Οι απαιτούμενες εργασίες που εκτελούνται στους σταθμούς έχουν σειριακή διάταξη (δηλ. η μια ακολουθεί την άλλη), δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την γραμμή παραγωγής. Για την ομαδοποίηση των πραγματοποιούμενων εργασιών λαμβάνονται υπόψη οι τυχόν τεχνολογικοί περιορισμοί. Ο σταθμοί εργασίας στελεχώνονται με έναν ή περισσότερους εργαζομένους αλλά υπάρχει και το ενδεχόμενο ένας εργαζόμενος να είναι υπεύθυνος για περισσότερους του ενός σταθμών εργασίας (Κώστογλου, 2015).

Οι σταθμοί εργασίας δύναται να είναι είτε χειροκίνητοι είτε αυτοματοποιημένοι ανάλογα με τον εξοπλισμό και το είδος της εργασίας που επιτελείται σε αυτούς. Παραδοσιακά οι χειριστές εκτελούν χειρωνακτική εργασία χρησιμοποιώντας απλά εργαλεία ή ημιαυτόματες μηχανές, ενώ οι πλήρως αυτοματοποιημένοι σταθμοί βρίσκουν εφαρμογή σε συγκεκριμένους τομείς της γραμμής παραγωγής (Sholl, 1998).

2.4 ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ (CYCLE TIME, CT)

Ο χρονικός κύκλος είναι ένα από τα σημαντικότερα δεδομένα για την εξισορρόπηση οποιασδήποτε γραμμής παραγωγής. Πρόκειται για τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγής ενός προϊόντος ή τον συνολικό χρόνο που χρειάζεται πριν

το προϊόν φύγει από το σταθμό εργασίας και μεταβεί στον επόμενο σταθμό εργασίας. Είναι δε σε άμεση συνάρτηση με τον *ρυθμό παραγωγής* του προϊόντος (Κώστογλου, 2015). Καθώς οι διάφορες εργασίες είναι αδιαίρετα στοιχεία του συνόλου, ο χρονικός κύκλος δεν μπορεί να είναι μικρότερος του μέγιστου χρόνου λειτουργίας της γραμμής παραγωγής. Η διαφορά μεταξύ του χρονικού κύκλου και του χρονοπρογραμματισμού του σταθμού λέγεται *περίοδος αδράνειας*. Το άθροισμα όλων των περιόδων αδράνειας μια γραμμής παραγωγής καλείται *χρόνος καθυστέρησης ισορροπίας* (Sholl, 1998).

Όλοι οι σταθμοί εργασίας έχουν τον ίδιο χρονικό κύκλο, ισχύει δε ο παρακάτω τύπος (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014) :

$$CT = (\text{Αποτελεσματικός χρόνος} / \text{βάρδια}) / (\text{Όγκος παραγωγής} / \text{βάρδια})$$

2.5 ΧΡΟΝΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε κάθε γραμμή συναρμολόγησης, υπάρχει καθορισμός των προτεραιοτήτων μεταξύ των εργασιών που απαιτούνται για την συναρμολόγηση του προϊόντος. Η εκτέλεση κάθε εργασίας (task) απαιτεί συγκεκριμένο χρόνο, ο οποίος είναι γνωστός ως *χρόνος εργασίας (Task Time)* (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014). Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση όλων των εργασιών σε έναν μεμονωμένο σταθμό εργασίας είναι γνωστός ως *χρόνος διαδικασίας (Process Time)* (Ghutukade Santosh, 2013)

2.6 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ - ΝΕΚΡΟΣ ΧΡΟΝΟΣ (d)

Η εξισορρόπηση ή αλλιώς η βέλτιστη αξιοποίηση των διαφόρων σταθμών εργασίας μέσα από την ισότιμη χρήση τους, αποτελεί έναν από τους κυρίαρχους στόχους σε μια γραμμή παραγωγής. Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφικτό. Έτσι κάποιοι σταθμοί εργασίας υπολειτουργούν σε σχέση με τους υπόλοιπους «κατά ένα ποσοστό του συνολικού χρόνου παραγωγής», που ονομάζεται *νεκρός χρόνος d*.

Όταν λέμε ότι ένας σταθμός εργασίας υπολειτουργεί εννοούμε ότι ο σταθμός έχει τελειώσει την εργασία του νωρίτερα από τον σταθμό που έπεται και έτσι βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής ή αδράνειας, χωρίς να εκτελεί κάποια εργασία έως ότου τελειώσει ο σταθμός εργασίας που τον ακολουθεί (Becker & Sholl, 2006).

«Η καθυστέρηση εξισορρόπησης μιας γραμμής παραγωγής, είναι ο συνολικός νεκρός χρόνος εξαιτίας της ατελούς διαίρεσης του συνολικού περιεχομένου εργασίας ανάμεσα στους σταθμούς. Μια γραμμή παραγωγής λέγεται ότι είναι 100% εξισορροπημένη αν όλοι οι σταθμοί έχουν το ίδιο χρονικό περιεχόμενο εργασίας με αποτέλεσμα το $d=0$ » (Κώστογλου, 2015).

2.7 ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ (Δ.Ο.)

Δείκτης ομαλότητας (ΔΟ) είναι «η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών του περιεχομένου εργασίας κάθε σταθμού από το περιεχόμενο του μεγαλύτερου σε διάρκεια σταθμού, δηλαδή του χρονικού κύκλου» (Κώστογλου, 2015)

$$\Delta.O. = \sqrt{\frac{A}{\sum_{i=1}^n (T - S_i)^2}}$$

Πρόκειται για τη σημαντικότερη παράμετρο αξιολόγησης του βαθμού εξισορρόπησης μια γραμμής παραγωγής, καθώς όσο μεγαλώνει η τιμή του Δ.Ο. τόσο αυξάνεται η απαίτηση για εξισορρόπηση ενώ όσο μικραίνει η τιμή του τόσο φθίνουν οι νεκροί χρόνοι και άρα τόσο πιο εξισορροπημένη είναι η γραμμή.

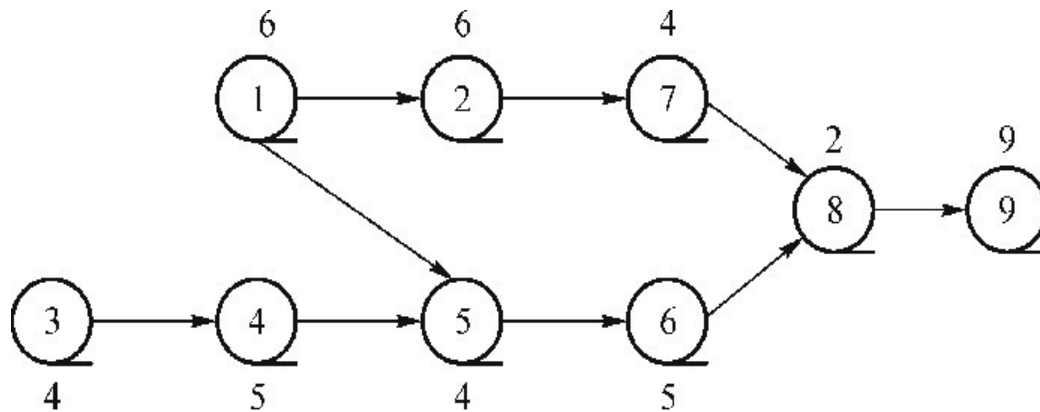
2.8 ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (P)

Ορίζεται ως ο αριθμός των ολοκληρωμένων προϊόντων που παράγονται από μια γραμμή παραγωγής στην μονάδα του χρόνου και προσδιορίζει την ταχύτητα της γραμμής. Ισχύει δε η σχέση : $T=(1/P)$ (όπου $T=$ ο χρονικός κύκλος) (Κώστογλου, 2015)

2.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΔΟΧΗΣ

Λόγω συγκεκριμένων τεχνικών περιορισμών η σειρά των διαδικασιών σε μια γραμμή παραγωγής μπορεί να είναι προκαθορισμένη, ακολουθώντας την ροή ενός διαγράμματος διαδοχής ή γραφήματος προτεραιότητας (εικόνα 4) το οποίο περιέχει κόμβους για όλες τις εργασίες, βάρη κόμβων για τον χρόνο κάθε εργασίας και βέλη στην περίπτωση που μια εργασία προηγείται μια άλλης (Sholl, 1998). Έτσι στο παράδειγμα της εικόνας 4, το γράφημα προτεραιότητας έχει $n = 9$ εργασίες, με

χρόνους εργασίας μεταξύ 1 και 10. Οι υπάρχοντες περιορισμοί προτεραιότητας π.χ. για την εργασία 5 δείχνουν ότι απαιτείται η περάτωση των εργασιών 1 και 4 (άμεσοι προκάτοχοι) καθώς και της εργασίας 3 (έμμεσος προκάτοχος). Το αντίστροφο, η εργασία 5 πρέπει να ολοκληρωθεί προτού ξεκινήσουν οι (άμεσοι και έμμεσοι) διάδοχοί της 6, 8 και 9 (Becker & Scholl, 2006).



Εικόνα 4: Precedence graph of tasks in an assembly line (πηγή :

https://www.researchgate.net/figure/Precedence-graph-representation-of-tasks-in-an-assembly-line_fig2_264709866)

Στην ουσία το διάγραμμα διαδοχής είναι η γραφική απεικόνιση των υπαρχόντων τεχνολογικών περιορισμών στην ακολουθία των στοιχείων εργασίας μιας γραμμής συναρμολόγησης- παραγωγής (Κώστογλου, 2015).

2.10 BALANCING EFFICIENCY (ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ)

Πρόκειται για έναν δείκτη ομαλότητας της γραμμής συναρμολόγησης . Η ελάχιστη τιμή του δείκτη ομαλότητας είναι 0 και υποδηλώνει τέλεια ισορροπία. Σύμφωνα με τους Sivasankaran & Shahabudeen (2017) αλλά και Boysen, et al. (2008) ισχύει η παρακάτω σχέση:

Αποτελεσματικότητα εξισορρόπησης =

[Άθροισμα χρόνων εργασιών/ (Αριθμός σταθμών εργασίας x Χρονικός Κύκλος)] x100

όπου, χρονικός κύκλος είναι ο λόγος μεταξύ του ενεργού διαθέσιμου χρόνου ανά βάρδια και του όγκου παραγωγής ανά βάρδια.

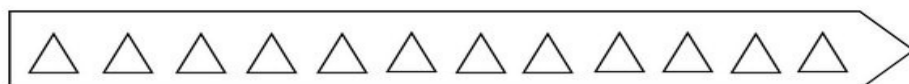
Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι όσο πιο μικρός είναι ο αριθμός των σταθμών εργασίας τόσο μεγαλύτερη είναι η αποτελεσματικότητα της εξισορρόπησης και άρα τόσο μικρότερη η απαίτηση ανθρωπίνων και όχι μόνο πόρων (SivasanKaran & Shahabudeen, 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΕΙΔΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Από την αρχική γραμμή συναρμολόγησης του Henry Ford, τα συστήματα παραγωγής έχουν εξελιχθεί σημαντικά αλλάζοντας τις γραμμές συναρμολόγησης από τις ευθείες, αυστηρά ρυθμισμένες γραμμές του ενός μοντέλου, σε πιο ευέλικτες διατάξεις όπως είναι οι παράλληλοι σταθμοί εργασίας, τα πελατο-κεντρικά -μεικτά μοντέλα, τα πολλαπλά μοντέλα, οι γραμμές σε U-σχήμα και οι χωρίς ρυθμό γραμμές με ενδιάμεσους ρυθμιστές (Ghutukade Santosh, 2013).

Σύμφωνα με τους Becker & Scholl (2006) υπάρχουν τα παρακάτω είδη γραμμών παραγωγής (βλ. Εικόνα 5 όπου οι διαφορετικοί τύποι μοντέλων συμβολίζονται με διάφορα γεωμετρικά σχήματα):

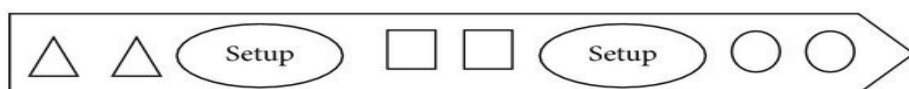
- Οι απλές γραμμές του ενός μοντέλου (Single-model lines)
- Το μεικτό πελατο-κεντρικό μοντέλο (Mixed-model line)
- Οι γραμμές πολλαπλών μοντέλων (Multi-model lines)



Single-model line



Mixed-model line

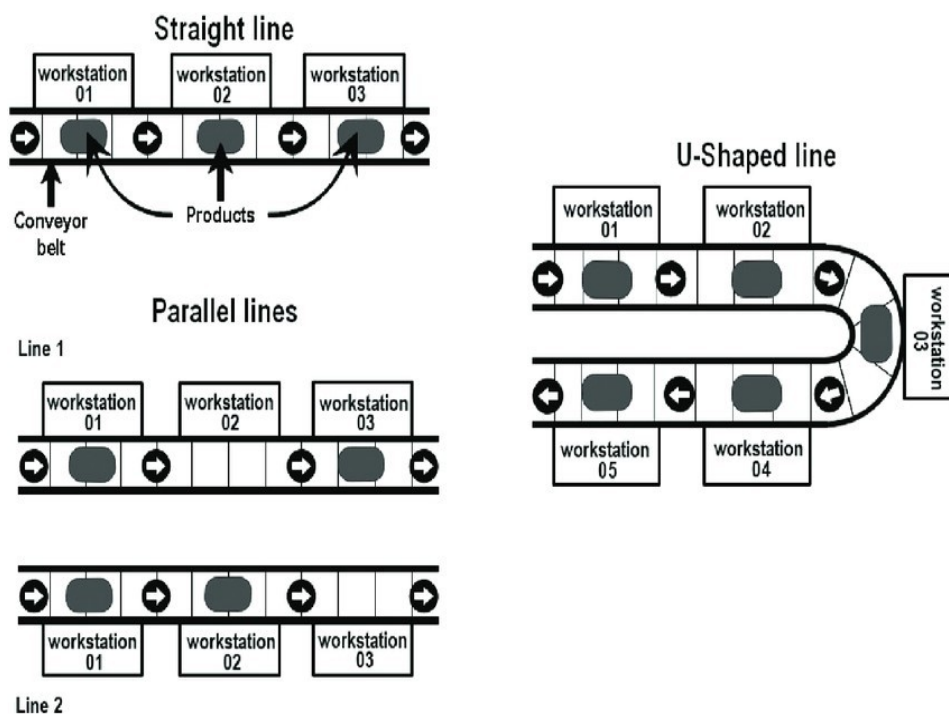


Multimodel line

Εικόνα 5: Single-model line, mixed-model line, and multi-model line. (πηγή : https://www.researchgate.net/figure/Single-model-line-mixed-model-line-and-multimodel-line_fig2_282538544)

Αλλά και (εικόνα 6):

- Οι γραμμές παράλληλης εργασίας, σταθμών και έργων(Parallel lines)
- Οι γραμμές σε U σχήμα (U-shaped lines)



Εικόνα 6: Different assembly line shapes(πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Different-assembly-line-shapes_fig1_360063425)

Με βάση τον τύπο της ανάμειξης των μονάδων υφίστανται δύο παραλλαγές της γραμμής παραγωγής :

- ✓ Η **γραμμή μεικτού μοντέλου** στη οποία παράγονται τμήματα διαφορετικών μοντέλων σε τυχαία ακολουθία (Bukchin J., Dar-El E., Rubinovitz J., 2002)
- ✓ Η **γραμμή πολλαπλών μοντέλων** στην οποία παράγεται μια ακολουθία παρτίδων ενός μοντέλου ή μιας ομάδας μοντέλων, με ενδιάμεσες λειτουργίες εγκατάστασης

Έτσι η εξισορρόπηση του κάθε μοντέλου γραμμής παραγωγής απαιτεί την επίλυση πολλών προβλημάτων ALBP.

Με βάση το είδος ροής στην γραμμή παραγωγής υπάρχουν οι εξής μορφές- τύποι διάταξης (Κώστογλου, 2015):

- i. «Διάταξη κατά προϊόν ή γραμμή παραγωγής» (product layout): σε αυτή την περίπτωση γίνεται ομαδοποίηση τόσο του εργατικού δυναμικού όσο και του εξοπλισμού ανάλογα με την αναγκαία σειρά εκτέλεσης των εργασιών που απαιτούνται για την παραγωγή μεγάλων όγκων όμοιων προϊόντων. Η διάταξη αυτή βρίσκει εφαρμογή στις αυτοκινητοβιομηχανίες, στις χημικές βιομηχανίες κλπ.
- ii. «Λειτουργική διάταξη» (process layout) : σε αυτή την περίπτωση οι εργαζόμενοι και τα μηχανήματα ομαδοποιούνται με βάση το είδος της εργασίας που εκτελούν π.χ. συγκόλληση, βαφή σε ένα μηχανουργείο κλπ.
- iii. «Διάταξη σταθερής θέσης ή ακίνητου προϊόντος» (fixed position layout) : σε αυτή την περίπτωση το προϊόν που πρόκειται να επεξεργαστεί μένει στην θέση του εξαιτίας του όγκου του και όλες οι εργασίες πραγματοποιούνται σε ορισμένο χώρο ή πάνω στο ίδιο το προϊόν. Τέτοιου τύπου διάταξη υφίσταται στα ναυπηγεία, στην αεροπορική βιομηχανία κλπ.
- iv. «Κυτταρική διάταξη» (cellular layout) : πρόκειται για ένα συνδυασμό της διάταξης ανά προϊόν με την λειτουργική διάταξη, όπου διαφορετικές μηχανές ομαδοποιούνται στους σταθμούς εργασίας που ονομάζονται κύτταρα, με στόχο την παραγωγή προϊόντων παρόμοιας μορφολογίας και απαιτήσεων επεξεργασίας.

3.1 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα διαφορετικά προϊόντα τα οποία συναρμολογούνται πάνω στην ίδια γραμμή συμβάλλουν στην δημιουργία προβλημάτων Εξισορρόπησης Γραμμής Συναρμολόγησης.

Σύμφωνα με το Sholl (1998) :

- στις **single-model lines** γίνεται μαζική παραγωγή ενός προϊόντος σε μεγάλη κλίμακα. Όλοι οι σταθμοί εκτελούν το ίδιο έργο και έχουν τον ίδιο φόρτο εργασίας
- στις **mixed-model lines** γίνεται παραγωγή διαφόρων μοντέλων- εκδοχών ενός βασικού προϊόντος. Η παραγωγική διαδικασία των μοντέλων είναι παρόμοια καθώς

αυτά διαφέρουν από το βασικό προϊόν μόνο ως προς ορισμένα προαιρετικά ή μη χαρακτηριστικά. Με αυτό τον τρόπο κάθε μοντέλο παράγεται μέσα από παρόμοιες διαδικασίες, οι οποίες ενδέχεται να έχουν διαφορετικό χρόνο εκτέλεσης ενώ κάποιες από αυτές μπορεί και να απουσιάζουν ανάλογα με το αν το τελικό προϊόν θα διαθέτει το προαιρετικό χαρακτηριστικό ή όχι. Προκειμένου δε να ικανοποιηθούν οι σύγχρονες απαιτήσεις, τα μοντέλα παράγονται ταυτόχρονα σε μια αναμεμειγμένη σειρά. Στη περίπτωση αυτή τα προβλήματα εξισορρόπησης σχετίζονται με τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για την αποτελεσματική ακολουθία των μοντέλων.

- ο Στις **multi-model lines** παρόμοια προϊόντα παράγονται σε μια ή περισσότερες γραμμές παραγωγής. Εξαιτίας δε σημαντικών διαφορών στην διαδικασία παραγωγής, συχνά απαιτούνται ανακατατάξεις του εξοπλισμού και τα προϊόντα συναρμολογούνται σε διαφορετικές παρτίδες προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το στήσιμο.

Στην εξισορρόπηση γραμμής παραγωγής ενός μοντέλου, ένα και μόνο μοντέλο θα παραχθεί στη γραμμή συναρμολόγησης, ενώ στην εξισορρόπηση γραμμής συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, περισσότερα του ενός μοντέλα θα παραχθούν στην ίδια γραμμή συναρμολόγησης (Sivasankaran P. & Shahabudeen P., 2017).

3.1.1 Γραμμές παραγωγής μονού μοντέλου (Single-Model Assembly Line, SMAL)

Στην αρχική τους μορφή, οι γραμμές παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν για την μαζική παραγωγή ενός μόνο προϊόντος. Στην σημερινή εποχή τέτοιου είδους προϊόντα δεν είναι πια ελκυστικά καθώς η διαφοροποίηση είναι ένα βασικό ζητούμενο των καταναλωτών, οπότε και τα αντίστοιχα συστήματα συναρμολόγησης δεν είναι προσοδοφόρα. Έτσι στις μέρες μας, υπάρχουν πλήρως αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής οι οποίες επιτρέπουν την κατακόρυφη μείωση του χρόνου και του κόστους αλλά και την συναρμολόγηση πάνω στην ίδια γραμμή περισσότερων του ενός προϊόντων, οι οποίες όμως συνεχίζουν να θεωρούνται SMAL.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε συγκεκριμένους ορισμούς που αφορούν σε προβλήματα εξισορρόπησης γραμμών παραγωγής μονού μοντέλου (Sholl, 1998):

- Στο SMAL μοντέλο ισχύει το μη κυκλικό γράφημα προτεραιότητας με τύπο $G = (V, A, t)$, όπου V είναι ο αριθμός των κόμβων που παίρνει τιμές μεταξύ $\{1, \dots, n\}$ με $n =$ ο αριθμός των εργασιών, ενώ A ο αριθμός των τόξων με τιμές $\{i, j\}$, όπου το i είναι σε άμεση συνάρτηση με το V και το j που αναφέρεται στον αριθμό των εργασιών να παίρνει τιμές μεταξύ $\{1, \dots, n\}$. Τέλος $t =$ ο χρόνος της κάθε εργασίας.
Οι κόμβοι συμβολίζουν τις εργασίες και τα τόξα τις σχέσεις προτεραιότητας μεταξύ τους. Μια σχέση προτεραιότητας μεταξύ δυο εργασιών i και j είναι άμεση εάν καμιά από τις εργασίες i δεν είναι προκάτοχος του j . Ένας κόμβος που αντιστοιχεί σε μια εργασία χωρίς διαδόχους ονομάζεται *βύθισμα του G* ενώ ένα γράφημα αντίστροφης προτεραιότητας προκύπτει αντιστρέφοντας τον προσανατολισμό όλων των τόξων του G .
- Ο διαχωρισμός των $V = \{1, \dots, n\}$ εργασιών σε m υποσύνολα καλείται *ανάθεση έργων*. Κάθε έργο ανατίθεται σε έναν σταθμό και οι διάδοχοι μιας εργασίας i δεν πρέπει να ανατεθούν σε προγενέστερο σταθμό από το i . Η ανάθεση εργασιών για έναν χρονικό κύκλο c , είναι εφικτή εάν οι συνολικοί χρόνοι σταθμού είναι μικρότεροι ή ίσοι με το c . Μια εφικτή ανάθεση εργασίας ονομάζεται *ισορροπία γραμμής* και απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη της αποτελεί η σχέση: $c \geq t_{\max}$
- Ορίζουμε ως T τον συνολικό διαθέσιμο χρόνο συναρμολόγησης κάθε τεμαχίου στη γραμμή παραγωγής. Ισχύει ότι $T = m * c$, όπου m ο αριθμός των σταθμών και c ο χρονικός κύκλος. Ο T αντιπροσωπεύει την δυνατότητα της γραμμής να παράγει αποτελέσματα σε συγκεκριμένο χρόνο (*capacity time*). Ασφαλώς ισχύει ότι ο T πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος με το άθροισμα t_{sum} όλων των χρονών εργασίας (*task time*).
- Η αξιοποίηση της χωρητικότητας της γραμμής μετριέται με την αποτελεσματικότητα της γραμμής $E = t_{\text{sum}} / T$, ενώ η μη αξιοποιούμενη χωρητικότητα αντικατοπτρίζεται στον χρόνο καθυστέρησης εξισορρόπησης $BD = T - t_{\text{sum}}$ καθώς και στον ρυθμό καθυστέρησης $BR = 1 - E$.
- Ο Δείκτης ομαλότητας SX μετρά την ισότητα της κατανομής των εργασιών μεταξύ των σταθμών εργασίας.

3.1.2 Γραμμές παραγωγής μεικτού μοντέλου (Mixed- model Assembly Lines)

Προκειμένου μια εταιρεία να ανταποκριθεί επαρκώς στις απαιτήσεις των πελατών της και να κατασκευάζει περισσότερα από ένα μοντέλα, οφείλει να εφαρμόζει την εξισορρόπηση γραμμής συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου, προκειμένου να καλύψει την ταυτόχρονη ζήτηση των διαφορετικών μοντέλων. Η προσέγγιση αυτή όπως δύναται να οδηγήσει στην απώλεια της εξισορρόπησης της αποτελεσματικότητας (Sivasankaran & Shahabudeen, 2017). Όμως ο διαρκώς αυξανόμενος ανταγωνισμός παγκοσμίως, απαιτεί από τις εταιρείες να χρησιμοποιούν τη εξισορρόπηση γραμμής παραγωγής μεικτών μοντέλων προκειμένου να καλύψουν τη ζήτηση διαφορετικών μοντέλων σε καθημερινή βάση.

Οι γραμμές συναρμολόγησης μεικτών μοντέλων παράγουν διαφορετικές εκδόσεις ενός αρχικού εμπορεύματος σε αναμεμειγμένη σειρά. Οι νέες εκδόσεις δύναται να διαφοροποιούνται από το αρχικό μοντέλο ως προς το μέγεθος, την πρώτη ύλη, το χρώμα ή τον εξοπλισμό, έτσι ώστε η συναρμολόγηση τους να απαιτεί διαφορετικού τύπου εργασίες, διαφορετικούς χρόνους ή/και διαφορετικές σχέσεις προτεραιότητας των εργασιών (Becker & Scholl, 2006). Έτσι σε αντίθεση με την γραμμή παραγωγής μονού μοντέλου η οποία είναι ντετερμινιστική, εδώ ως χρονικός κύκλος ορίζεται ο μέσος χρόνος ανάλογα με τον ρυθμό παραγωγής και όχι ο μέγιστος διαθέσιμος χρόνος ανά σταθμό και ανά τεμάχιο παραγόμενης εργασίας.

Έρευνες έχουν δείξει την ύπαρξη αλληλεξάρτησης μεταξύ των διαφόρων προβλημάτων ισορροπίας και αλληλουχίας στις γραμμές παραγωγής. Έτσι η ισορροπία βασίζεται στην ανάθεση συγκεκριμένων εργασιών ανά σταθμό με βάση το παραγόμενο μοντέλο, ενώ η αλληλουχία στην παραγωγή των διαφόρων μοντέλων επηρεάζεται από τις κατ' ελάχιστον υπερφορτώσεις. Σύμφωνα με ερευνητές (Rekiek, B., Delchambre, A, 2006) τόσο η εξισορρόπηση όσο και η αλληλουχία των γραμμών παραγωγής θα πρέπει να αξιολογούνται ταυτόχρονα καθώς το ποσό της υπερφόρτωσης της γραμμής αποτελεί μέτρο της αποτελεσματικής της εξισορρόπησης. Όμως μια τέτοιου είδους ταυτόχρονη αξιολόγηση μπορεί να επιτευχθεί μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες καθώς τα δυο αυτά προβλήματα στον σχεδιασμό των γραμμών παραγωγής (δηλ η ισορροπία και η αλληλουχία) έχουν τελείως διαφορετική χρονική εξέλιξη. Έτσι συχνά και στα πλαίσια της ιεράρχησης κατά τον σχεδιασμό, απαιτείται η λήψη

απόφασης σχετικά με την αλληλουχία όταν έχει ήδη επιτευχθεί η μέγιστη εξισορρόπηση της γραμμής (Scholl, 1999).

3.1.3 Γραμμές παραγωγής πολλαπλών μοντέλων (Multi-model Assembly Lines)

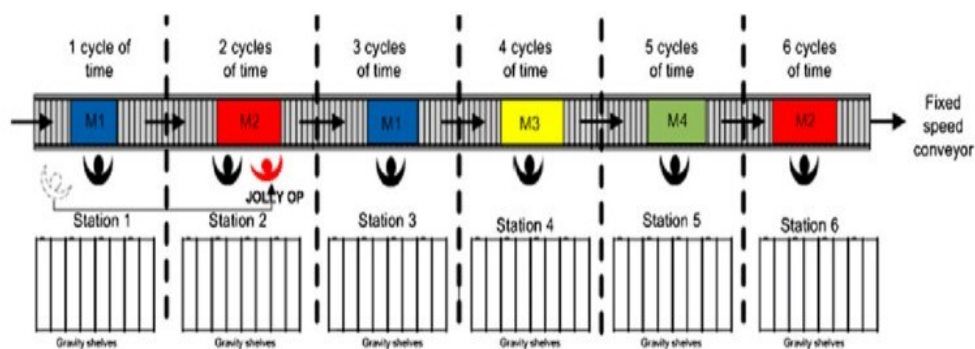
Το πρόβλημα της εξισορρόπησης μιας γραμμής συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου παρουσιάζεται στο στάδιο του σχεδιασμού μιας νέας γραμμής παραγωγής στην οποία διαφορετικά μοντέλα του ίδιου προϊόντος συναρμολογούνται σε μια αναμεμειγμένη σειρά και στοχεύει στη βελτιστοποίηση του αριθμού των σταθμών εργασίας για ένα σταθερό γνωστό χρόνο κύκλου.

Στην περίπτωση της γραμμής παραγωγής πολλαπλών μοντέλων, λόγω της ποικιλομορφίας των προϊόντων που παράγονται αλλά και λόγω της ετερογένειας των διαδικασιών συναρμολόγησης, δεν επιτρέπονται προαιρετικές αλληλουχίες συναρμολόγησης. Έτσι η συναρμολόγηση οργανώνεται σε παρτίδες (batches)- δηλ. μέρη του συνόλου- με στόχο την μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής. Αυτό με την σειρά του δημιουργεί πρόβλημα αναφορικά με το μέγεθος της κάθε παρτίδας, οπότε και απαιτείται η ομαδοποίηση των μοντέλων ανά batch και η λήψη απόφασης σχετικά με την σειρά συναρμολόγησης τους. Όταν το μέγεθος της παρτίδας είναι μεγάλο, η εξισορρόπηση της γραμμής παραγωγής δύναται να γίνει ξεχωριστά ανά μοντέλο καθώς η ρύθμιση των χρόνων μεταξύ των παρτίδων δεν είναι σημαντική. Παρόλα αυτά όμως και στην γραμμή συναρμολόγησης πολλαπλών μοντέλων είναι αναγκαίο να υφίσταται ορισμένου βαθμού ομοιομορφία μεταξύ των διαδικασιών παραγωγής (Boysen, et al., 2008).

Ενώ τα κόστη εγκατάστασης μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους των παρτίδων, τα κόστη αποθεμάτων αυξάνονται. Αυτό οδηγεί στο πρόβλημα του υπολογισμού ενός οικονομικού μεγέθους παρτίδας και κύκλου παραγωγής όλων των προϊόντων (Domschke W., Krispin G., 1997).

Αρκετές εταιρείες, στην προσπάθειά τους αφενός να αυξήσουν την ευελιξία τους και αφετέρου να μειώσουν τα κόστη, προχωρούν στην υιοθεσία μεικτών μοντέλων γραμμών παραγωγής οι οποίες παράγουν προϊόντα τα οποία είναι παραλλαγές του ίδιου βασικού μοντέλου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αυτό όμως οδηγεί σε διακυμάνσεις στους χρόνους εργασίας.

Στην περίπτωση γραμμών συναρμολόγησης χωρίς ρυθμό (*unpaced assembly lines*), αυτές οι παραλλαγές εξομαλύνονται από buffer (αποθηκευτικούς χώρους) γεγονός όμως που επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στο κόστος, στην χρήση του χώρου και στην παραγωγικότητα. Για να αντιμετωπίσουν τέτοιες αδυναμίες, ορισμένες εταιρείες υιοθετούν γραμμές συναρμολόγησης με ρυθμό χωρίς προσωρινή αποθήκευση (*paced assembly lines*) όπου ο κυκλικός χρόνος ελέγχεται από την συγχρονισμένη μετακίνηση των προϊόντων από το αρχικό στον τελικό σταθμό συναρμολόγησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η δυνατότητα παραγωγής διαφορετικών μοντέλων τα οποία έχουν διαφορετικούς χρόνους συναρμολόγησης πραγματοποιείται με την χρήση συμπληρωματικού ευέλικτου εργατικού δυναμικού (Faccioa M., Gamberi M.,Bortolini M., 2016).



Εικόνα 7: Paced Assembly Line

(πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-paced-mixed-model-synchronous-assembly-line-with-a-jolly-operator_fig1_281336326)

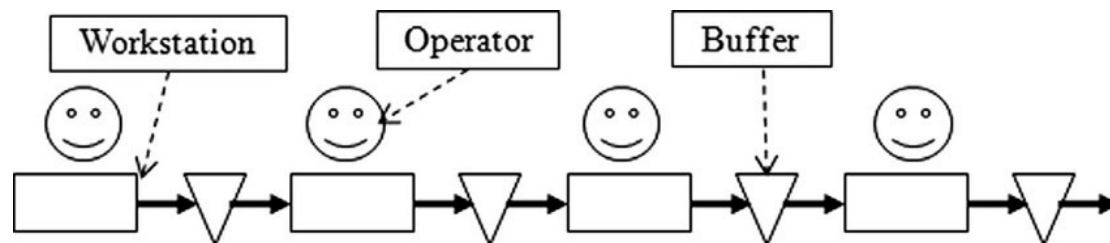
Σε μια γραμμή παραγωγής πολλαπλών μοντέλων, η εγκατάσταση παράλληλων γραμμών όπου η καθεμία είναι σχεδιασμένη για ένα προϊόν ή για οικογένεια σχετικών προϊόντων, συχνά επιφέρει καλύτερες ισορροπίες και αυξημένη παραγωγικότητα. Εδώ το ALBP σχετίζεται με προβλήματα απόφασης σχετικά με τον αριθμό των γραμμών που θα τελικά εγκατασταθούν και την ανάθεση προϊόντων και προσωπικού στις γραμμές. Ακόμα και στην περίπτωση της μονής γραμμής παραγωγής είναι δυνατόν να υπάρξει παράλληλη εγκατάσταση των σταθμών με την κατανομή των τεμαχίων εργασίας μεταξύ πολλών χειριστών οι οποίοι εκτελούν πανομοιότυπες εργασίες. Με αυτό το τρόπο εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα της παράλληλης διάταξης. Οι παράλληλοι σταθμοί επιτρέπουν τη μείωση του χρονικού κύκλου του συστήματος εφόσον ορισμένες εργασίες έχουν χρόνους μεγαλύτερους από τον επιθυμητό χρονικό

κύκλο. Για την παραγωγή βαρειών τεμαχίων δύναται να λειτουργήσει μια γραμμή δύο όψεων, η οποία αποτελείται από δύο παράλληλα συνδεδεμένες γραμμές. Εδώ αντί για μεμονωμένους σταθμούς, λειτουργούν ταυτόχρονα ζεύγη σταθμών εκατέρωθεν της γραμμής παραγωγής (Becker & Scholl, 2006).

3.2 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΞΗ

3.2.1. Σειριακές γραμμές συναρμολόγησης (Serial Assembly Lines)

Παραδοσιακά οι σταθμοί εργασίας τοποθετούνταν διαδοχικά και σε ευθεία γραμμή (εικόνα 8) έτσι ώστε τα συναρμολογούμενα μέρη να μετακινούνται, μέσω ενός μηχανισμού όπως είναι ο μεταφορικός μίαντας, κατά μήκος της διατεταγμένης ακολουθίας τους (Boysen, et al. 2007).



Εικόνα 8: Σειριακή γραμμή συναρμολόγησης με 4 σταθμούς εργασίας

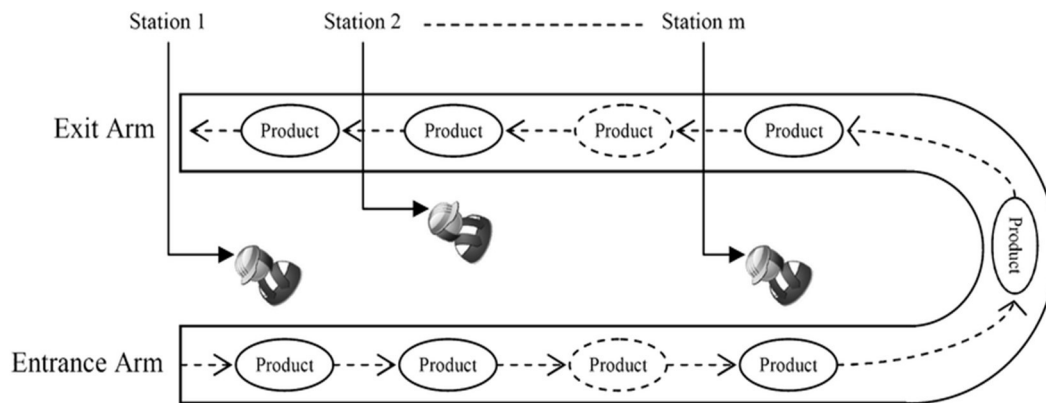
(πηγή: <https://www.researchgate.net/figure/A-serial-assembly-line-with-four-workstations>)

Τέτοιες σειριακές γραμμές είναι μάλλον είναι μη ευέλικτες και έχουν άλλα μειονεκτήματα που θα μπορούσαν να ξεπεραστούν από μια γραμμή συναρμολόγησης σχήματος- U (Becker & Scholl, 2006).

3.2.2 Γραμμές συναρμολόγησης σχήματος U (U-shaped Assembly Lines)

Στην περίπτωση που η γραμμή συναρμολόγησης έχει διάταξη σχήματος U οι εργασίες εκτελούνται κατά μήκος μιας καμπύλης (εικόνα 9). Πρόκειται για μια τυπική διάταξη των σύγχρονων γραμμών παραγωγής οι οποίες είναι έτσι οργανωμένες ώστε τα δυο άκρα της καμπύλης να βρίσκονται κοντά (Scholl, A. and Klein, R. , 1997). Οι σταθμοί μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα σε δύο τμήματα της γραμμής που βρίσκονται αντικριστά (σταθμοί διασταύρωσης). Εκτός από την τροποποίηση αναφορικά με την διεύρυνση των θέσεων εργασίας, μια διάταξη γραμμής παραγωγής σε σχήμα U μπορεί να οδηγήσει σε αρτιότερη ισορροπία των φορτίων του σταθμού λόγω του μεγαλύτερου αριθμού συνδυασμών εργασιών-σταθμών (Becker & Scholl, 2006).

Στην σειριακή γραμμή παραγωγής, οι εργασίες συναρμολόγησης μπορούν να ανατεθούν σε εργαζομένους μόνο από το ένα άκρο της γραμμής ως το άλλο (εμπρός ή πίσω), ενώ εργασίες και από τα δύο άκρα της γραμμής μπορούν να διεκπεραιωθούν από τον ίδιο χειριστή σε μια γραμμή σχήματος U (Masood, 2017).



Εικόνα 9: Γραμμή συναρμολόγησης U

(πηγή: <https://www.researchgate.net/figure/U-shaped-assembly-line-stations-may-have-cross-overs>)

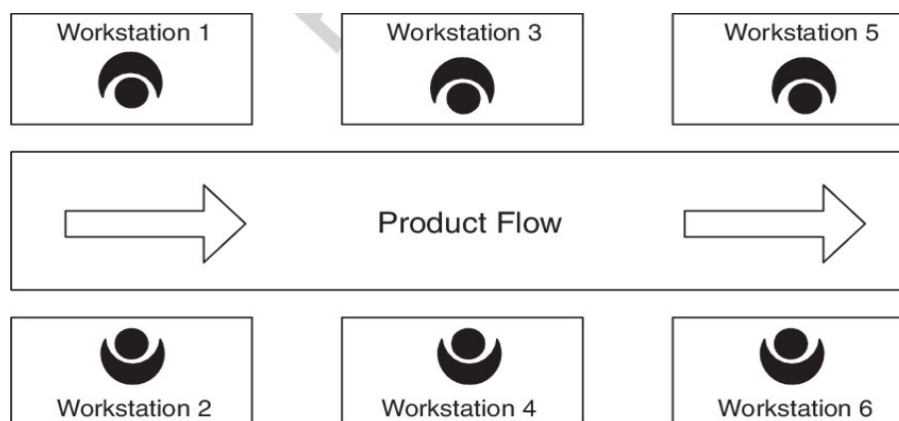
Η φυσική θέση των χειριστών είναι μέσα στην γραμμή U γεγονός που τους επιτρέπει να κινούνται και στα δυο τμήματα της γραμμής ενώ ένας εργαζόμενος επιτηρεί την είσοδο και την έξοδο της (Miltenburg, J. , 2001).

Οι σταθμοί τοποθετούνται έτσι ώστε κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού κύκλου να μπορούν να επεξεργαστούν δύο τεμάχια εργασίας που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις της γραμμής. Έτσι π.χ. στην εικόνα 9, ο σταθμός 1 θα πραγματοποιήσει την αρχική επεξεργασία σε ένα τεμάχιο εργασίας, το οποίο ξεκινά τη διαδικασία παραγωγής του σε αυτόν τον κύκλο, και την τελική επεξεργασία ενός άλλου τεμαχίου εργασίας, που θα ολοκληρωθεί στον ίδιο κύκλο. Έτσι, η διαφορά με τις σειριακές γραμμές συναρμολόγησης είναι ότι ένας σταθμός εργασίας k μπορεί να παράγει όχι μόνο εργασίες οι οποίες έπονται εκείνων που έχουν πραγματοποιηθεί σε έναν από τους σταθμούς $1, \dots, k$, αλλά και εργασίες των οποίων οι προκάτοχοι θα ολοκληρωθούν μέχρι να επιστρέψει το προϊόν στο σταθμό k για το δεύτερο κύκλο. Ένας σταθμός που χειρίζεται το ίδιο τεμάχιο εργασίας σε δύο διαφορετικούς κύκλους καλείται *σταθμός διασταύρωσης* (Masood, 2017).

Η συγκεκριμένη διάταξη της γραμμής παραγωγής εξυπηρετεί την συνεργασία και τη επικοινωνία μεταξύ των χειριστών οπότε και επιδρά θετικά ως προς τα κίνητρα των εργαζομένων, την ευελιξία αναφορικά με τις τροποποιήσεις των όγκων παραγωγής καθώς και την βελτίωση της ποιότητας (Scholl and Klein 1999b).

3.2.3 Γραμμές συναρμολόγησης δύο όψεων (Two Sided Assembly Lines)

Πρόκειται για γραμμές συναρμολόγησης προϊόντων μεγάλου βάρους και όγκου (π.χ. αυτοκινήτων κλπ) οι οποίες αποτελούνται από ζευγάρια απέναντι σταθμών(εικόνα 9) τοποθετημένων κατά μήκος ενός μάντα μεταφοράς (Sholl, 1998). Αυτή η διάταξη επιτρέπει στους χειριστές να λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε σε συνεργασία με τον σταθμό του συνάδελφου τους. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα διαφορετικές εργασίες στο ίδιο τεμάχιο και στις δυο πλευρές του συστήματος μεταφοράς ή στους ζευγαρωμένους σταθμούς μπορεί να εκτελούνται συγχρόνως οι ίδιες εργασίες ώστε να μειωθεί ο χρόνος συναρμολόγησης.



Εικόνα 10: Γραμμή συναρμολόγησης δύο όψεων

(πηγή: <https://www.researchgate.net/figure/Two-sided-assembly-line>)

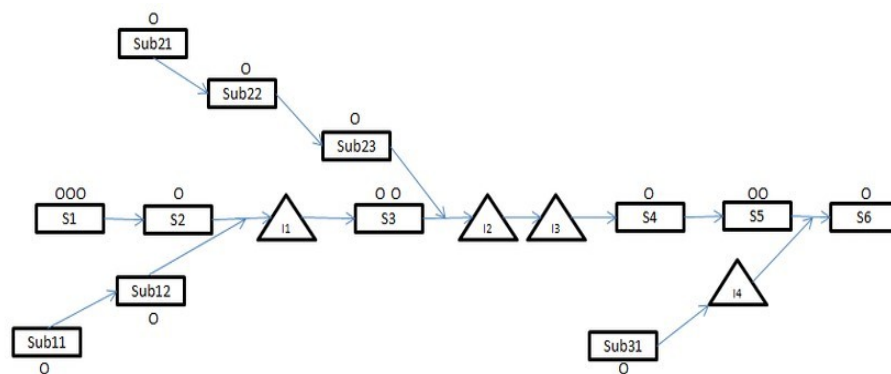
Οι γραμμές συναρμολόγησης δύο όψεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μικρού όγκου προϊόντα καθώς για τον ίδιο αριθμό σταθμών όπως και στην σειριακή διάταξη απαιτούνται μικρότερου μήκους γραμμές(Sholl, 1998).

Εξαιτίας της συνοχής των παραγόμενων εργασιών, ο μέγιστος χρόνος εργασίας t_{max} πρέπει να είναι μικρότερος από τον χρονικό κύκλο c . Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν μία ή περισσότερες εργασίες με χρόνους μεγαλύτερους από τον επιθυμητό χρονικό κύκλο, η τοποθέτηση των σταθμών σε παράλληλη διάταξη θα μπορούσε να

δώσει λύση στο πρόβλημα. Στην περίπτωση αυτή με τον διπλασιασμό των σταθμών, όπου και οι δυο σταθμοί έχουν πανομοιότυπο εφοδιασμό και εκτελούν πανομοιότυπες εργασίες, ο τοπικός χρονικός κύκλος είναι διπλάσιος από τον κανονικό χρονικό κύκλο, οπότε και ο αριθμός των εφικτών φορτίων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά (Becker & Scholl, 2006).

3.2.4 Γραμμές τροφοδοσίας και συμπληρωματικές μονάδες

Με τον όρο γραμμή τροφοδοσίας αναφερόμαστε σε γραμμή συναρμολόγησης στην οποία παράγονται εξαρτήματα για την χρήση στην παραγωγή του τελικού προϊόντος το οποίο συναρμολογείται στην κύρια γραμμή (Εικόνα 11). Μια εγκατάσταση, ειδικά στην περίπτωση παραγωγής συνθέτων προϊόντων, ίσως να έχει περισσότερες από μια γραμμές τροφοδοσίας ώστε να αυξήσει την απόδοση της.



Εικόνα 11: Γραμμή συναρμολόγησης με κύρια γραμμή και γραμμές τροφοδοσίας.

(πηγή: <https://www.researchgate.net/figure/Typical-assembly-line-with-main-line-and-feeder-lines>)

Το μέγεθος και το μήκος της γραμμής τροφοδοσίας μπορεί είναι διαφορετικό και οι χειριστές μπορεί να μετακινούνται μεταξύ των γραμμών ή και να παραμένουν σε μια μόνο γραμμή ανάλογα με τον τρόπο οργάνωσης της επιχείρησης. Η μετακίνηση αυτού του τμήματος της παραγωγής από την κύρια γραμμή της επιτρέπει να κινείται γρηγορότερα και αποτελεσματικότερα. Στην περίπτωση αυτή τα προβλήματα εξισορρόπησης σχετίζονται με προβλήματα συγχρονισμού των διαφορετικών διαδικασιών παραγωγής. Έτσι για παράδειγμα ο ρυθμός παραγωγής της γραμμής τροφοδοσίας πρέπει να είναι ντετερμινιστικός (Sholl, 1998).

3.3 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΡΥΘΜΟ

3.3.1 Γραμμή Συναρμολόγησης Με Ρυθμό (Paced Assembly Line)

Στην περίπτωση της γραμμής συναρμολόγησης με ρυθμό, τα προς επεξεργασία τεμάχια μεταφέρονται ταυτόχρονα μπροστά από τους σταθμούς εργασίας συχνά μέσω ενός μεταφορικού ιμάντα. Ακολουθώς όλοι οι σταθμοί εργασίας ξεκινούν τη λειτουργία τους σε συνδυασμό και ο καθένας επεξεργάζεται το δικό του κομμάτι.

Με το πέρας ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος c , το σύστημα μεταφοράς μεταφέρει τα αντικείμενα στην επόμενη θέση, έτσι ώστε να υποβάλλονται σε διαδοχική επεξεργασία και να μετακινούνται από σταθμό σε σταθμό σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Σε κάθε κύκλο εργασίας, το αντικείμενο που υποβάλλεται σε επεξεργασία στον τελευταίο σταθμό εργασίας αποχωρεί από τη γραμμή, καθώς η συναρμολόγησή του έχει ολοκληρωθεί, ενώ ο πρώτος σταθμός εργασίας τροφοδοτείται με νέο.

Ο χρόνος πραγματοποίησης μιας επεξεργασίας σε ένα τεμάχιο προϊόντος έχει ίδια μέγιστη τιμή σε κάθε σταθμό. Αυτό το ανώτατο όριο καλείται χρονικός κύκλος c , επειδή μια εργασία ξεκινά σε έναν σταθμό και μια άλλη τελειώνει κάθε c μονάδες χρόνου. Λόγω του περιορισμού του χρονικού κύκλου c οι γραμμές με ρυθμό έχουν έναν σταθερό ρυθμό παραγωγής ίσο με την παραγόμενη ποσότητα ανά μονάδα χρόνου. (Sholl, 1998)

Σε μια τέτοια γραμμή συναρμολόγησης, εάν οι απαραίτητες εργασίες δεν ολοκληρωθούν εντός του χρονικού κύκλου λόγω διακυμάνσεων στους χρόνους εργασίας, υπάρχουν δύο επιλογές : ή εργασίες αυτές εκτελούνται εκτός γραμμής και το αντικείμενο εργασίας εισέρχεται ξανά στη γραμμή σε επόμενο στάδιο ή η γραμμή παραγωγής σταματά έως ότου να ολοκληρωθούν όλες οι εργασίες που αφορούν στα ημιτελή τεμάχια της συναρμολόγησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να εγκατασταθούν ενδιάμεσοι σταθμοί (buffers) μεταξύ των κεντρικών σταθμών ώστε να διατηρούν αυτά τα αποθέματα κατά την εξέλιξη της διαδικασίας, οπότε και θα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις αναφορικά με την θέση και την χωρητικότητα τους (Sholl, 1998).

3.3.2 Γραμμή Συναρμολόγησης Χωρίς Ρυθμό (Unpaced Assembly Line)

Στην γραμμή συναρμολόγησης χωρίς ρυθμό, οι σταθμοί εργασίας λειτουργούν αυτόνομα και προωθούν, όχι σε σταθερά χρονικά διαστήματα, τα προς επεξεργασία

τεμάχια από σταθμό σε σταθμό, όποτε και ολοκληρώνονται οι απαραίτητες λειτουργίες, (Boysen et al. 2008).

Δυο είναι τα ενδεχόμενα που μπορεί να παρατηρηθούν στην συγκεκριμένη περίπτωση (Buzacott, J.A. and Shanthikumar, J.G., 1993):

- a. σύγχρονη λειτουργία, όπου τα τεμάχια εργασίας μετακινούνται ταυτόχρονα στους σταθμούς και έτσι ολοκληρώνονται όλες οι απαραίτητες εργασίες κατά μήκος της γραμμής συναρμολόγησης και
- b. ασύγχρονη λειτουργία, στην οποία κάθε σταθμός εργασίας μετακινεί το τεμάχιο εργασίας του στον επόμενο σταθμό, όποτε ο πρώτος ολοκληρώνει τις εργασίες που του έχουν ανατεθεί και ο δεύτερος είναι έτοιμος να τις ξεκινήσει.

Σε μια ασύγχρονη γραμμή συναρμολόγησης χωρίς ρυθμό, μπορεί να εγκατασταθούν ενδιάμεσοι προσωρινοί χώροι (buffers) μεταξύ των σταθμών εργασίας προκειμένου να αντιμετωπιστούν φαινόμενα έλλειψης ή μπλοκαρίσματος λόγω διακυμάνσεων στους χρόνους εργασίας. Η έλλειψη συμβαίνει όταν ένας σταθμός εργασίας παραμένει σε αδράνεια λόγω ενός κενού buffer, ενώ το μπλοκάρισμα συμβαίνει όταν ένα buffer είναι πλήρες και επομένως δεν μπορεί να λάβει ένα επεξεργασμένο τεμάχιο εργασίας από τους σταθμούς εργασίας .

Αν και αρχικά τα προβλήματα εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης αναφέρονταν στις γραμμές συναρμολόγησης με ρυθμό, παρατηρήθηκαν εξίσου και στις γραμμές συναρμολόγησης χωρίς ρυθμό. Στα συστήματα αυτά οι ρυθμοί παραγωγής των σταθμών πρέπει να είναι εξισορροπημένοι και ο χρονικός κύκλος μπορεί να ερμηνευτεί ως το μέσο χρονικό διάστημα για την εκτέλεση μιας εργασίας. Αν η κατανομή της εργασίας δε είναι ισότιμη, υψηλά αποθέματα στοιβάζονται στα buffers. Με δεδομένο όμως ότι η χωρητικότητα των buffers είναι περιορισμένη ένας σταθμός σταματά να λειτουργεί μέχρι να γίνει η μεταφορά των έτοιμων κομματιών στο buffer του επόμενου σταθμού ή εάν η χρήση του προηγούμενου σταθμού είναι πολύ υψηλή. Τέτοιου τύπου προβλήματα που αφορούν στην εξεύρεση λύσης αναφορικά με την βέλτιστη ροή σε συνδυασμό με την αποτελεσματικότητα, ανήκουν στην γενικότερη κατηγορία των προβλημάτων αλληλουχίας ή ροής (*flow shop problems*) (Becker & Scholl, 2006).

3.4 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ένα σημαντικό στοιχείο που επηρεάζει τις διαφορετικές εκφάνσεις του ALBP είναι η μεταβλητότητα των χρόνων εργασίας. Όταν η αναμενόμενη διακύμανση των χρόνων εργασίας είναι αρκετά μικρή, όπως, π.χ. συμβαίνει στις απλές εργασίες ή στην περίπτωση των πολύ αυτοματοποιημένων σταθμών, οι χρόνοι εργασιών θεωρούνται *ντετερμινιστικοί*. Από την άλλη, *στοχαστικοί χρόνοι εργασιών*, όπου η διακύμανση των χρόνων εργασίας είναι μεγαλύτερη, δύναται να παρατηρούνται κυρίως λόγω της αστάθειας του ρυθμού εργασίας των χειριστών, τις δεξιότητες και τα κίνητρα τους, καθώς και την ευαισθησία στην αποτυχία των σύνθετων διαδικασιών. Επιπλέον είναι δυνατόν να υπάρξουν σημαντικές χρονικές μειώσεις λόγω επιδράσεων των διαδικασιών μάθησης ή των διαδοχικών βελτιώσεων της παραγωγικής διαδικασίας (Becker & Scholl, 2006).

3.4.1 Ντετερμινιστικοί χρόνοι εργασιών

Πλήθος δραστηριοτήτων στη βιομηχανία και τις υπηρεσίες απαιτούν τον προγραμματισμό εργασιών που να μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα, με το πιο σαφές παράδειγμα να είναι ίσως γραμμή συναρμολόγησης προϊόντων.

Το ντετερμινιστικό ALBP μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: με δεδομένη μια ομάδα εργασιών, καθεμία από τις οποίες έχει συγκεκριμένο χρόνο απόδοσης αλλά και ένα σύνολο σχέσεων προτεραιότητας των συγκεκριμένων εργασιών, το πρόβλημα είναι να ανατεθούν οι εργασίες σε μια διατεταγμένη ακολουθία σταθμών έτσι ώστε η απόδοση να είναι η βέλτιστη (Erdal E., Subhash C. S., 1998). Η επίλυση του ντετερμινιστικού ALBP δύναται να έχει δυο προσανατολισμούς : Ο ένας αφορά στην εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσω αλγορίθμων (Baybars, I., 1986a) και ο άλλος αναφέρεται σε ευρετικές διαδικασίες.

3.4.2 Στοχαστικοί χρόνοι εργασιών

Όταν οι χρόνοι εργασιών είναι στοχαστικοί, υπάρχει πιθανότητα ορισμένες από τις εργασίες να μην ολοκληρωθούν εντός του προκαθορισμένου χρονικού κύκλου. Σε πολύ αυτοματοποιημένες γραμμές οι χρόνοι εργασιών συνήθως διαφέρουν από κύκλο σε κύκλο, ειδικά όταν εμπλέκονται ανθρώπινοι χειριστές. Γενικά, η διακύμανση του χρόνου μιας εργασίας αυξάνεται ανάλογα με την πολυπλοκότητά της. Χρονικά προσανατολισμένοι στόχοι των στοχαστικών μοντέλων είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας υπέρβασης του χρονικού κύκλου σε οποιονδήποτε σταθμό ή οι στοχαστικές διακυμάνσεις των χρόνων των σταθμών (Becker & Scholl, 2006).

Οι Moodie και Young (Moodie, C.L, 1965) ήταν οι πρώτοι που εφάρμοσαν στοχαστικούς χρόνους εργασιών ως ανεξάρτητες κανονικά κατανεμημένες μεταβλητές και πραγματοποίησαν μελέτες για την απόκτηση a χρόνου ολοκλήρωσης για κάθε σταθμό εργασίας μικρότερο από c (χρονικό κύκλο) με δεδομένη πιθανότητα.

Η εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την αύξηση του αποτελεσματικότητας των παραγωγικών διαδικασιών. Ωστόσο, στην πράξη, ένα ευρύ φάσμα διαταραχών μπορεί να διακόψει την υπάρχουσα ισορροπία στο φόρτο εργασίας. Πολλοί ερευνητές έχουν επιχειρήσει να λύσουν το πρόβλημα εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης με την υπόθεση ότι οι διαδικασίες συναρμολόγησης είναι ομαλές χωρίς διακοπές. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία που διερευνά τις προσαρμογές διάταξης και προσαρμογές ρυθμού παραγωγής για γραμμές συναρμολόγησης και παραγωγής σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Αυτό βασίζεται στην παρακολούθηση των διαδικασιών συναρμολόγησης σε πραγματικό χρόνο (αυτό είναι αδύνατο να εκτελεστεί σε παρελθόντα χρόνο). Επιπλέον, είναι συνήθως δύσκολο να ενσωματωθούν παράγοντες αβεβαιότητας στη διαδικασία εξισορρόπησης λόγω της τυχαιότητας και της μη γραμμικότητας από τους περισσότερους αβέβαιους παράγοντες (Sotskov, Y.N., 2023)

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία που αναφέρεται στις στοχαστικές γραμμές παραγωγής με ρυθμό, ο χρόνος λειτουργίας αποτελεί τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί συγκεκριμένη στατιστική κατανομή. Στα πιο πολλά μοντέλα, ο χρόνος εργασίας θεωρείται ανεξάρτητη κανονική μεταβλητή :

$$t_j \approx N(\mu_j, \sigma_j) \text{ όπου } j= 1, \dots, n,$$

μ_j = μέση τιμή

σ_j = τυπική απόκλιση

Η παραπάνω υπόθεση θεωρείται ότι ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις γραμμών παραγωγής (Moodie, C.L, 1965).

Στην περίπτωση της γραμμής συναρμολόγησης με ρυθμό, ο χρόνος του κάθε σταθμού περιορίζεται εντός του χρονικού κύκλου c , και αποτελεί την μέγιστη τιμή χρόνου για την επεξεργασία κάθε τεμαχίου εργασίας. Δεδομένου ότι οι εργασίες είναι αδιαίρετα στοιχεία του συνολικού έργου, το c δεν μπορεί να είναι μικρότερο από τον μεγαλύτερο

χρόνο εργασίας $t_{max} = \max\{t_j, j = 1, \dots, n\}$. Λόγω του περιορισμού του χρονικού κύκλου, οι γραμμές συναρμολόγησης με ρυθμό έχουν σταθερό ρυθμό παραγωγής (αντίστοιχο του χρονικού κύκλου). Στην περίπτωση που δεν υφίσταται ένας κοινός χρονικός κύκλος και άρα όλοι οι σταθμοί λειτουργούν με μεμονωμένη ταχύτητα, τα τεμάχια μπορεί να πρέπει να περιμένουν προτού μπουν στον επόμενο σταθμό ή/και οι σταθμοί μπορεί να μείνουν σε αδράνεια όταν πρέπει να περιμένουν για το επόμενο τεμάχιο εργασίας. Αυτές οι δυσκολίες ξεπερνιούνται εν μέρει από buffers μεταξύ των σταθμών (Becker & Scholl, 2006).

Σε ένα σύστημα παραγωγής συναρμολόγησης με ρυθμό συνήθως υπάρχει ένας κοινός χρονικός κύκλος που οριοθετεί τους χρόνους διεργασίας σε όλους τους σταθμούς ($b1 \frac{1}{4} J$). Ο ρυθμός διατηρείται είτε από μια συσκευή μεταφοράς υλικών π.χ. έναν μεταφορικό ιμάντα, ο οποίος αναγκάζει τους χειριστές να ολοκληρώσουν τις εργασίες τους πριν το κατεργαζόμενο τεμάχιο φτάσει στο τέλος του αντίστοιχου σταθμού ή με μια λεγόμενη διακοπτόμενη μεταφορά, όπου το τεμάχιο εργασίας σταματάει τελείως σε κάθε σταθμό, αλλά μεταφέρεται αυτόματα μόλις έχει παρέλθει ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (Boysen, et al., 2008).

Οι Hillier και Boling (1966) απέδειξαν ότι η απόδοση μιας σειράς γραμμής παραγωγής με $N = 2, 3$ ή 4 σταθμούς, με εκθετικά κατανομημένους χρόνους επεξεργασίας και περιορισμένους ενδιάμεσους σταθμούς αποθήκευσης θα μπορούσε να αυξηθεί με την ανισορροπία της γραμμής. Χρησιμοποιώντας αναλυτικές μεθόδους πρότειναν ότι η παραγωγή θα μπορούσε να μεγιστοποιηθεί με την κατανομή περισσότερης εργασίας στον πρώτο και στον τελευταίο σταθμό. Με άλλα λόγια σταθμοί που λειτουργούν με χαμηλότερους μέσους χρόνους λειτουργίας θα πρέπει να τοποθετούνται στο κέντρο της γραμμής. Δεδομένου ότι η γραφική αναπαράσταση των μέσων χρόνων των σταθμών εμφανίζεται εικονογραφικά διαμορφώνοντας ένα σχήμα μπολ με βύθισμα στη μέση, ο όρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το «φαινόμενο μπολ». Η «διάταξη του μπολ» είχε ως αποτέλεσμα κέρδος απόδοσης $0,54\%$, το οποίο σε απόλυτους αριθμούς δεν φαινόταν σημαντικό, αλλά όταν λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια ζωής της γραμμής παραγωγής θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση (Sholl, 1998).

Σε μια εναλλακτική διάταξη των *Unpaced Assembly Lines*, ο εξοπλισμός βρίσκεται σε έναν περιστρεφόμενο ιμάντα, ο οποίος λειτουργεί σαν ένα κοινό buffer για όλους τους

σταθμούς, στον οποίο αποθηκεύονται τόσο υλικά συναρμολόγησης όσο και ημιτελή τεμάχια εργασίας. Καθώς τα τεμάχια περιστρέφονται, οι χειριστές συλλέγουν ένα νέο προς επεξεργασία, εφόσον έχουν τελειώσει την συναρμολόγηση του προηγούμενου το οποίο και τοποθετούν πάνω στον ιμάντα. Φυσικά μια τέτοια διάταξη είναι χρήσιμη μόνο στην περίπτωση των μικρών, χειροκίνητων σταθμών (Sholl, 1998).

Σε αυτήν την περίπτωση μιας γραμμής συναρμολόγησης με προσωρινή μνήμη (χωρίς ρυθμό), το ALBP συνοδεύεται από το πρόσθετο πρόβλημα λήψης απόφασης της θέσης και της διάστασης των buffers.

Στις γραμμές συναρμολόγησης χωρίς ρυθμό, τα τεμάχια μεταφέρονται κάθε φορά που ολοκληρώνονται οι απαιτούμενες λειτουργίες, αντί να δεσμεύονται σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Οι Buzacott και Shanthikumar (1993) προχωρούν σε μια περαιτέρω διάκριση αναφορικά με το εάν τα τεμάχια εργασίας περνούν ταυτόχρονα από όλους τους σταθμούς ή εάν κάθε σταθμός αποφασίζει για τη μεταφορά ξεχωριστά (ασύγχρονη λειτουργία). Σε μια ασύγχρονη κίνηση, ένα τεμάχιο εργασίας μετακινείται πάντα όταν πετρωθούν όλες οι απαιτούμενες λειτουργίες σε έναν σταθμό και ο διαδοχικός σταθμός είναι ελεύθερος. Μετά τη μεταφορά, ο σταθμός συνεχίζει να εργάζεται σε ένα νέο τεμάχιο εργασίας, εκτός εάν ο προηγούμενος σταθμός δεν είναι σε θέση να κάνει παράδοση (*κατάσταση πείνας*). Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι χρόνοι αναμονής, εγκαθίστανται ενδιάμεσοι σταθμοί προσωρινής αποθήκευσης (buffer), οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν προσωρινά τεμάχια εργασίας. Στην περίπτωση δε λήψης απόφασης για εγκατάσταση buffer, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους εγκατάστασης και της ζητούμενης απόδοσης, επειδή η τελευταία τείνει να αυξάνεται με την εγκατάσταση περισσότερων και μεγαλύτερων buffers (Boysen, et al., 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ALBP)

Γενικά αναφορικά με τις ταξινομήσεις της εξισορρόπησης της γραμμής παραγωγής υπάρχουν δυο κατηγορίες : οι Simple Assembly Line Balancing (SALB) [1,2] και οι General Assembly Line Balancing (GALB). Το SALBP είναι ένα από τα πιο καλά

μελετημένα προβλήματα στον τομέα της εξισορρόπησης γραμμών. Μια σημαντική πτυχή που διαφοροποιεί τα SALBP είναι το μέτρο απόδοσης (Masood, 2017).

Ο χρονικός κύκλος c και ο αριθμός των σταθμών εργασίας m αναμένεται να είναι αντιστρόφως ανάλογα. Εάν ο χρόνος κύκλου είναι μεγαλύτερος, ο αριθμός των σταθμών εργασίας αναμένεται να είναι μικρότερος και το αντίστροφο. Εάν ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των σταθμών εργασίας για ένα δεδομένο ρυθμό παραγωγής, αναφέρεται συνήθως στη βιβλιογραφία ως πρόβλημα SALB-1 (τύπου 1). Εάν ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός παραγωγής ελαχιστοποιώντας το μέγιστο του αθροίσματος των χρόνων εργασιών των σταθμών εργασίας για έναν δεδομένο αριθμό σταθμών εργασίας, τότε αναφέρεται ως πρόβλημα SALB-2 (τύπου 2) (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014).

Σύμφωνα με τους Make, et al., (2017), η γραμμή διάταξης των σταθμών εργασίας στην SALB κατηγορία, είναι γραμμική (συνήθως είναι συνδεδεμένοι με ιμάντα) και στους οποίους έχει ανατεθεί από μια εργασία πριν την παραγωγή του ολοκληρωμένου προϊόντος. Υπάρχουν δε αρκετοί τύποι προβλημάτων που ταξινομούνται στο SALB με διαφορετική εξέταση της αντικειμενικής λειτουργίας :

- πρόβλημα SALB τύπου- 1 :ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των σταθμών εργασίας m με σταθερό χρονικό κύκλο c .
- πρόβλημα SALB τύπου- 2 : ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρονικού κύκλου c με σταθερό αριθμό σταθμών εργασίας m .

Για το SALBP -1 ο χρονικός κύκλος c αποτελεί περιορισμό ενώ για τον SALBP-2 αντικειμενική λειτουργία. Αντιθέτως ο αριθμός των σταθμών περιορίζει το SALBP-2 ενώ ελαχιστοποιείται από το SALBP -1. Αυτή η δυαδικότητα διαφέρει εκείνη των γραμμικών προγραμμάτων (Sholl, 1998).

- πρόβλημα SALB τύπου- E : ο στόχος γενικά επικεντρώνεται στη μεγιστοποίηση E της απόδοσης της γραμμής, η στην ισοδύναμα ελαχιστοποίηση του $m * c$ (Sholl, 1998).
- πρόβλημα SALB τύπου - F (Feasibility problem) : εδώ αναζητείται μια εφικτή λύση με δεδομένο αριθμό σταθμών εργασίας m και δεδομένο χρονικό κύκλο c (Boysen, et al., 2008) . Το feasibility problem σχετίζεται με την εύρεση ενός συγκεκριμένου εφικτού (m,c) συνδυασμού.

Οι υποθέσεις του SALBP είναι πολύ περιοριστικές σε σχέση με τα πραγματικά συστήματα γραμμής συναρμολόγησης οπότε και οι ερευνητές εστίασαν τις προσπάθειές τους στον εντοπισμό, τη διατύπωση και την επίλυση πιο ρεαλιστικών προβλημάτων τα οποία περιλαμβάνονται στον όρο *γενικευμένο πρόβλημα εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης* (GALBP).

4.1 ΑΠΛΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING, SALB)

Αναφορικά με τα SALBP στόχος των ερευνητών είναι να πετύχουν την ζητούμενη ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος, έχοντας μια δεδομένη ποσότητα διαθέσιμων πόρων (Nils Boysen, 2021).

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας στην εξισορρόπηση γραμμής συναρμολόγησης έχει αφιερωθεί στη μοντελοποίηση και την επίλυση του προβλήματος της απλής εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης (SALBP) το οποίο έχει τα ακόλουθα κύρια χαρακτηριστικά (Becker & Scholl, 2006):

- ✓ μαζική παραγωγή ενός ομοιογενούς προϊόντος με δεδομένη την παραγωγική διαδικασία
- ✓ γραμμή παραγωγής με ρυθμό, σταθερού χρονικού κύκλου c
- ✓ ντετερμινιστικοί χρόνοι λειτουργίας t_j
- ✓ κανένας περιορισμός ανάθεσης, εκτός των περιορισμών προτεραιότητας.
- ✓ διάταξη σειριακής γραμμής με m μονόπλευρους σταθμούς.
- ✓ όλοι οι σταθμοί είναι εξίσου εξοπλισμένοι με μηχανήματα και στελεχωμένοι με εργαζομένους
- ✓ εκκίνηση σταθερού ρυθμού (διάστημα εκκίνησης= χρονικός κύκλος)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα απλά προβλήματα εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης (SALBP) ταξινομούνται σε δύο τύπους, 1 & 2.

Στα προβλήματα τύπου 1, με δεδομένο τον απαιτούμενο ρυθμό παραγωγή, τις εργασίες συναρμολόγησης, τους χρόνους εργασιών και τις απαιτήσεις προτεραιότητας, ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των σταθμών εργασίας, ώστε να μειωθεί το κόστος εργασίας και οι απαιτήσεις χώρου. Τα προβλήματα τύπου 1 εμφανίζονται γενικά τη στιγμή του σχεδιασμού νέων γραμμών συναρμολόγησης.

Στα προβλήματα τύπου 2, όταν ο αριθμός των θέσεων εργασίας ή ο αριθμός των εργαζομένων είναι σταθερός, ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο χρονικός κύκλος, ώστε να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός παραγωγής. Τα προβλήματα τύπου 2 εμφανίζονται γενικά, όταν ο οργανισμός θέλει να παράγει τον βέλτιστο αριθμό ειδών χρησιμοποιώντας σταθερό αριθμό σταθμών εργασίας χωρίς επέκταση. Σε αυτόν τον τύπο είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι προτεραιότητες και οι περιορισμοί. Τα προβλήματα τύπου 1 είναι πιο συνηθισμένα από τον τύπο 2 (Ghutukade Santosh, 2013).

4.1.1 SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING -1 (SALB -1)

Ο στόχος αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης της γραμμής συναρμολόγησης ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων σταθμών m . Αυτή η διαδικασία ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου αδράνειας για όλους τους σταθμούς. Να σημειωθεί ότι το SALBP-1 είναι ένα αναστρέψιμο πρόβλημα. Έτσι οι περιορισμοί προτεραιότητας μπορούν να αντιστραφούν για να ληφθεί μια διαφορετική περίπτωση και οποιαδήποτε λύση που βρέθηκε για τη νέα περίπτωση μπορεί να μετατραπεί σε μια λύση για την αρχική περίπτωση. Οι εργασίες μπορούν επίσης να ανατεθούν σε σταθμούς εργασίας με αντίστροφη σειρά και οι αρχικοί ή οι τελικοί σταθμοί εργασίας μπορούν ακόμη και να κατασκευαστούν ταυτόχρονα (Vilà M.,Pereira J., 2013).

Ο πρωταρχικός στόχος του προβλήματος εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης (ALB) είναι η υποδιαίρεση των εργασιών με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να μη γίνεται παραβίαση των περιορισμών προτεραιότητας των εργασιών και αφετέρου το άθροισμα των χρόνων των εργασιών ανά σταθμό εργασίας να είναι μικρότερο ή ίσο με τον δεδομένο χρονικό κύκλο. Με αυτό τον τρόπο η απόδοση της εξισορρόπησης μεγιστοποιείται (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014) .

4.1.2 SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING -2 (SALB -2)

Εδώ ο πρωταρχικός στόχος είναι η υποδιαίρεση των εργασιών σε ένα δίκτυο δεδομένης προτεραιότητας, με συγκεκριμένο αριθμό σταθμών χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί προτεραιότητας μεταξύ των εργασιών έτσι ώστε ο χρονικός κύκλος να ελαχιστοποιείται (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014).

4.1.3 SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING -E (SALB -E)

Η απλή εξισορρόπηση γραμμής συναρμολόγησης στην οποία το πρόβλημα που παρατηρείται είναι Type-E (SALB-E), στοχεύει στη μεγιστοποίηση της απόδοσης της γραμμής ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τον αριθμό των σταθμών εργασίας και τον χρονικό κύκλο.

Οι ερευνητές (Jusop M, Rashid M F F Ab, 2015) έχουν μελετήσει την SALB-E περιπτώσεις προβλημάτων εξισορρόπησης και η προσπάθεια επίλυσης τους έχει στόχο τις παρακάτω τέσσερις αντικειμενικές λειτουργίες της γραμμής παραγωγής:

- (i) ελαχιστοποίηση του αριθμού των σταθμών εργασίας,
- (ii) ελαχιστοποίηση του χρόνου αδράνειας,
- (iii) ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φόρτου εργασίας και
- (iv) μεγιστοποίηση του αποτελεσματικότητας γραμμής.

Η παρακάτω εξίσωση χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει την απόδοση της γραμμής:

$$E = \sum_{i=1}^m T_i / (mc)$$

Όπου:

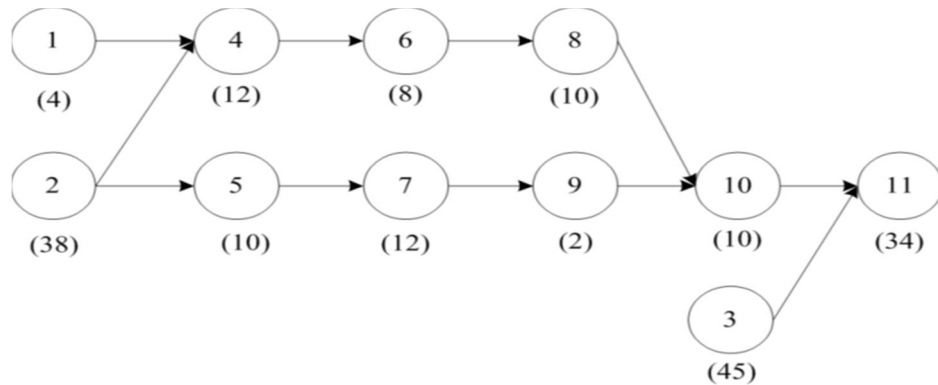
E: αποδοτικότητα της γραμμής, m: αριθμός των σταθμών εργασίας, c: χρονικός κύκλος,
T_i: χρόνος επεξεργασίας στους σταθμούς εργασίας

Ισχύει δε η σχέση : $T = m \cdot c$ όπου T= η χωρητικότητα γραμμής (Becker, C., & Scholl, A. 2006).

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της γραμμής, ο βέλτιστος αριθμός σταθμών εργασίας πρέπει να λαμβάνεται από ένα δεδομένο ct_{max} . Η τιμή του ct_{max} πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με τους συνολικούς χρόνους εργασίας και ταυτόχρονα θα πρέπει επίσης να είναι μεγαλύτερη ή ισοδύναμη με τον μεγαλύτερο χρόνο εργασίας. Θα απαιτείται μόνο ένας σταθμός εργασίας κάθε φορά που η τιμή του υπερβαίνει ή είναι ίδια με τους συνολικούς χρόνους εργασιών (Jusop M, Rashid M F F Ab, 2015).

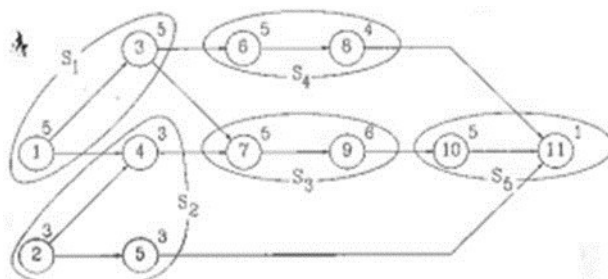
4.1.4 SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING -F (SALB -F)

Ο όρος πρόβλημα σκοπιμότητας (feasibility problem) αναφέρεται στην εξεύρεση λύσης αναφορικά με την ανάθεση εργασιών σε έναν δεδομένο αριθμό σταθμών m και για έναν δεδομένο χρονικό κύκλο c . Σύμφωνα με το SALB-F θα πρέπει να αποφασιστεί εάν μια γραμμή παραγωγής με m σταθμούς μπορεί να λειτουργήσει για έναν συγκεκριμένο χρονικό κύκλο c . Προκειμένου η απάντηση να είναι θετική θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία γραμμής για ένα συγκεκριμένο (m, c) συνδυασμό (Sholl, 1998).

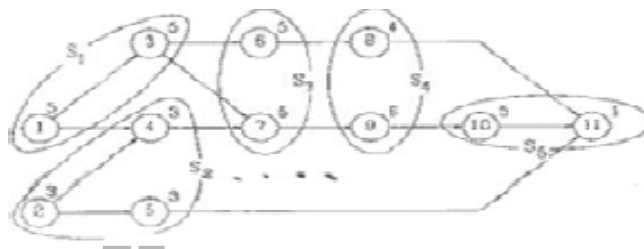


Εικόνα 12: Γράφημα προτεραιότητας με 11 εργασίες

(πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Precedence-graph-of-an-instance-with-11-tasks_fig1_343439048)



Εικόνα 13: Λύση για $c=11$ και $m=5$ (Sholl, 1998)



Εικόνα 14: Λύση για $c=10$ και $m=5$ (Sholl, 1998)

Υπάρχει δυσκολία στο να προκαθοριστεί ένας κατάλληλος χρονικός κύκλος c , επειδή μπορεί να είναι δυνατή η λειτουργία μιας γραμμής με τον ίδιο αριθμό σταθμών αλλά

με μικρότερο χρονικό κύκλο από τον προκαθορισμένο. Έτσι ενώ μια γραμμή με 5 σταθμούς μπορεί να λειτουργήσει με τους χρονικούς κύκλους 10 και 11 αντίστοιχα (εικονα12,13 &14), δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μικρότεροι χρονικοί κύκλοι, επειδή δεν υπάρχει εφικτή ανάθεση εργασιών για SALBP-F με $m=5$ και $c=9$ (Sholl,1998).

4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (GENERAL ASSEMBLY LINE BALANCING, GALB)

Το GALB Problem εστιάζει σε γενικά προβλήματα ALB, όπου επιπλέον παράμετροι όπως π.χ. γραμμές σχήματος U, παράλληλοι σταθμοί ή εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας επεκτείνουν το βασικό πρόβλημα (Nils Boysen, 2021).

4.2.1 Two-Sided Assembly Line Balancing (2S-ALB)

Η γραμμή συναρμολόγησης δύο όψεων εισήχθη για πρώτη φορά από τον Bartholdi το 1993, για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων προϊόντων αυξημένου μεγέθους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διπλής όψης ALB, περιλαμβάνει δύο θέσεις εργασίας σε κάθε σταθμό, μία στην αριστερή πλευρά και μία στη δεξιά πλευρά της γραμμής. Ορισμένες από τις εργασίες πραγματοποιούνται σε μία από τις πλευρές ενώ άλλες μπορούν να εκτελεστούν και στις δύο πλευρές. Στην δεύτερη περίπτωση απαιτείται αυστηρός προγραμματισμός εργασιών εντός του χώρου λειτουργίας της γραμμής συναρμολόγησης : ένας χώρος όπου εκτελείται μια εργασία j πρέπει να περιμένει τον αντίθετο χώρο λειτουργίας, εάν εκεί εκτελείται μια προηγούμενη του j εργασία. Πρόκειται για το λεγόμενο "*πρόβλημα αλληλεπίδρασης στο χώρο εργασίας*" (Nils Boysen, 2021).

Οι μεγάλες βιομηχανίες παραγωγής συναρμολόγησης όπως οι αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν τον 2S-ALB τύπο γραμμών ώστε να επιτύχουν τον στόχο παραγωγικότητάς τους. Η λειτουργική διαδικασία στο 2S-ALB θα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την μονής όψης ALB ,όπως (Becker & Scholl, 2006):

- a. Μικραίνει τη γραμμή συναρμολόγησης.
- b. Εξοικονομεί χώρους στις γραμμές συναρμολόγησης.
- c. Περιορίζει το κόστος των εργαλείων και των εξαρτημάτων.
- d. Συντομεύει τον χρόνο διεκπεραίωσης.
- e. Περιορίζει το χειρισμό του υλικού.

4.2.2 Mixed –model Assembly line balancing (MiMALB)

Μεταξύ των διαφόρων παραλλαγών ALB, η γραμμή συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου ή MiMALBP αποτελεί μια ικανοποιητική επιλογή για την παραγωγή προσαρμοσμένων προϊόντων, καθώς μπορεί να συναρμολογήσει πολλά παρόμοια μοντέλα ταυτόχρονα.

Για πρώτη φορά το πρόβλημα εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης μικτού μοντέλου αναπτύχθηκε από τον Θωμόπουλο το 1967. Έκτοτε έχει γίνει μεγάλη έρευνα σε αυτόν τον τομέα. Η πλειοψηφία των ερευνητών θεωρεί ότι οι σταθμοί εργασίας είναι πάντα διαθέσιμοι και δεν θα αποτύχουν. Ωστόσο, στην πραγματική διαδικασία παραγωγής, αυτό μπορεί να μην ισχύει διότι οι σταθμοί εργασίας ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμοι λόγω γήρανσης, βλάβης ή προληπτικής συντήρησης. Αν και η προληπτική συντήρηση έχει πολλά οφέλη, μπορεί να προκαλέσει διακοπές της παραγωγής στο MiMALBP (Meng K., Tang Q., Cheng L., Zhang Z., 2022).

Το μεικτό μοντέλο παραγωγής χρησιμοποιείται κυρίως λόγω των εξής πλεονεκτημάτων του (Sholl, 1998) :

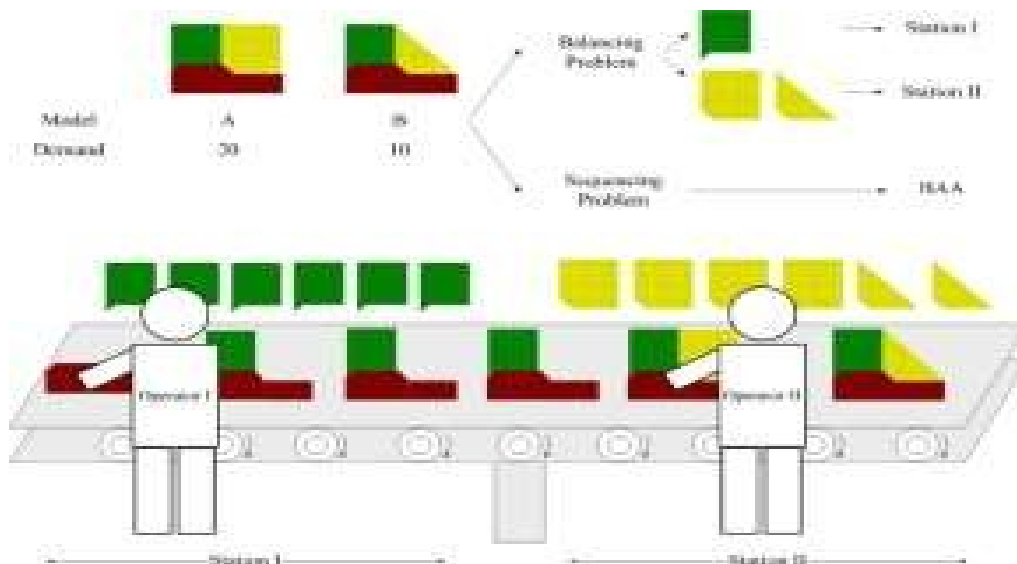
- ✓ Της ύπαρξης συνεχούς ροής των υλικών.
- ✓ Της μείωσης του αποθέματος του τελικού προϊόντος.
- ✓ Της ευελιξίας αναφορικά με την ανάγκη αλλαγής μοντέλου, όταν αυτή προκύψει. Αυτή η ευελιξία απαιτεί την ύπαρξη ακριβούς εξοπλισμού ο οποίος οδηγεί στην μείωση ή ακόμα και στην εξάλειψη των καθυστερήσεων λόγω των δραστηριοτήτων εγκατάστασης.

Η εξισορρόπηση μιας γραμμής συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που λαμβάνει υπόψη όλους τους περιορισμούς διαφορετικών παρόμοιων προϊόντων που παράγονται στην ίδια γραμμή. Έτσι κατά την εγκατάσταση του μοντέλου θα πρέπει να ληφθούν διάφορες μακροπρόθεσμες ή βραχυπρόθεσμες αποφάσεις οι οποίες σχετίζονται με το μήκος της γραμμής παραγωγής και τον αριθμό των σταθμών, τον χρονικό κύκλο ή/και το φόρτο εργασίας των σταθμών(Sholl, 1998).

Κάθε γραμμή συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου έχει σχεδιαστεί για να παράγει M αριθμό μοντέλων με παρόμοια χαρακτηριστικά ,με δεδομένη γνωστή ζήτηση μοντέλων dm , όπου $m \leq M$. Ορίζουμε την συνολική ζήτηση Dm ως το άθροισμα όλων των απαιτήσεων που πρέπει να ολοκληρωθούν σε δεδομένη περίοδο PT . Κάθε μοντέλο m

έχει ένα γράφημα προτεραιότητας G και όλα τα γραφήματα μπορούν να συνδυαστούν σε ένα μόνο γράφημα ,που ονομάζεται «συνδυασμένο γράφημα προτεραιότητας», για να μετατρέψουν το MiMALBP σε SALBP. Κάθε εργασία i στο συνδυασμένο γράφημα πρέπει να εκχωρηθεί σε έναν σταθμό εργασίας και το άθροισμα όλων των χρόνων εκτέλεσης των εργασιών που ανατέθηκαν στον ίδιο σταθμό εργασίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τον χρονικό κύκλο που υπολογίζεται με βάση την σχέση: $c = PT/ Dm$. Το MiMALBP, όπως και το SALBP μπορεί να ταξινομηθεί σε δυο τύπου: MiMALBP-I και MiMALBP-II. Ο στόχος στο MiMALBP-I είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των σταθμών εργασίας για ένα σταθερό χρόνο κύκλου, ενώ στο MiMALBP-II ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου κύκλου για έναν σταθερό αριθμό σταθμών εργασίας (Belkharroubi L., Yahyaoui K., 2022).

Τα παραγόμενα προϊόντα μπορεί να έχουν διαφορετικό τρόπο επεξεργασίας στην γραμμή παραγωγής του MiMAL, γεγονός που μπορεί να καταστήσει τη γραμμή λιγότερο αποτελεσματική. Ένας πιθανός τρόπος διαχείρισης του προβλήματος είναι η προσαρμογή την αλληλουχίας των παραγομένων προϊόντων ώστε το μέσο περιεχόμενο της εργασίας να παραμείνει σταθερό. Αυτού του είδους το πρόβλημα ονομάζεται «πρόβλημα αλληλουχίας μεικτού μοντέλου» (*Mixed Model Sequencing Problems ή MSP*). Ορισμένα από τα παραγόμενα προϊόντα προϋποθέτουν την ύπαρξη μεγαλύτερου φόρτου εργασίας σε έναν σταθμό εργασίας σε σχέση με άλλα που ενδεχομένως να απαιτούν μικρότερη επεξεργασία. Στην επίλυση ενός MSP (Εικόνα 15) μπορεί να γίνεται εναλλαγή αυτών των προϊόντων και να ρυθμίζεται ο κρίσιμος σταθμός ώστε να του αναλογεί ένας μέσος φόρτος εργασίας. Ο συνδυασμός των απαιτήσεων για όλα τα μοντέλα ονομάζεται *μείγμα μοντέλων* και ο αντίστοιχος προγραμματικός ορίζοντας καλείται *περίοδος* (Sholl, 1998).



Εικόνα 15: Solving of sequencing problems

(πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.11.027>)

Το MiMALBP βασίζεται στις ίδιες υποθέσεις με το SALBP δηλ. ντερεμενιστικοί χρόνοι λειτουργίας, σειριακή διάταξη σταθμών κλπ. Εμφανίζει όμως κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά (Sholl, 1998) όπως:

1. Η συναρμολόγηση κάθε μοντέλου απαιτεί την εκτέλεση ενός συνόλου εργασιών που συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις προτεραιότητας
2. Ένα υποσύνολο εργασιών είναι κοινό σε όλα τα μοντέλα
3. Οι κοινές εργασίες, εκτελούνται στους ίδιους σταθμούς αλλά ενδεχομένως να έχουν διαφορετικούς χρόνους εκτέλεσης. Μηδενικός χρόνος εκτέλεσης σημαίνει ότι μια εργασία ίσως να μην είναι απαραίτητη για ένα μοντέλο.
4. Υπάρχει σταθερός συνολικός χρόνος της προγραμματικής περιόδου
5. Υπάρχει αναμενομένη ζήτηση για όλα τα μοντέλα.

Υπάρχουν διάφορες εκδοχές του MiMALBP από τις οποίες προκύπτει η σχέση του με το SALBP όπως αναφέρονται παρακάτω:

- Ένα μεικτό μοντέλο με k σταθμούς εργασίας, είναι εφικτό για έναν χρονικό κύκλο c , εάν ο μέσος χρόνος ανά σταθμό T_k δεν υπερβαίνει το c για όλους τους σταθμούς. Εδώ οι εργασίες που είναι κοινές σε διάφορα μοντέλα έχουν ανατεθεί στον ίδιο σταθμό, επειδή ακριβώς αντιπροσωπεύονται από τον ίδιο κόμβο στο γράφημα προτεραιότητας.

- Ένα μέσο μοντέλο ορίζεται από το γράφημα κοινής προτεραιότητας και τον μέσο χρόνο εργασίας t_j . Ένα συγκεντρωτικό μοντέλο περιλαμβάνει το γράφημα κοινής προτεραιότητας και τον χρόνο λειτουργίας t_j^1 .

Με τα δυο αυτά μοντέλα ορίζονται ισοδύναμα προβλήματα εξισορρόπησης.

Για την επίλυση του MiMALBP υπάρχουν δυο τρόποι (Becker and Scholl, 2006):

1. Να γίνει αναγωγή σε προβλήματα του ενός μοντέλου: Ορισμένα δεδομένα μεικτού μοντέλου μπορούν να απλοποιηθούν και να μετατραπούν σε SALBP δεδομένα και στη συνέχεια να επιλυθούν ευκολότερα.
2. Να γίνει οριζόντια εξισορρόπηση: Σε περιπτώσεις όπου οι χρονικοί κύκλοι υπολογίζονται σε μέση βάση, συχνά γίνεται εμφανής κάποια αναποτελεσματικότητα στη γραμμή. Η ανισορροπία μπορεί είτε να επηρεάσει τη γραμμή συναρμολόγησης σε υπερφόρτωση εργασίας ή σε χρόνο αδράνειας. Για τη μείωση της οριζόντιας ανισορροπίας, προτείνονται ευρετικές ή άλλες μαθηματικές μέθοδοι.

Στα μεικτά μοντέλα παραγωγής, οι χρόνοι ρύθμισης μεταξύ των μοντέλων θα μπορούσαν να μειωθούν αρκετά, έτσι ώστε οι αλληλουχίες μεικτών μοντέλων να μπορούν να συναρμολογηθούν στην ίδια γραμμή. Παρά τις προσπάθειες ώστε τα συστήματα παραγωγής να γίνουν πιο ευέλικτα, αυτό συνήθως απαιτεί πολύ ομοιογενείς διαδικασίες παραγωγής. Κατά συνέπεια, υιοθετείται τυπικά η υπόθεση ότι όλα τα μοντέλα είναι παραλλαγές του ίδιου βασικού προϊόντος και διαφέρουν μόνο σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προϊόντος που μπορούν να υποστούν προσαρμογή και που αναφέρονται ως επιλογές (Boysen, et al., 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Πληθώρα ερευνητών έχει ασχοληθεί με την επίλυση προβλημάτων εξισορρόπησης των γραμμών παραγωγής. Οι αναφορές αφορούσαν είτε μεμονωμένα είτε μεικτά μοντέλα εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Sivasankaran & Shahabudeen, (2017):

- ✓ Οι Thangavelu και Shetty (1971), Deckro and Rangachari (1990), Pastor (2011) και Sivasankaran και Shahabudeen (2013b) ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα για το πρόβλημα εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης ενός μοντέλου.
- ✓ Οι Panneerselvam and Sankar (1993), Genikomsakis and Tourassis et al. (2012) και οι Mutlu και Ozgormus (2012) ανέπτυξαν ευρετικές μεθόδους για το ίδιο πρόβλημα, ενώ
- ✓ Οι Rubinnovitz and Levitin (1995), Ponnambalam et al. (2000) και Sabuncuoglu et al. (2000) ανέπτυξαν γενετικούς αλγόριθμους για την επίλυση αυτού του προβλήματος εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης μεικτών μοντέλων.

Τα βήματα για την εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης μπορούν συνοπτικά να περιγράψουν ως εξής:

- a. Σχεδιασμός διαγράμματος προτεραιότητας
- b. Προσδιορισμός του χρονικού κύκλου: $c = \text{available time} / \text{desired output}$
- c. Κατανομή εργασιών ανά σταθμό εργασίας: $m = \Sigma \text{ task time} / \text{desired actual time}$ (όπου $m = \text{αριθμός σταθμών εργασίας}$)
- d. Υπολογισμός της απόδοσης της γραμμής: $E = t_{\text{sum}} / (m * c)$

Παρακάτω θα γίνει παρουσίαση των τριών πιο συχνά χρησιμοποιούμενων ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης γραμμής παραγωγής :

5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ (RANK POSITIONAL WEIGHT, RPW)

Η μέθοδος RPW αποτελεί τον πιο τελέσφορο τρόπο αντιστοίχισης στοιχείων εργασίας σε σταθμούς έτσι ώστε αρχικά να γίνει ρύθμιση του χρονικού κύκλου και στην συνέχεια υπολογισμός των εργασιών που απαιτούνται για την γραμμή παραγωγής ή αντίστροφα. Αυτό δεν μπορεί να γίνει με καμιά άλλη μέθοδο εξισορρόπησης γραμμής.

Τα βήματα της μεθόδου RPW είναι τα εξής (Ghutukade Santosh, 2013):

1. Δημιουργία διαγράμματος προτεραιότητας.
2. Υπολογισμός χρονικού κύκλου.
3. Δημιουργία πίνακα διαδρομής με βάση διαγράμματα προτεραιότητας.
4. Υπολογισμός του βάρους θέσης κάθε λειτουργίας, το οποίο υπολογίζεται με βάση τον συνολικό χρόνο της λειτουργίας και τις εργασίες που ακολουθούν.
5. Ταξινόμηση των λειτουργιών από εκείνη με το μεγαλύτερο προς εκείνη με το μικρότερο βάρος .
6. Υπολογισμός του ελάχιστου αριθμού σταθμών εργασίας.
7. Δημιουργία ενός διαγράμματος ροής και στη συνέχεια έναρξη λειτουργίας των σταθμών ξεκινώντας από εκείνον με το μεγαλύτερο προς το μικρότερο βάρος λειτουργίας.
8. Πραγματοποίηση δοκιμής με στόχο την επίτευξη της μέγιστης αποτελεσματικότητας.
9. Υπολογισμός της καθυστέρησης ισορροπίας.

5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΥ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ (LARGEST CANDIDATE RULE, LCR)

Πρόκειται για την πιο απλή ALB μέθοδο (εικόνα 16). Εδώ τα στοιχεία εργασίας κατανέμονται στους σταθμούς ανάλογα με το μέγεθος των T_e (δηλ. των χρόνων εργασίας των στοιχείων) και τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής (Pachghare V., Dalu R. S., 2014):

1. Καταχώρηση σε λίστα όλων των στοιχείων εργασίας, ακολουθώντας φθίνουσα σειρά και ξεκινώντας από το μεγαλύτερο T_e προς το μικρότερο,
2. Αντιστοίχιση των στοιχείων στον πρώτο σταθμό εργασίας. Για να γίνει αυτό, επιλέγεται το πρώτο εφικτό στοιχείο για τοποθέτηση στο σταθμό δηλ. το στοιχείο εκείνο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις προτεραιότητας και όπου το άθροισμα των T_e δεν υπερβαίνει το χρονικό κύκλο c .
3. Περάτωση της διαδικασίας αντιστοίχισης των στοιχείων εργασίας ανά σταθμό όταν δεν είναι δυνατόν να προστεθούν επιπλέον στοιχεία χωρίς να επιφέρουν υπέρβαση του c .
4. Επανάληψη του σταδίου 2 και 3 και για τους υπόλοιπους σταθμούς μέχρι να γίνει η αντιστοίχιση όλων των στοιχείων.



Fig. 4: Configuration Layout for Assembly Line Following LCR

Εικόνα 16: Configuration Layout for Assembly Line Following LCR

(Πηγή: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE>)

5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ KILBRIDGE ΚΑΙ WESTER (KILBRIDGE AND WESTER COLUMN, KWC ή K-W)

Πρόκειται για μια ευρετική ALB τεχνική που βασίζεται στην επιλογή στοιχείων εργασίας για αντιστοίχιση σε σταθμούς ανάλογα με τη θέση τους στο διάγραμμα προτεραιότητας.

Η KWC μέθοδος εισάγει το *διάγραμμα προτεραιότητας εργασιών* ως εργαλείο εξισορρόπησης και περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια (Priyal B.P., Vivek A. D., 2020):

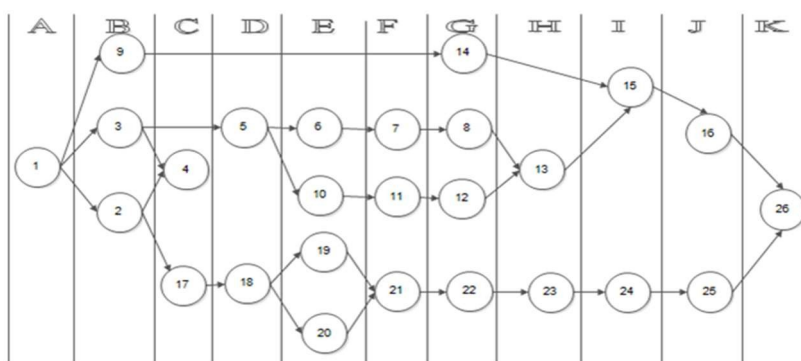
- I. Προετοιμασία διαγράμματος προτεραιότητας ή διάγραμμα ροής.
- II. Οργάνωση σε στήλες με βάση την θέση των εργασιών στο διάγραμμα ροής.
- III. Οργάνωση λίστας στηλών εργασίας ξεκινώντας από την πρώτη στήλη.
- IV. Ανάθεση εργασιών ανά σταθμό εργασίας με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπερβαίνει το *Tackt Time* δηλ. την αναγκαία διάρκεια συναρμολόγησης του προϊόντος ώστε να καλυφθεί η ζήτηση.

Τα βήματα που ακολουθούνται στην KWC μέθοδο είναι τα εξής(Pachghare V., Dalu R.,2014) :

1. Τα στοιχεία εργασίας ταξινομούνται σε κάθετες στήλες (εικόνα 17).
2. Εάν ένα στοιχείο εργασίας μπορεί να βρίσκεται σε περισσότερες από μία στήλες, ταξινομούνται όλες οι στήλες ανά στοιχείο ώστε να φανεί η δυνατότητα μεταφοράς του δεδομένου στοιχείου.

3. Τα στοιχεία εργασίας που είναι τοποθετημένα στο μπροστινό μέρος του διαγράμματος επιλέγονται πρώτα για εισαγωγή στη λύση. Αυτό ξεπερνά μια από τις δυσκολίες της μεθόδου του μεγαλύτερου υποψηφίου (LCR), σύμφωνα με την οποία στοιχεία που βρίσκονται στο τέλος του διαγράμματος προτεραιότητας μπορεί να είναι οι πρώτοι υποψήφιοι που θα ληφθούν υπόψη, απλώς και μόνο επειδή οι τιμές T_e είναι μεγάλες.

Σε αντίθεση με τον κανόνα της LCR μεθόδου, στην KWC μέθοδο δεν χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν οι απαιτήσεις προτεραιότητας, καθώς αυτό συμβαίνει αυτόματα με την ταξινόμηση των στοιχείων σύμφωνα με στήλες. Γενικά, η μέθοδος Kilbridge και Wester παρέχει μια ανώτερη λύση εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης σε σύγκριση με τον κανόνα του μεγαλύτερου υποψηφίου. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει πάντα.



Εικόνα 17: Ταξινόμηση στοιχείων εργασίας σε στήλες (KWM μέθοδος) (Πηγή: Pachghare V., Dalu R.,2014)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ SALBP

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πιο δημοφιλείς μεταξύ των ερευνητών παραλλαγές του Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) είναι δύο : η SALBP-1 η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των σταθμών παραγωγής k , για ένα συγκεκριμένο χρονικό κύκλο c και η SALBP-2 η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του χρονικού κύκλου c για έναν δεδομένο σταθμό παραγωγής k .

Οι περισσότεροι τύποι προβλημάτων εξισορρόπησης γραμμής παραγωγής περιλαμβάνουν τους παρακάτω περιορισμούς (Grzechca W., Foulds L.R., 2015):

- i. Αναφέρονται στην μαζική παραγωγή ενός ομοιογενούς προϊόντος.
- ii. Όλες οι εργασίες εκτελούνται με έναν προκαθορισμένο τρόπο.
- iii. Η γραμμή παραγωγής έχει στα διάφορα στάδια κοινό χρονικό κύκλο ανάλογα με την ζήτηση της αγοράς.
- iv. Η γραμμή θεωρείται ότι είναι σειριακή χωρίς γραμμές τροφοδοσίας ή άλλα παράλληλα στοιχεία.
- v. Κατά την εκτέλεση των εργασιών ισχύουν περιορισμοί προτεραιότητας.
- vi. Οι χρόνοι των εργασιών είναι ντετερμινιστικοί.
- vii. Δεν υπάρχουν επιπλέον περιορισμοί στις αναθέσεις των εργασιών εκτός από τους περιορισμούς προτεραιότητας.
- viii. Καμία εργασία δεν μπορεί να χωριστεί σε δύο ή περισσότερους σταθμούς.
- ix. Όλοι οι σταθμοί διαθέτουν τον ίδιο εξοπλισμό και είναι εξίσου στελεχωμένοι.

Οι περισσότερες από αυτές τις υποθέσεις με την πάροδο των ετών, είτε έχουν ατονήσει είτε έχουν τροποποιηθεί μέσα από διάφορες επεκτάσεις μοντέλων που εξετάζονται στη βιβλιογραφία. Στο κεφάλαιο αυτό και κατά την μελέτη των διαφόρων περιπτώσεων θα ισχύσουν οι εξής παραδοχές:

- a. Ο χρόνος για την εκτέλεση κάθε εργασίας είναι γνωστός.
- b. Οι σχέσεις προτεραιότητας μεταξύ των εργασιών είναι γνωστές.
- c. Μόνο αφού ολοκληρωθεί η εργασία του άμεσου προκατόχου, μπορεί να λειτουργήσει μία εργασία.
- d. Οι τύποι μηχανών είναι γνωστοί.
- e. Κάθε σταθμός εργασίας μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν ή δύο τύπους μηχανών.

- f. Ο συνολικός χρόνος εργασίας σε κάθε σταθμό εργασίας δεν μπορεί να υπερβαίνει τον χρόνο κύκλου.
- g. Το επίπεδο συντελεστή λειτουργίας ενός χειριστή είναι γνωστό. Το επίπεδο συντελεστή αποτελείται από τέσσερις πτυχές: ικανότητα, προσπάθεια, κατάσταση λειτουργίας και συνέπεια.
- h. Κάθε εργασία πρέπει να ανατεθεί σε ένα μόνο σταθμό

6.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ I (Bakar, A.N., Ramli, M.F., Zakaria, Z.M., Sin, T.C., & Masran, H., 2020)

6.1.1 Περιγραφή SALB - προβλήματος

Κατά την εφαρμογή του συστήματος της γραμμής συναρμολόγησης στις διάφορες εταιρείες, συχνά ενσκήπτουν δύο σημαντικά προβλήματα : το ένα αφορά στο σημείο συμφόρησης της γραμμής και το άλλο στον χρόνο αδράνειας του σταθμού εργασίας.

Η ηλεκτρική βιομηχανία αποτελεί ένα παράδειγμα SALB- προβλήματος. Ένα από τα προϊόντα της είναι ο PM 17-P, ο οποίος είναι ένας τύπος μετασχηματιστή ισχύος που κατασκευάζεται από μια συγκεκριμένη εταιρεία χρησιμοποιώντας το σύστημα γραμμής συναρμολόγησης. Στον πίνακα 1 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής:

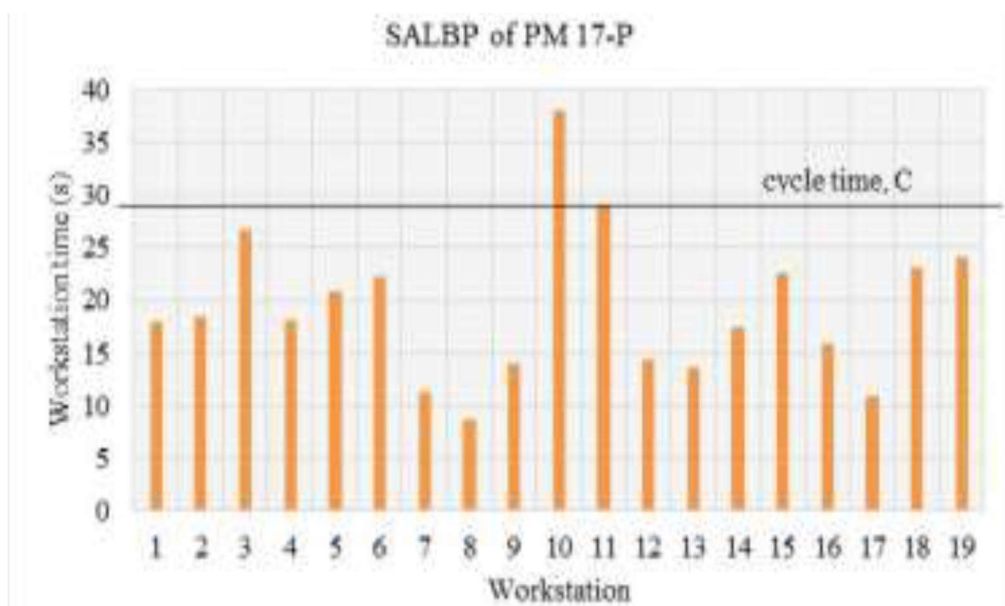
α/α	Παράμετροι	Αρχική Γραμμή Συναρμολόγησης
1	Αριθμός σταθμών εργασίας	19
2	Αριθμός εργασιών	27
3	Χρονικός κύκλος(min)	29
4	Απόδοση γραμμής (%)	67
5	Αριθμός χειριστών, w	19
6	Συνολικός χρόνος αδράνειας T_{id} (sec/unit)	173,72
7	Απώλεια εξισορρόπησης γραμμής (%)	49
8	Καθυστέρηση εξισορρόπησης (%)	33

Πίνακας 1 :Δεδομένα λειτουργίας γραμμής παραγωγής PM 17-P

Ο ρυθμός παραγωγής της συγκεκριμένης ηλεκτροβιομηχανίας θεωρείται χαμηλός καθώς υπάρχουν ανταγωνιστικές εταιρείες που παράγουν το ίδιο προϊόν και έχουν μεγαλύτερες επιδόσεις με λιγότερους σταθμούς εργασίας. Η μελέτη του προβλήματος έδειξε ότι οι κακές επιδόσεις και η χαμηλή αποτελεσματικότητα έχουν οδηγήσει σε χαμηλή παραγωγικότητα με υψηλότερο κόστος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας από τους σταθμούς εργασίας αντιμετωπίζει πρόβλημα συμφόρησης (βλ. σταθμός 10)

με αποτέλεσμα να υπάρχει καθυστέρηση στην ροή της εργασίας καθώς οι χειριστές θα πρέπει να περιμένουν για την περάτωση της εργασίας από τον προηγούμενο σταθμό (εικόνα 18).

Στόχος της παρέμβασης: μείωση του κόστους και αύξηση της παραγωγικότητας της γραμμής. Προκειμένου να επιτευχθεί εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης και άρα να λυθεί το SALBP, απαιτείται αφενός μείωση των σταθμών εργασίας ώστε να αποκατασταθεί το θέμα της συμφόρησης της γραμμής και αφετέρου ελαχιστοποίηση του χρόνου αδράνειας αλλά και εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας για κάθε σταθμό..



Εικόνα 18: Γράφημα της τρέχουσα κατάστασης της γραμμής παραγωγής του PM 17-P (Bakar, A.N., Ramli, M.F., Zakaria, Z.M., Sin, T.C., & Masran, H., 2020)

6.1.2 Μεθοδολογία

Για την επίλυση του συγκεκριμένου SALBP θα χρησιμοποιηθούν ευρετικές μέθοδοι καθώς είναι απλούστερες συγκριτικά με τις πολύπλοκες μαθηματικές μεθόδους αλλά και οδηγούν στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές. Τέτοιες μέθοδοι είναι οι: Largest Candidate Rule (LCR), Ranked Positional Weight (RPW), Shortest Processing Time (SPT) and Longest Processing Time (LPT) και θα γίνει χρήση τους προκειμένου να αποφασιστεί αν ο αριθμός των σταθμών εργασίας δύναται να μειωθεί ή όχι, αλλά και να ληφθεί η κατάλληλη απόφαση προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση της γραμμής παραγωγής. Στον Πίνακα 2 καταγράφονται αναλυτικά τα στοιχεία της γραμμής συναρμολόγησης πριν την εφαρμογή των μεθόδων εξισορρόπησης.

Workstation	Task	Task Description	Working Time (s)	Workstation Time (s)
1	2	Secondary winding (sec 1)	18.53	18.53
2	3	Secondary winding (sec 2)	26.72	26.72
3	4	Secondary winding (sec 3)	18.12	18.12
4	5	Secondary winding (sec 4)	20.91	20.91
5	6	Secondary outer wrap	22.26	22.26
6	1	Primary winding	17.95	26.59
	8	Secondary bobbin soldering	8.64	
	7	Primary bobbin soldering	11.28	
7	9	Bobbin assembly	5.50	25.33
	10	Side tape	8.55	
	11	E-core insert	18.05	
8	12	Hi-pot test	8.24	28.69
	13	Gluing	2.40	
9	14	I-core insert	9.27	29.10
	15	Welding	19.83	
	16	Copper foil insert	9.28	
10	17	Core shield insert	10.55	23.62
	18	Bracket insert	3.79	
11	19	Bracket clamping	13.71	13.71
12	20	Functional test	17.39	17.39
13	21	Varnish	22.50	22.50
	22	VMI	11.02	
14	23	Labelling	4.81	26.68
	24	Touch-up soldering	10.85	

Πίνακας 2: Working Time and Workstation Time for SALBP of PM 17-P

Στις μεθόδους LCR και RPW έχει γίνει εκτενής αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η *Shortest Processing Time (SPT)* μέθοδος αναφέρεται στην επιλογή του συντομότερου χρόνου εργασίας για την αντιστοίχιση της ανά σταθμό εργασίας. Ο συντομότερος χρόνος επεξεργασίας SPT, είναι ένας πολύ γνωστός κανόνας και χρησιμοποιείται στον τομέα του προγραμματισμού εργασιών των γραμμών παραγωγής που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του μέσου χρόνου ροής. Η βασική αρχή του είναι η ταξινόμηση των εργασιών ανάλογα με τη διάρκειά τους, ξεκινώντας από εκείνες με την μικρότερη διάρκεια (Conway R.W., Maxwell W.L., & Miller L. , 1967). Η SPT μέθοδος μειώνει το απόθεμα εργασίας κατά τη διαδικασία παραγωγής, τον μέσο χρόνο ολοκλήρωσης (ροής) εργασίας και τη μέση καθυστέρηση εργασίας. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη όταν ο στόχος είναι να μειωθεί η καθυστέρηση στην εργασία.

Η *Longest-processing-time-first (LPT)* μέθοδος αναφέρεται σε έναν ευρετικό αλγόριθμο για τον προγραμματισμό των εργασιών κάθε μια από τις οποίες έχει συγκεκριμένο χρόνο επεξεργασίας. Ο αλγόριθμος LPT ακολουθεί την εξής πρακτική:

- I. Ταξινόμηση των εργασιών με φθίνουσα σειρά του χρόνου επεξεργασίας τους, έτσι ώστε η εργασία με τον μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας να είναι πρώτη.
- II. Προγραμματισμός κάθε εργασίας ανά σταθμό ξεκινώντας από εκείνον στον οποίον το τρέχον φορτίο (βλ. συνολικός χρόνος επεξεργασίας προγραμματισμένων εργασιών) είναι το μικρότερο.

Το LPT μέθοδος αναλύθηκε για πρώτη φορά από τον Ronald Graham στη δεκαετία του 1960 στο πλαίσιο του προβλήματος προγραμματισμού πανομοιότυπων μηχανών (Graham, R. L, 1969). Αργότερα, εφαρμόστηκε σε πολλές άλλες παραλλαγές του προβλήματος.

6.1.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Από την εφαρμογή των τεσσάρων ευρετικών μεθόδων προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (πίνακας 3):

α/α	Παράμετροι	LCR	RPW	SPT	LPT
1	Αριθμός σταθμών εργασίας	16	16	17	16
2	Απόδοση γραμμής (%)	79	79	74,5	79
3	Αριθμός χειριστών, w	17	17	17	17
4	Συνολικός χρόνος αδράνειας, T_{id} (sec/unit)	96,72	96,72	125,72	96,72
5	Απώλεια εξισορρόπησης γραμμής (%)	21,1	21,1	25,5	21,1
6	Καθυστέρηση εξισορρόπησης, d (%)	21	21	25,5	21
7	Αλλαγές στην διάταξη	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι
8	Αλλαγή προδιαγραφών των εργασιών των χειριστών	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι

Πίνακας 3 Σύγκριση μεταξύ των ευρετικών μεθόδων

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία προέκυψαν δυο μοντέλα SALB του PM 17-P έτσι όπως απεικονίζονται στον πίνακα 4:

	Μοντέλο I	Μοντέλο II
Ευρετικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν	LCR, RPW, LPT	SPT
Αλλαγές στην διάταξη	Ναι (μεταφορά του μηχανήματος περιέλιξης από το σταθμό 1 στον σταθμό 6)	Όχι
Αλλαγή προδιαγραφών των εργασιών των χειριστών	Ναι (αφορά στους σταθμούς 6,7,8,9,10,14,15)	Ναι (αφορά στους σταθμούς 8,9,10,11,15)
Αριθμός σταθμών εργασίας	16	17
Αριθμός χειριστών, w	17	17

Πίνακας 4: SALB μοντέλα

Στον πίνακα 5 αποτυπώνονται αναλυτικά οι εργασίες του μοντέλου I όπου υπάρχουν αλλαγές της διάταξης, ενώ στον πίνακα 6 αποτυπώνονται οι εργασίες του μοντέλου II όπου δεν υπάρχει αλλαγή της διάταξης της γραμμής παραγωγής.

854

ISSN: 2502-4752

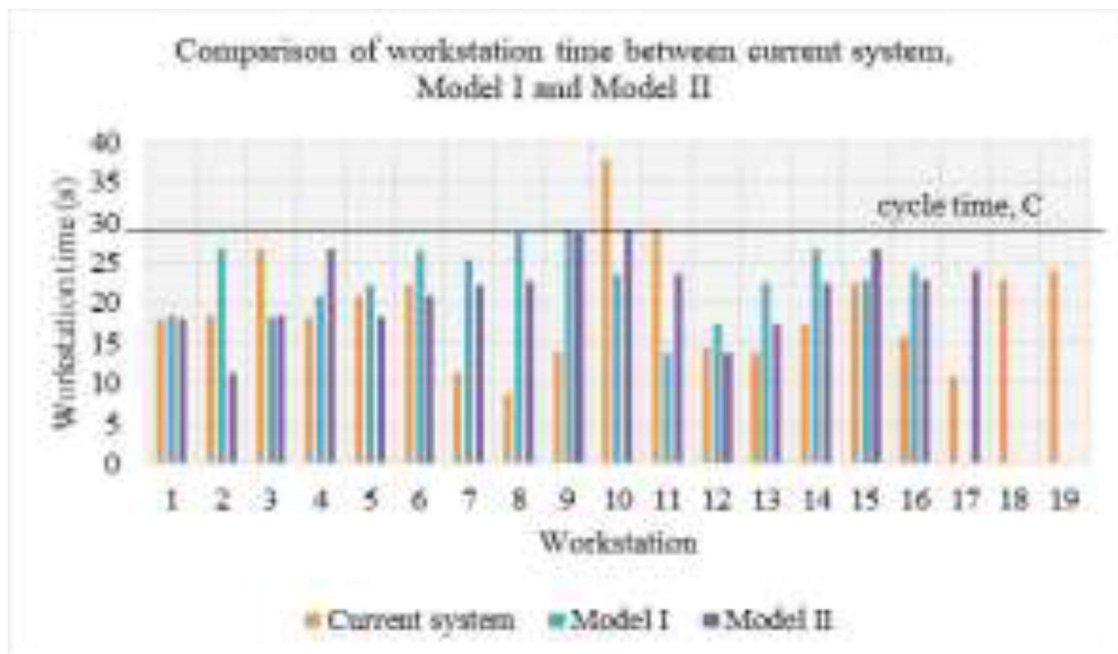
Workstation	Task	Task Description	Working Time (s)	Workstation Time (s)
1	2	Secondary winding (sec 1)	18.53	18.53
	3	Secondary winding (sec 2)	26.72	26.72
	4	Secondary winding (sec 3)	18.12	18.12
	5	Secondary winding (sec 4)	20.91	20.91
	6	Secondary outer wrap	22.26	22.26
6	1	Primary winding	17.95	26.59
	8	Secondary bobbin soldering	8.64	
	7	Primary bobbin soldering	11.28	
	9	Bobbin assembly	5.50	25.33
	10	Side tape	8.55	
	11	E-core insert	18.05	
	12	Hi-pot test	8.24	28.69
	13	Gluing	2.40	
	14	I-core insert	9.27	29.10
	15	Welding	19.83	
	16	Copper foil insert	9.28	23.62
10	17	Core shield insert	10.55	
	18	Bracket insert	3.79	
	19	Bracket clamping	13.71	13.71
	20	Functional test	17.39	17.39
	21	Varnish	22.50	22.50
	22	VMI	11.02	26.68
14	23	Labelling	4.81	
	24	Touch-up soldering	10.85	

Πίνακας 5: Task Specification for Layout Changes (Μοντέλο I)

Workstation	Task	Task Description	Working Time (s)	Workstation Time (s)
1	1	Primary winding	17.95	17.95
2	7	Primary bobbin soldering	11.28	11.28
3	2	Secondary winding (sec 1)	18.53	18.53
4	3	Secondary winding (sec 2)	26.72	26.72
5	4	Secondary winding (sec 3)	18.12	18.12
6	5	Secondary winding (sec 4)	20.91	20.91
7	6	Secondary outer wrap	22.26	22.26
8	8	Secondary bobbin soldering	8.64	22.69
	9	Bobbin assembly	5.50	
	10	Side tape	8.55	
9	11	E-core insert	18.05	28.69
	12	Hi-pot test	8.24	
	13	Gluing	2.40	
	14	I-core insert	9.27	
10	15	Welding	19.83	29.10
	16	Copper foil insert	9.28	
	17	Core shield insert	10.55	
11	18	Bracket insert	3.79	23.62
	19	Bracket clamping	13.71	
12	20	Functional test	17.39	17.39
13	21	Varnish	22.50	22.50
	22	VMI	11.02	
	23	Labelling	4.81	
14	24	Touch-up soldering	10.85	26.68

Πίνακας 6: Task Specification for Layout without Changes (Μοντέλο II)

Στην εικόνα 19, γίνεται αποτύπωση του χρόνου εργασίας ανά σταθμό για το μοντέλο I και το μοντέλο II σε σύγκριση με την τρέχουσα κατάσταση :



Εικόνα 19 :Σύγκριση χρόνου εργασίας ανά σταθμό και μοντέλο(Bakar, A.N., Ramli, M.F., Zakaria, Z.M., Sin, T.C., & Masran, H., 2020)

Θεωρητικά, οι ευρετικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στο SALBP πέτυχαν την εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης των 17-P PM μέσω της αποσυμφόρησης στο σταθμό 10 αλλά και της μείωσης του χρόνου αδράνειας μεταξύ των σταθμών εργασίας. Η τελική απόφαση, αναφορικά με το μοντέλο που θα εφαρμοστεί, θα ληφθεί από του μηχανικούς της εταιρείας.

6.2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ II (Pachghare, V. & Dalu, R. S. , 2014)

6.2.1. Ορισμός ALB-προβλήματος

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης αφορά στην γραμμή παραγωγής εκκοκκιστικών μηχανών από μια βιομηχανία μεσαίου μεγέθους. Οι παράμετροι λειτουργίας της γραμμής συναρμολόγησης παρουσιάζονται στον πίνακα 7:

α/α	Παράμετροι	Αρχική Γραμμή Συναρμολόγησης
1	Αριθμός σταθμών εργασίας	6
2	Απόδοση γραμμής (%)	68,5%
3	Χρονικός κύκλος(min)	12
4	Καθυστέρηση εξισορρόπησης	32
5	Ρυθμός παραγωγής ανά ημέρα	40 τεμάχια
6	Συνολικός χρόνος αδράνειας T_{id} (sec/unit)	23,07
7	Δείκτης ομαλότητας	11,58

Πίνακας 7: Δεδομένα λειτουργίας γραμμής παραγωγής εκκοκκιστικών μηχανών

Στόχος της παρέμβασης: Μείωση χρονικού κύκλου, για συγκεκριμένο αριθμό σταθμών (SALB - 2), αύξηση της απόδοσης και αύξηση της παραγωγικότητας. Αυτά κρίνονται απαραίτητα επειδή ο ρυθμός παραγωγής της μονάδας ανέρχεται στα 40 τεμάχια ημερησίως, αλλά δεν θεωρείται επαρκής καθώς δεν μπορεί να καλύψει τις εξαγωγικές απαιτήσεις της εταιρείας.

6.2.2 Μεθοδολογία

Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά σε μια σειριακή γραμμή συναρμολόγησης με ρυθμό, που έχει ντετερμινιστικούς χρόνους λειτουργίας. Για την επίλυση του δεδομένου προβλήματος θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω ευρετικές μέθοδοι : LCR, KWC, RPW. Ο στόχος είναι η μείωση του χρονικού κύκλου από τα 12 στα 10 min για έναν συγκεκριμένο αριθμό σταθμών εργασίας ($m=6$), επιτυγχάνοντας έτσι την αύξηση της παραγωγής. Στον πίνακα 8 και στον πίνακα 9 παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα λειτουργίας της γραμμής συναρμολόγησης πριν την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων:

Operation	Time	Workstation No	
1	3	689 sec (11.48min)	I
4	5	657sec (10.95min)	II
6	9	633 sec (10.55 min)	III
10	16	359 sec (5.98 min)	IV
17	19	265 sec (4.42min)	V
20	26	360 sec (6min)	VI

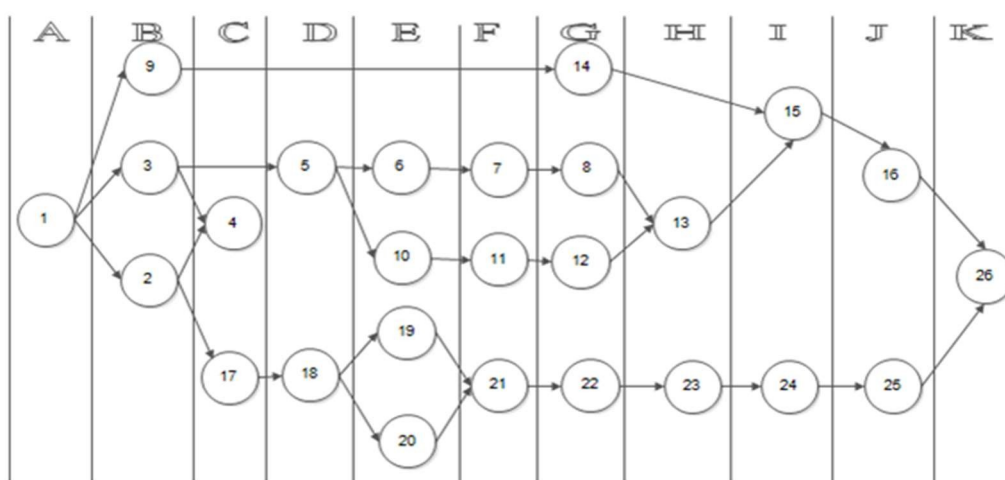
Πίνακας 8: Χρόνος των στοιχείων εργασίας και προτεραιότητα στην παρούσα γραμμή (συγκεντρωτικά)

Sr No	Time (sec) Tek	Precedence relation
1	209	0
2	211	1
3	269	1
4	574	1,2,3
5	83	1,2,3,4
6	290	1,3,4,5
7	226	3,4,5,6
8	43	3,4,5,6,7
9	74	1
10	28	5
11	81	10
12	58	10,11
13	7	13,6,7,8
14	40	1,3,6,7,8,9
15	69	1,3,6,7,8,9,13,14
16	76	1,15
17	5	1,2
18	241	1,17
19	19	18
20	45	18
21	36	18,19,20
22	120	18,20,21
23	7	22
24	34	22,23
25	8	24
26	110	16,25

Πίνακας 9: Χρόνοι εργασιών και προτεραιότητες αναλυτικά

Κατά την εφαρμογή της *Largest Candidate Rule (LCR)* μεθόδου οι εργασίες ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά με βάση τον χρόνο εκτέλεσης τους. Στην συνέχεια ξεκινώντας από την κορυφή της λίστας, επιλέγεται η πρώτη εργασία που ικανοποιεί τις απαιτήσεις προτεραιότητας. Έπειτα επιλέγεται η επόμενη εργασία με τέτοιο τρόπο ώστε το συνολικό άθροισμα των χρόνων των εργασιών του σταθμού να μην υπερβαίνει τον χρονικό κύκλο c . Όταν δεν θα μπορούν να προστεθούν επιπλέον εργασίες στο συγκεκριμένο σταθμό, καθώς θα υπάρχει κίνδυνος υπέρβασης του c , τότε προχωράμε στον επόμενο σταθμό. Κατά συνέπεια επαναλαμβάνοντας τα προηγούμενα βήματα, για όσο το δυνατόν περισσότερους σταθμούς, γίνεται ανάθεση όλων των εργασιών σύμφωνα με το διάγραμμα προτεραιότητας.

Κατά την εφαρμογή της *Kilbridge and Wester Column (KWC)* μεθόδου, η επιλογή των στοιχείων εργασίας ανά σταθμό γίνεται με βάση την θέση τους στο διάγραμμα προτεραιότητας. Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται σε κάθετες στήλες οι οποίες ονοματίζονται με τα γράμματα Α, Β, C κλπ (εικόνα 20). Έπειτα οι εργασίες ταξινομούνται σε λίστα με βάση την θέση τους στην στήλη, ξεκινώντας από το στοιχείο της στήλης Α, ενώ στην συνέχεια για κάθε στήλη η ταξινόμηση των εργασιών γίνεται αρχίζοντας από την εργασία με τον μεγαλύτερο χρόνο και καταλήγοντας σε εκείνη με τον μικρότερο. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους επιπροσθέτους σταθμούς μέχρις ότου ταξινομηθούν όλες οι εργασίες.



Εικόνα 20: Ταξινόμηση στοιχείων εργασιών σε στήλες με βάση την KWC μέθοδο (Pachghare, V. & Dalu, R. S., 2014)

Κατά την εφαρμογή της *Ranked Positional Weight (RPW)* μεθόδου, η ταξινόμηση των στοιχείων εργασίας γίνεται με βάση την τιμή *Tek* και τη θέση τους στο διάγραμμα προτεραιότητας. Το RPW κάθε εργασίας υπολογίζεται αθροίζοντας το *Tek* και τους άλλους χρόνους των στοιχείων που ακολουθούν το *Tek* στην αλυσίδα του διαγράμματος προτεραιότητας.

6.2.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Από την εφαρμογή των τριών ευρετικών μεθόδων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα που αναφέρονται στον πίνακα 10

α/α	Παράμετροι	LCR Method	KWC Method	RPW Method
1	Αριθμός σταθμών εργασίας	6	6	6
2	Απόδοση γραμμής (%)	82,33%	82,33%	82,33%
3	Χρονικός κύκλος(min)	10	10	10

4	Καθυστέρηση εξισορρόπησης	17,68	17,68	17,68
5	Ρυθμός παραγωγής ανά ημέρα	48τεμ.	48τεμ.	48τεμ.
6	Συνολικός χρόνος αδράνειας T _{id} (sec/unit)	10,6	10,6	10,87
7	Δείκτης ομαλότητας	7,11	7,10	7,7

Πίνακας 10 : Σύγκριση αποτελεσμάτων

Μετά την εφαρμογή μεθόδων εξισορρόπησης στην υπάρχουσα γραμμή συναρμολόγησης μειώθηκε ο χρονικός κύκλος από τα 12 λεπτά σε 10 λεπτά. Στη συνέχεια οι μέθοδοι βελτίωσαν την απόδοση γραμμής αυξάνοντάς την από 68,58 % σε 82,33 %, ενώ ο χρόνος αδράνειας μειώθηκε από 23,07 λεπτά σε 10,6 ή 10,87 λεπτά και ο ρυθμός παραγωγής αυξήθηκε από τις 40 στις 48 μονάδες. Έτσι οποιαδήποτε από τις τρεις παραπάνω οι μεθόδους είναι εφαρμόσιμη για την εξισορρόπηση της υπάρχουσας γραμμής συναρμολόγησης λόγω πολύ μικρής διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων.

6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΙΙΙ (Kumar, R.N., Mohan, R., & Gobinath, N., 2021)

6.3.1 Ορισμός ALB-προβλήματος

Ο όρος Hemming αναφέρεται στην τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την ένωση εσωτερικών και εξωτερικών πάνελ κλεισίματος (κουκούλες, πόρτες, πορτ -μπαγκαζ κλπ.). Πρόκειται για την διαδικασία κάμψης της φλάντζας του εξωτερικού πάνελ πάνω στο εσωτερικό. Η δεδομένη μελέτη περίπτωσης αφορά σε μια μονάδα Hemming όπου όλες οι λειτουργίες πραγματοποιούνται χειροκίνητα και για την οποία ισχύουν τα στοιχεία που αναφέρονται στον πίνακα 11:

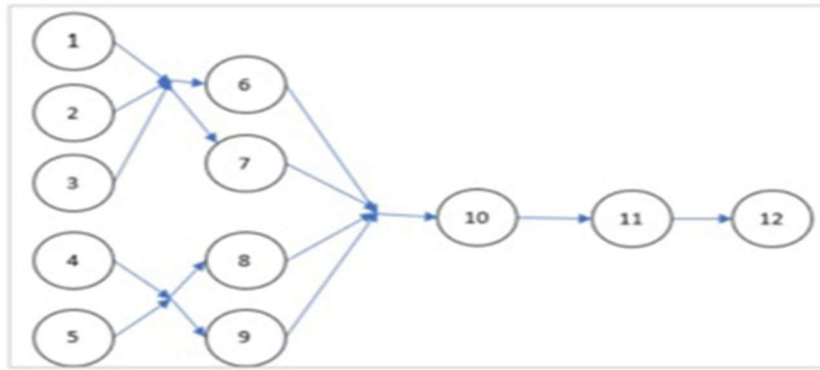
α/α	Παράμετροι	Αρχική Γραμμή Συναρμολόγησης
1	Αριθμός σταθμών εργασίας	12
2	Απόδοση γραμμής (%)	44
3	Takt time(min)	4

Πίνακας 11: Δεδομένα λειτουργίας μονάδας Hemming

Στόχος της παρέμβασης: η μείωση των σταθμών για σταθερό χρονικό κύκλο (SALBP -1), η εξισορρόπηση της γραμμής, η αύξηση της παραγωγικότητας και τελικά η αύξηση της απόδοσης της γραμμής, η οποία εκ των πραγμάτων δεν θεωρείται επαρκής.

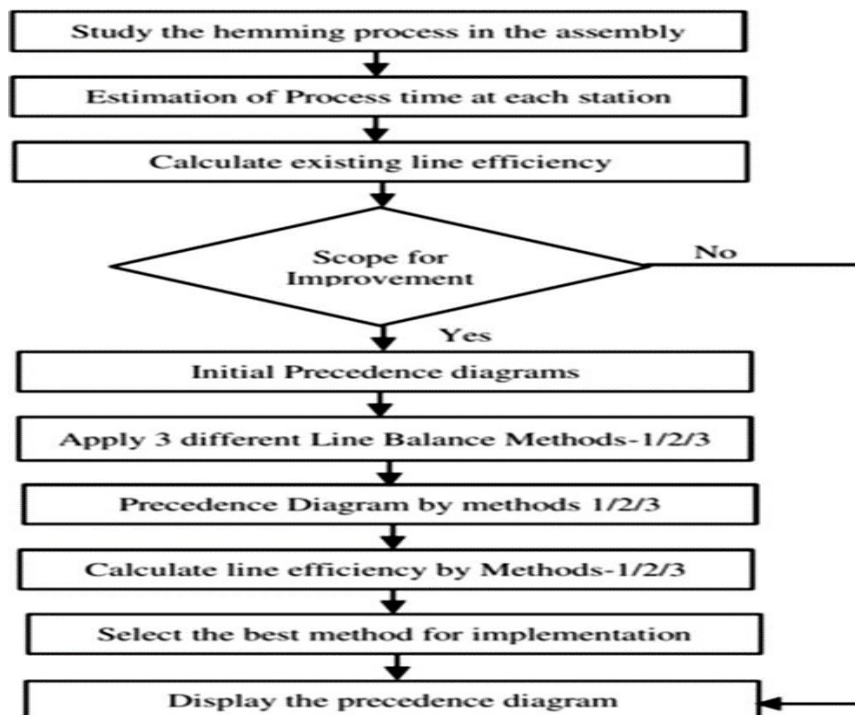
6.3.2 Μεθοδολογία

Για την εξισορρόπηση της παρούσας γραμμής συναρμολόγησης χρησιμοποιήθηκαν τα: KWC model, RPW model και το LCR model. Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται το διάγραμμα προτεραιότητας της αρχικής Hemming μονάδας (με τους 12 σταθμούς)



Εικόνα 21: Διάγραμμα προτεραιότητας της αρχικής Hemming μονάδας (Kumar, R.N., Mohan, R., & Gobinath, N., 2021)

Για τον υπολογισμό της απόδοσης έχει χρησιμοποιηθεί το γράφημα *Yamazumi* το οποίο είναι ένα ραβδογραμμα που χρησιμοποιείται για την γραφική αναπαράσταση διεργασιών για σκοπούς βελτιστοποίησης. Προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος εξισορρόπησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης *Arena Simulation*, ενώ η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε φαίνεται στην εικόνα 22:



Εικόνα 22: Μεθοδολογία εργασίας Case study III(Kumar, R.N., Mohan, R., & Gobinath, N., 2021)

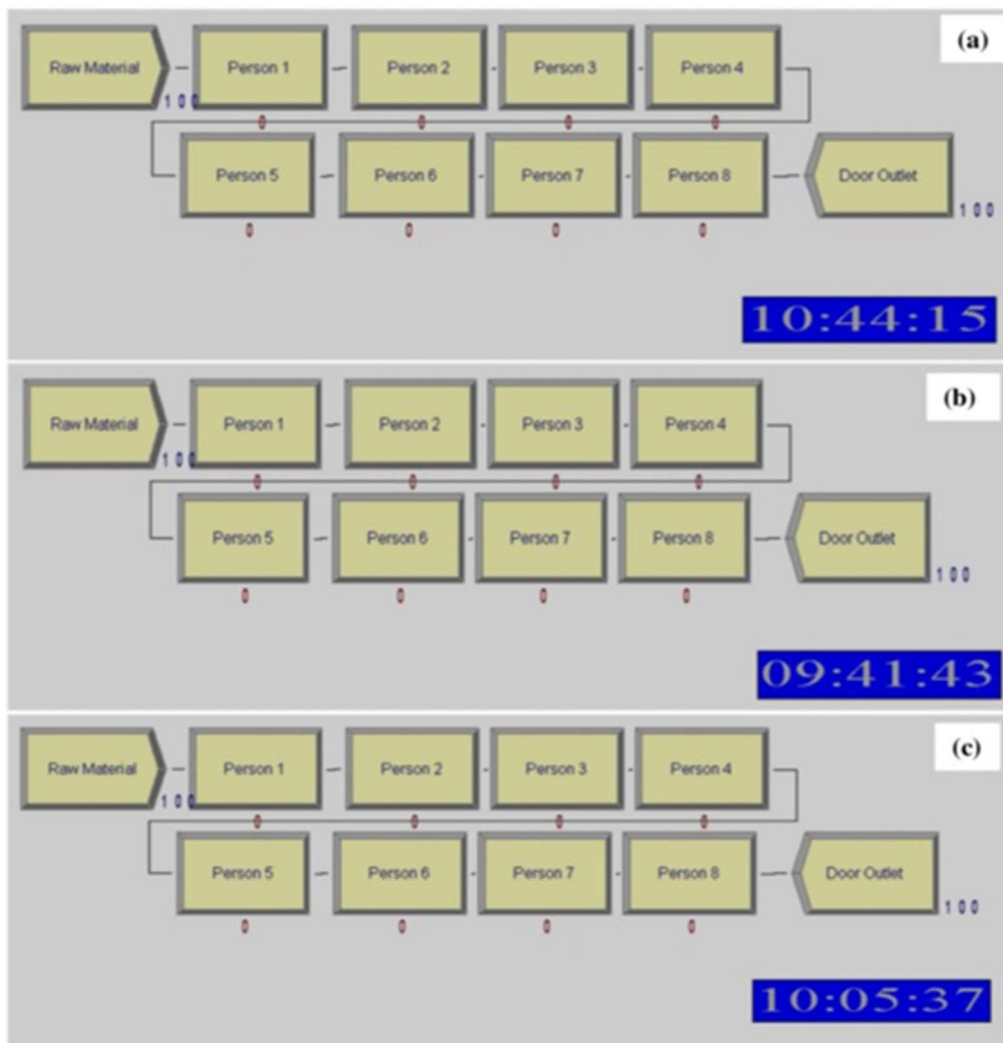
6.3.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Από την εφαρμογή των τριών ευρετικών μοντέλων εξισορρόπησης προέκυψαν τα ακόλουθα (πίνακας 12):

α/α	Παράμετροι	LCR Method	KWC Method	RPW Method
1	Αριθμός σταθμών εργασίας	8	8	8
2	Απόδοση γραμμής (%)	69	69	69
3	Takt time(min)	4	4	4
4	Προσομοίωση συνολικού χρόνου παραγωγής εξαρτήματος (min:sec)	10:05	10:44	9:41
5	Μείωση συνολικού χρόνου παραγωγής συγκριτικά με τον αρχικό (%)	51	47	53

Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων case study III από την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων

Στην εικόνα 23 παρουσιάζονται οι βελτιστοποιημένοι χρόνοι της γραμμής παραγωγής μετά την εφαρμογή των μεθόδων KWC, RPW και LCR .



Εικόνα 23: Βελτιστοποιημένοι χρόνοι για (a) KWC model (b) RPW model (c) LCR model της case study III(Kumar, R.N., Mohan, R., & Gobinath, N., 2021).

Στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης η εφαρμογή των τριών μοντέλων εξισορρόπησης είχε σαν αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της γραμμής συναρμολόγησης στο 69% από 44% ενώ οι σταθμοί εργασίας μειωθήκαν από τους 12

στους 8. Από τις τρεις μεθόδους, η Rank Positional Weight μέθοδος θεωρείται η καταλληλότερη για την βελτίωση της παραγωγικότητας της δεδομένης γραμμής λόγω της μεγαλύτερης μείωσης του συνολικού χρόνου παραγωγής(βλ. 53%) συγκριτικά με τον αρχικό.

6.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ IV (Sidar & Mishra, 2023)

6.4.1 Ορισμός ALB-προβλήματος

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης αφορά σε μια μικρής κλίμακας εταιρεία κατασκευής γυναικείων τσαντών και συγκεκριμένα στην Gagan Leather House Private Limited, που βρίσκεται στην πολιτεία Μαντιά Πρανές της Ινδίας. Στον πίνακα 13 και 14 αναφέρονται τα δεδομένα λειτουργίας την παρούσας γραμμής συναρμολόγησης

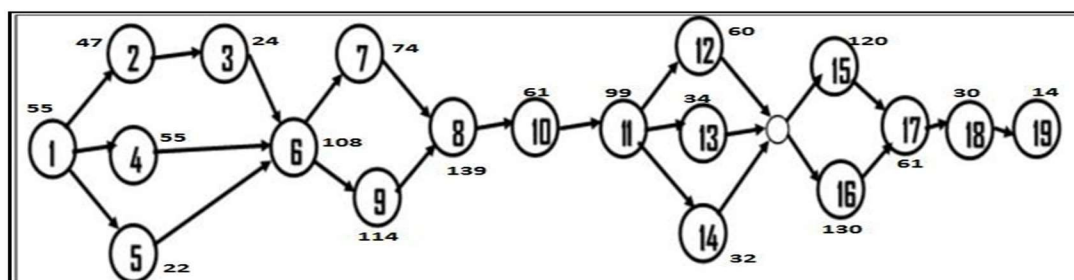
Task	Task Time (Sec)	Immediate Predecessor
1 (Cutting)	55	-
2 (Skewing)	47	1
3 (Glue Adding)	24	2
4 (Painting)	55	1
5 (Hot Marking)	22	1
6 (Swing)	10 8	3,4,5
7 (Painting)	74	6
8 (Drying)	13 9	7,9
9 (Zipper Setting)	11 4	6
10 (Manual Material Handling)	61	8
11 (Cloth Adding)	99	10
12 (CNC Swing)	60	11
13 (Hot Work)	34	11
14 (Logo Punch)	32	11
15 (Final Swing)	12 0	12,13,14
16 (Final Zipper Setting)	13 0	12,13,14
17 (Finishing)	61	15,16
18 (Quality Control)	30	17
19 (Packaging)	14	18

Πίνακας 13: Ανάλυση δεδομένων case study IV

α/α	Παράμετροι	Αρχική Γραμμή Συναρμολόγησης
1	Αριθμός σταθμών εργασίας (N)	19
2	Απόδοση γραμμής (%)	40,5
3	Χρονικός κύκλος(min)	165,89
4	Καθυστέρηση εξισορρόπησης%	59,4
5	Total Task Time	1279

Πίνακας 14 : Δεδομένα λειτουργίας case study IV

Στην εικόνα 24 αναφέρεται το διάγραμμα προτεραιότητας της υπάρχουσας γραμμής συναρμολόγησης:



Εικόνα 24: Διάγραμμα προτεραιότητας Case study IV (Sidar & Mishra, 2023)

Στόχος της παρέμβασης : η μείωση των σταθμών για σταθερό χρονικό κύκλο (SALBP -1), η εξισορρόπηση της γραμμής και τελικά η αύξηση της απόδοσης της γραμμής συναρμολόγησης, η οποία αντικειμενικά είναι χαμηλή.

6.4.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη περίπτωσης περιλάμβανε την ανάλυση των δεδομένων της τρέχουσας γραμμής συναρμολόγησης, την δημιουργία του διαγράμματος προτεραιότητας και τον υπολογισμό της τρέχουσας απόδοσης με βάση του παρακάτω τύπους:

$$\text{Cycle time} = \frac{\text{Available time}}{\text{Desired Output}}$$

$$\text{Number of workstations} = \frac{\sum \text{Task Time}}{\text{Desired Actual Time}}$$

$$\text{Line efficiency} = \frac{\text{Sum Of Task Times}}{\text{N umber Of Workstations} \times \text{Desired Cycle Time}}$$

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι LCR, KWC και οι RPW ευρετικές μέθοδοι προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση της γραμμής συναρμολόγησης ενώ στο τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων ανά μέθοδο.

6.4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

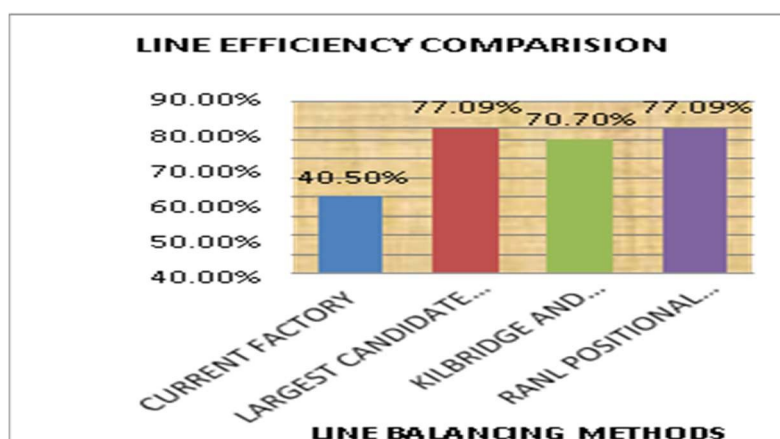
Από την εφαρμογή των τριών ευρετικών αλγορίθμων εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης προέκυψαν δεδομένα του πίνακα 15.

α/α	Παράμετροι	LCR Method	KWC Method	RPW Method
1	Αριθμός σταθμών εργασίας (N)	10	13	10
2	Απόδοση γραμμής (%)	77,09	70,7	77,09
3	Χρονικός κύκλος(min)	165,89	165,89	165,89
4	Καθυστερήση εξισορρόπησης%	22,9	29,2	22,9
5	Total Task Time	1279	1279	1279

Πίνακας 15: Σύγκριση αποτελεσμάτων case study IV από την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων

Κατά την σύγκριση της απόδοσης γραμμής συναρμολόγησης του τρέχοντος οργανισμού με την υπάρχουσα ρύθμιση, με την απόδοση που προκύπτει μετά την εξισορρόπηση της γραμμής με τις τρεις ευρετικές μεθόδους, δηλαδή τον κανόνα μεγαλύτερου υποψηφίου, τη μέθοδο στήλης Kilbridge και Wester και τη μέθοδο σταθμισμένης θέσης προέκυψε το διάγραμμα της εικόνας 25.

Από την μαθηματική ανάλυση προκύπτει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κανόνα μεγαλύτερου υποψηφίου (LCR) ή τη μέθοδο κατάταξης θέσης (RPW) για να αυξήσουμε την αποτελεσματικότητα της γραμμής παραγωγής γυναικείων τσαντών καθώς αυτές οι δυο μέθοδοι οδηγούν στην ίδια αύξηση της απόδοσης και συγκεκριμένα στην αύξηση από το 40,5% στο 77,09%, ενώ η μέθοδος στήλης Kilbridge και Wester (KWC) προκαλεί μικρότερη αύξηση της απόδοσης, ήτοι στο 70,70% οπότε και απορρίπτεται.



Εικόνα 25: Σύγκριση απόδοσης γραμμής συναρμολόγησης case study IV (Sidar & Mishra, 2023)

6.5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ V (Mishra & Soni, 2021)

6.5.1 Ορισμός ALB-προβλήματος

Σε αυτή την μελέτη περίπτωσης θα παρουσιαστεί η εφαρμογή των τριών ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης, δηλ. της LCR μεθόδου, της LCR μεθόδου καθώς και της RPW μεθόδου, στην μεταποιητική βιομηχανία ενδύματος και συγκεκριμένα στην FABTECH ENGINEERING, BHOPAL.

Στην συγκεκριμένη βιομηχανία παρατηρείται μικρή απόδοση της γραμμής συναρμολόγησης (68,58%), οπότε και επιχειρήθηκε αύξηση της παραγωγής μέσω μείωσης του χρονικού κύκλου για έναν συγκεκριμένο αριθμό σταθμών. Η πρώτη διαδικασία εξισορρόπησης γραμμής αφορούσε στη διάσπαση της μεταποίησης σε διαδοχικές λειτουργίες. Η υπάρχουσα ανάλυση λειτουργίας αναθεωρήθηκε για την καλύτερη κατανόηση και εφαρμογή της διαδοχικής σειράς των βημάτων επεξεργασίας του προϊόντος. Τα δεδομένα λειτουργίας την παρούσας γραμμής συναρμολόγησης παρουσιάζονται στον πίνακα 16:

<i>Operation</i>		<i>Time</i>	<i>Workstation No</i>
1	3	689 sec (11.48min)	I
4	5	657sec (10.95min)	II
6	9	633 sec (10.55 min)	III
10	16	359 sec (5.98 min)	IV
17	19	265 sec (4.42min)	V
20	26	360 sec (6min)	VI

Πίνακας 16: Ανάλυση δεδομένων case study V

Πριν από την εξισορρόπηση γραμμής, το υπάρχον σενάριο παραγωγής αναλύεται λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs)(πίνακας 17).

<i>α/α</i>	<i>Παράμετροι</i>	<i>Αρχική Γραμμή Συναρμολόγησης</i>
1	Αριθμός σταθμών εργασίας (N)	6
2	Απόδοση γραμμής (%)	68,58
3	Χρονικός κύκλος(min)	12
4	Χρόνος αδράνειας	23,07
5	Δείκτης ομαλότητας	11,58
6	Ρυθμός παραγωγής	40

Πίνακας 17: Δεδομένα λειτουργίας case study V

Στόχος της παρέμβασης: η μείωση του χρονικού κύκλου για συγκεκριμένο αριθμό σταθμών (SALPB -2), η εξισορρόπηση της γραμμής, η αύξηση της παραγωγικότητας και η αύξηση απόδοσης της γραμμής η οποία κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα.

6.5.2 Μεθοδολογία

Οι συγγραφείς ταξίδεψαν στην πόλη Μποπάλ της Ινδίας, προκειμένου να πραγματοποιήσουν παρατηρήσεις και να συλλέξουν δεδομένα από την εταιρεία της μελέτης περίπτωσης. Η συλλογή των εμπειρικών δεδομένων χωρίστηκε σε ποιοτικό και ποσοτικό μέρος.

Τα ποιοτικά δεδομένα συλλέχθηκαν κυρίως μέσω συνεντεύξεων με προσωπικό από διαφορετικά διοικητικά επίπεδα του οργανισμού, υπαλλήλων παραγωγής και εξέτασης ορισμένων προηγούμενων αρχείων του τμήματος βιομηχανικών μηχανικών και του τμήματος προγραμματισμού του κλάδου. Τα ποσοτικά δεδομένα συλλέχθηκαν κυρίως μέσω της άμεσης συμμετοχής στη γραμμή με παρατήρηση του επιπέδου παραγωγής. Τα δεδομένα επικεντρώθηκαν σε μια γραμμή παραγωγής, ειδικά στο τμήμα ραπτικής. Ο κύριος στόχος ήταν η συλλογή δεδομένων που αφορούσαν στον εντοπισμό των σημείων συμφόρησης της παραγωγής. Γενικά, τα δεδομένα συλλέχθηκαν μέσω πρωτογενών και δευτερογενών συστημάτων. Αρχικά τα στοιχεία εργασίας της συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής κατατάχθηκαν κατά φθίνουσα σειρά (πίνακας 18) με βάση την τιμή του χρόνου εργασίας T_e (work elements time) :

<i>Element</i>	<i>Tek(Sec) (Descending order)</i>	<i>Preceding by</i>
4	574	1,2,3
6	290	1,3,4,5
3	269	1
18	241	1,17
7	226	3,4,5,6
2	211	1
1	209	None
22	120	18,20,21
26	110	16,25
5	83	1,2,3,4
11	81	10
16	76	1,15
9	74	1
15	69	1,3,6,7,8,9,13,1
12	58	10,11
20	45	18
8	43	3,4,5,6,7
14	40	1,3,6,7,8,9
21	36	18,19,20
24	34	22,23
10	28	5
19	19	18
25	8	24
13	7	1,3,6,7,8
23	7	22
17	5	1,2

Πίνακας 18: Φθίνουσα σειρά στοιχείων εργασίας case study V

6.5.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Από την εφαρμογή της LCR μεθόδου προέκυψαν τα δεδομένα του πίνακα 19:

<i>Element</i>	<i>Tek sec</i>	<i>Preceding by</i>	<i>Station no</i>	<i>Station time sec</i>
1	209	None		
3	269	1	I	552
9	74	1		
2	211	1		
17	5	1,2		
18	241	1,17		557
20	45	18	II	(9.28min)
19	19	18		
21	36	18,19,20		
4	574	1,2,3	III	574 (9.56min)
22	120	18,20,21		
5	83	1,2,3,4		
6	290	1,3,4,5	IV	528
10	28	5		(8.8min)
23	7	22		
7	226	3,4,5,6		
11	81	10		
12	58	10,11		
8	43	3,4,5,6,7		
14	40	1,3,6,7,8,9	V	566
24	34	22,23		(9.43min)
25	25	24		
13	7	1,3,6,7,8		
15	69	1,3,6,7,8,9,1		
26	110	16,25	VI	186
16	76	1,15		(3.1min)

Πίνακας 19: Κατάταξη εργασιών με βάση το T_{ek} values για την μέθοδο LCR

Από την εφαρμογή της KWC μεθόδου προέκυψαν τα δεδομένα του πίνακα 20:

<i>Element</i>	<i>Tek</i>	<i>Column</i>	<i>Preceding by</i>	<i>Station</i>	<i>Station time</i>
1	209	A	None		
3	269	B	1	I	552 (9.2min)
9	74	B	1		
2	211	B	1		
17	5	C	1,2		
18	241	D	1,17	II	557 (9.28min)
20	45	E	18		
19	19	E	18		
21	36	F	18,19,20		
4	574	C	1,2,3	III	574 (9.56min)
5	83	D	1,2,3,4		
6	290	E	1,3,4,5		
10	28	E	5	IV	540 (9min)
11	81	F	10		
12	58	G	10,11		
7	226	F	3,4,5,6		
22	120	G	18,20,21		
8	43	G	3,4,5,6,7		
14	40	H	1,3,6,7,8,9	V	554 (9.23min)
13	7	H	1,3,6,7,8		
23	7	H	22		
15	69	I	1,3,6,7,8,9,13,14		
24	34	I	22,23		
25	8	J	24		
16	76	J	1,15	VI	186
26	110	k	16,25		(3.1min)

Πίνακας 20: Κατάταξη εργασιών με βάση το T_{ek} values για την μέθοδο KWM

Από την εφαρμογή της RPW μεθόδου προέκυψαν τα δεδομένα του πίνακα 21:

Element	Tek sec	Preceding by	Station No	Station Time
1	209	None	I	499(8.31min)
2	211	1		
9	74	1		
17	5	1,2		
3	269	1	II	574 (9.56min)
18	241	1,17		
20	45	18		
19	19	18		
4	574	1,2,3	III	574
5	83	1,2,3,4	IV	599 (9.98min)
6	290	1,3,4,5		
7	226	3,4,5,6		
10	28	5	V	565 (9.26min)
11	81	10		
8	43	3,4,5,6,7		
12	58	10,11		
21	36	18,19,20		
14	40	1,3,6,7,8,9		
22	120	18,20,21		
13	7	1,3,6,7,8		
15	69	1,3,6,7,8,9,13,14		
16	76	1,15		
23	7	22	VI	152 (2.53min)
24	34	22,23		
25	8	24		
26	110	16,25		

Πίνακας 21: Κατάταξη εργασιών με βάση το T_{ek} values για την μέθοδο RPW

Από την σύγκριση των τριών ευρετικών μεθόδων πρόκυψε ότι και οι τρεις είναι κατάλληλες για την εξισορρόπηση της γραμμής παραγωγής, έχοντας τα ίδια αποτελέσματα αναφορικά ως προς τους KPIs (πίνακας 22). Έτσι και οι τρεις μέθοδοι προκαλούν την ίδια αύξηση της απόδοσης της γραμμής από το 68,58% στο 82,33%.

α/α	Παράμετροι	LCR Method	KWC Method	RPW Method
1	Αριθμός σταθμών εργασίας (N)	6	6	6
2	Απόδοση γραμμής (%)	82,33	82,33	82,33
3	Χρονικός κύκλος(min)	10	10	10
4	Χρόνος αδράνειας	10,6	10,6	10,6
5	Δείκτης ομαλότητας	7,10	7,10	7,10
6	Ρυθμός παραγωγής	48	48	48

Πίνακας 22: Σύγκριση αποτελεσμάτων case study V από την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων

ΣΥΖΗΤΗΣΗ : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες, μελετητές αλλά και επαγγελματίες στον χώρο της βιομηχανίας, ασχολούνται με την ανάπτυξη μεθόδων για την επίλυση του ALBP. Το πρόβλημα της εξισορρόπησης μιας γραμμής παραγωγής είναι, στην ουσία, ένα πρόβλημα λήψης απόφασης για βέλτιστη κατανομή του φόρτου των εργασιών συναρμολόγησης μεταξύ των σταθμών εργασίας της γραμμής, με απώτερο σκοπό την επίτευξη των στρατηγικών στόχων της επιχείρησης αναφορικά με την δυναμικότητα της γραμμής και άρα το κόστος επένδυσης και λειτουργίας της.

Οι περισσότερες από αυτές τις υποθέσεις, με την πάροδο των ετών, έχουν είτε ατονήσει είτε τροποποιηθεί μέσα από διάφορες επεκτάσεις μοντέλων που έχουν μελετηθεί. Ανατρέχοντας στη σχετική βιβλιογραφία εντοπίζονται διαφορετικοί μέθοδοι οι οποίες στοχεύουν στην λύση του προβλήματος της εξισορρόπησης μιας γραμμής παραγωγής. Έτσι υπάρχουν οι κλασσικές μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού (exact optimization algorithms) όπως είναι η branch and bound μέθοδος (BnB) και η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού. Για ALBP μεγάλου μεγέθους - που περιλαμβάνουν δηλαδή μεγάλο πλήθος εργασιών συναρμολόγησης- χρησιμοποιούνται *ευρετικοί αλγόριθμοι (heuristics)* ενώ υπάρχουν και *οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms)* για την επίλυση πολυ-κριτηριακών ALBP με ασαφείς χρόνους επεξεργασίας των εργασιών.

Στο παρόν κεφάλαιο θα επιχειρηθεί η συγκριτική μελέτη των τριών ευρετικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες περιπτώσεων (LCR, RPW & KWC), με στόχο τον εντοπισμό των κοινών σημείων, των διαφορών τους και την ταξινόμηση αυτών με βάση τον τρόπο προσέγγισης και εξεύρεσης της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα της εξισορρόπησης των γραμμών συναρμολόγησης της .

Κατά την εφαρμογή ευρετικών μεθόδων στην επίλυση προβλημάτων εξισορρόπησης διαφορετικών γραμμών συναρμολόγησης, όπως στην παραγωγή μετασηματιστών ισχύος (case study I), στην παραγωγή εκκοκκιστικών μηχανών (case study II), στην διαδικασία Hemming της αυτοκινητοβιομηχανίας (case study III), στην παραγωγή

γυναικείων τσαντών (case study IV) και τέλος στην μεταποιητική βιομηχανία ενδυμάτων (case study V), παρατηρήθηκαν τα παρακάτω:

Η εκατοστιαία **απόδοση της γραμμής παραγωγής** (η οποία υπολογίζεται από τον τύπο: $[\text{άθροισμα χρόνων εργασιών} / \text{αριθμός σταθμών} * \text{χρονικό κύκλο}] * 100$) αυξήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μετά την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης (πίνακας 23). Συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση I, η αύξηση της απόδοσης αφορούσε σε **12 ποσοστιαίες μονάδες** μετά από την εφαρμογή των LCR, RPW, LPT μεθόδων και 5,5 ποσοστιαίες μονάδες μετά από την εφαρμογή της SPT μεθόδου.
- Στην περίπτωση II, η αύξηση της απόδοσης αφορούσε σε **13,8 ποσοστιαίες μονάδες** μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC και RPW μεθόδων.
- Στην περίπτωση III, η αύξηση της απόδοσης αφορούσε σε **25 ποσοστιαίες μονάδες** μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC και RPW μεθόδων.
- Στην περίπτωση IV, η αύξηση της απόδοσης αφορούσε σε **36,59 ποσοστιαίες μονάδες** μετά από την εφαρμογή των LCR, RPW μεθόδων και **30,2 ποσοστιαίες μονάδες** κατά την εφαρμογή της KWC μεθόδου.
- Στην περίπτωση V, η αύξηση της απόδοσης αφορούσε σε **13,75 ποσοστιαίες μονάδες** μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC και RPW μεθόδων.

Αποδοση γραμμής παραγωγής (%)	Case study I	Case study II	Case study III	Case study IV	Case study V
Τρέχουσα κατάσταση	67	68,5	44	40,5	68,58
LCR Method	79	82,3	69	77,09	82,33
KWC Method		82,3	69	70,7	82,33
RPW Method	79	82,3	69	77,09	82,33
SPT Method	74,5				
LPT Method	79				

Πίνακας 23: Συγκριτική απεικόνιση απόδοσης γραμμής ανά case study

Ο **αριθμός των σταθμών εργασίας** της γραμμής παραγωγής μειώθηκε ή έμεινε σταθερός μετά την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης (πίνακας 24). Συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση I, υπήρξε η **μείωση του αριθμού των σταθμών εργασίας** κατά 3 σταθμούς μετά από την εφαρμογή των LCR, RPW, LPT μεθόδων και κατά 2 σταθμούς μετά από την εφαρμογή της SPT μεθόδου.
- Στην περίπτωση II, ο **αριθμός των σταθμών εργασίας δεν μεταβλήθηκε** μετά την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων, αλλά διατηρήθηκε ίδιος με εκείνον της αρχικής κατάσταση (βλ. N=6).
- Στην περίπτωση III, υπήρξε **μείωση του αριθμού των σταθμών εργασίας** κατά 4 σταθμούς μετά την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων.
- Στην περίπτωση IV, υπήρξε **μείωση του αριθμού των σταθμών εργασίας** κατά 9 σταθμούς μετά την εφαρμογή των LCR, RPW μεθόδων και κατά 6 σταθμούς μετά την εφαρμογή της KWC μεθόδου.
- Στην περίπτωση V, ο αριθμός των σταθμών εργασίας δεν μεταβλήθηκε μετά την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων, αλλά διατηρήθηκε ίδιος με εκείνον της αρχικής κατάσταση (βλ. N=6).

Αριθμός σταθμών εργασίας (N)	Case study I	Case study II	Case study III	Case study IV	Case study V
Τρέχουσα κατάσταση	19	6	12	19	6
LCR Method	16	6	8	10	6
KWC Method		6	8	13	6
RPW Method	16	6	8	10	6
SPT Method	17				
LPT Method	16				

Πίνακας 24: Συγκριτική απεικόνιση αριθμού σταθμών εργασίας (N) ανά case study

Ο **χρονικός κύκλος** της γραμμής παραγωγής **μειώθηκε ή έμεινε σταθερός** μετά την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης (πίνακας 25). Συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση I, ο **χρονικός κύκλος της γραμμής έμεινε σταθερός** μετά από την εφαρμογή των LCR, RPW, LPT & SPT μεθόδων.
- Στην περίπτωση II, ο **χρονικός κύκλος της γραμμής μειώθηκε** κατά 2 χρονικές μονάδες μετά την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων.
- Στην περίπτωση III, ο **χρονικός κύκλος της γραμμής έμεινε σταθερός** μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων.

- Στην περίπτωση IV, ο **χρονικός κύκλος της γραμμής έμεινε σταθερός** μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων.
- Στην περίπτωση V, ο **χρονικός κύκλος της γραμμής μειώθηκε** κατά 2 χρονικές μονάδες μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC, RPW μεθόδων.

Χρονικός κύκλος (min)	Case study I	Case study II	Case study III	Case study IV	Case study V
Τρέχουσα κατάσταση	29	12	4	165,86	12
LCR Method	29	10	4	165,86	10
KWC Method		10	4	165,86	10
RPW Method	29	10	4	165,86	10
SPT Method	29				
LPT Method	29				

Πίνακας 25: Συγκριτική απεικόνιση χρονικού κύκλου (min) ανά case study

Η εκατοστιαία **καθυστέρηση της εξισορρόπησης** της γραμμής παραγωγής **μειώθηκε** μετά την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων εξισορρόπησης (πίνακας 26). Συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση I, η **μείωση της καθυστέρησης της εξισορρόπησης** της γραμμής αφορούσε σε 12 ποσοστιαίες μονάδες μετά από την εφαρμογή των LCR, RPW, LPT μεθόδων και 7,5 ποσοστιαίες μονάδες μετά από την εφαρμογή της SPT μεθόδου.
- Στην περίπτωση II, η **μείωση της καθυστέρησης της εξισορρόπησης** της αφορούσε σε 14,32 ποσοστιαίες μονάδες μετά από την εφαρμογή των LCR, KWC και RPW μεθόδων.
- Στην περίπτωση III, **δεν υπάρχουν αναφορές στην καθυστέρηση** της εξισορρόπησης της γραμμής παραγωγής.
- Στην περίπτωση IV, η **μείωση της καθυστέρησης της εξισορρόπησης** της γραμμής αφορούσε 36,5 ποσοστιαίες μονάδες μετά από την εφαρμογή των LCR, RPW, KWC μεθόδων.
- Στην περίπτωση V, **δεν υπάρχουν αναφορές στην καθυστέρηση** της εξισορρόπησης της γραμμής παραγωγής.

Καθυστέρηση εξισορρόπησης (%)	Case study I	Case study II	Case study III	Case study IV	Case study V
Τρέχουσα κατάσταση	33	32		59,4	
LCR Method	21	17,68		22,9	
KWC Method		17,68		22,9	
RPW Method	21	17,68		22,9	
SPT Method	25,5				
LPT Method	21				

Πίνακας 26: Συγκριτική απεικόνιση καθυστέρησης εξισορρόπησης (%) ανά case study

Συνολικά από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

- και οι τρεις κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είχαν το ίδιο αποτέλεσμα σε όλες τις μελέτες περιπτώσεων, εκτός από την 4η περίπτωση όπου η εφαρμογή της KWC μεθόδου οδήγησε σε μικρότερη αύξηση απόδοσης (βλ. 30,2%).
- στις μελέτες περιπτώσεων 1, 3 & 4 οι οποίες αφορούσαν σε SALBP -1 πρόβλημα, η μείωση των σταθμών κατά 3, 6 και 9 οδήγησε σε αύξηση της απόδοσης κατά 12%, 25% & 36,59% αντίστοιχα, ενώ στις περιπτώσεις 2 & 5 οι οποίες αφορούσαν σε SALBP -2 πρόβλημα, η μείωση του χρονικού κύκλου κατά δύο μονάδες οδήγησε σε αύξηση της απόδοσης κατά 13%.
- όσο περισσότερο μειώσουμε τον αριθμό σταθμών ή τον χρονικό κύκλο, τόσο περισσότερο αυξάνεται η απόδοση σύμφωνα με την εξίσωση της απόδοσης.
- σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες γίνεται αναφορά, υπήρξε μείωση της καθυστέρησης της εξισορρόπησης της γραμμής μετά την εφαρμογή των ευρετικών μεθόδων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύνηθες πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες μαζικής παραγωγής αφορά στο SALBP ή αλλιώς απλό πρόβλημα εξισορρόπησης γραμμής συναρμολόγησης, το οποίο έχει άμεση επίπτωση στην αποδοτικότητα της παραγωγής, στην ικανοποίηση των ζήτησης των πελατών και στα κέρδη της εταιρείας.

Δυο είναι τα κύρια ζητήματα που αφορούν στο SALBP : το πρόβλημα της συμφόρησης (bottleneck problem) και το κενό αδράνειας (idle gap) μεταξύ των σταθμών εργασίας.

Από τη βιβλιογραφία, γίνεται κατανοητό ότι πολλές τεχνικές εξισορρόπησης της γραμμής συναρμολόγησης έχουν χρησιμοποιηθεί και η συμβολή τους στην επίτευξη του στόχου ήταν ικανοποιητική. Η εφαρμογή τους σε μια γραμμή παραγωγής δύναται να οδηγήσουν ή όχι σε αλλαγές στη διάταξη ή/και στις προδιαγραφές των εργασιών των χειριστών.

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή τριών, κυρίως, ευρετικών μεθόδων στην εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης σε πέντε διαφορετικές περιπτώσεις.

Σε όλες τις περιπτώσεις επιτεύχθηκε η εξισορρόπηση της γραμμής με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση.

Το πρόβλημα της συμφόρησης επιλύθηκε με τη μείωση του αριθμού των σταθμών εργασίας και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του χρόνου αδράνειας για κάθε σταθμό.

Η επιλογή για μείωση σταθμών ή χρονικού κύκλου λαμβάνει υπ' όψιν τις πρωταρχικές ανάγκες της κάθε εταιρείας, καθώς και εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες, όπου είναι διαφορετικοί σε κάθε περίπτωση.

Ο ρυθμός παραγωγής (P) ορίζεται από τον τύπο $T=1/P$, όπου T = χρονικός κύκλος. Όσο μειώνεται ο χρονικός κύκλος τόσο αυξάνεται η παραγωγικότητα. Στις περιπτώσεις 2 και 5 η αύξηση της παραγωγικότητας είναι ένας από τους αρχικούς στόχους, επομένως είναι λογικό να επιλέγεται να λυθεί ως πρόβλημα τύπου 2 (μείωση χρονικού κύκλου).

Οι μέθοδοι LCR και RPW εμφανίζουν την ίδια αποτελεσματικότητα στην απόδοση γραμμής, ανεξαρτήτως τον τρόπο που θα αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα (SALBP-1 ή SALBP – 2), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η KWC μέθοδος έχει μικρότερη δυναμική

στα προβλήματα εξισορρόπησης, όπως για παράδειγμα στην μείωση των σταθμών στην μελέτη περίπτωσης 4

Όσον αφορά την μείωση της καθυστέρησης εξισορρόπησης σε ποσοστιαίες μονάδες, είναι και αυτή ανεξάρτητη των μεθόδων που θα χρησιμοποιήσουμε, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα, αλλά εξαρτάται από την αύξηση της απόδοσης γραμμής.

Οποιαδήποτε μέθοδος από τρεις που αναλυθήκαν (LCR, KWC, RPW) μπορεί να εφαρμοστεί για την εξισορρόπηση μιας γραμμής συναρμολόγησης και να επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω των πολύ μικρών διαφορών που παρουσιάζουν.

Στο μέλλον προτείνεται η διεξαγωγή έρευνας η οποία θα περιλαμβάνει προσομοίωση της εφαρμογής των μοντέλων αυτών με την αλλαγή της διάταξης και των προδιαγραφών των εργασιών ανά σταθμό εργασίας, ώστε να μελετηθεί η επίπτωση στην περαιτέρω εξισορρόπηση της γραμμής συναρμολόγησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bakar, A.N., Ramli, M.F., Zakaria, Z.M., Sin, T.C., & Masran, H. (2020, FEBRUARY). Solving assembly line balancing problem using heuristic: A case study of power transformer in electrical industry. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2, σ. 850~857. doi: 10.11591/ijeecs.v17.i2.pp850-857
- Baybars, I. (1986a). An efficient heuristic method for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, σσ. 24, 149-166.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 694-715.
- Belkharroubi L., Yahyaoui K. (2022). Solving the mixed-model assembly line balancing problem type-I using a Hybrid Reactive GRASP. *Production & Manufacturing Research*, σσ. Volume 10, Pages 108-131.
- Boysen, N. (2021). Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? *European Journal of Operational Research*, pp. 797-814.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). Assembly line balancing: Which model to use when? . *International Journal of Production Economics*, Volume 111, Issue 2, , pp. 509-528.
- Boysen, N., Schuzle, P., Scholl, A. . (2022). Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? . *European Journal of Operational Research*, σσ. Volume 301, Issue 3, 797-814.
- Bukchin J., Dar-El E., Rubinovitz J. (2002). Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers & Industrial Engineering*, σσ. Volume 41, Issue 4, Pages 405-421.
- Buzacott, J.A. and Shanthikumar, J.G. (1993). Stochastic models of manufacturing systems. *Prentice-Hall, Englrwood Cliffs, NJ*.
- Conway R.W., Maxwell W.L., & Miller L. . (1967). *Theory of Scheduling* (1st ed εκδ.). Addison-Wesley Publishing Company.
- Dillon, P. (2019). Shigeo Shingo: A Study of the Toyota Production System. *Factory Physics: Third Edition*.
- Domschke W., Krispin G. (1997). Location and layout planning. *Operations-Research-Spektrum*, σσ. pages 181–194.
- Erdal E., Subhash C. S. (1998). A survey of the assembly line balancing. *Production Planning & Control*, σσ. 9:5, 414-434.

- Faccioa M., Gamberi M., Bortolini M. (2016). Hierarchical approach for paced mixed-model assembly line balancing and sequencing with jolly operators. *International Journal of Production Research*, σσ. Vol. 54, No. 3, 761–777.
- Ghutukade Santosh, S. s. (2013). USE OF RANKED POSITION WEIGHTED METHOD FOR ASSEMBLY LINE BALANCING . *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*.
- Graham, R. L. (1969, March). Bounds on Multiprocessing Timing Anomalies. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17(2), σσ. 416-429. doi:10.1137/0117039.
- Grzechca W., Foulds L.R. (2015). The Assembly Line Balancing Problem with Task Splitting: A Case Study. *IFAC-PAPERS ON LINE*, σσ. Volume 48, Issue 3, Pages 2002-2008.
- Jusop M, Rashid M F F Ab. (2015). A review on simple assembly line balancing type-e. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 100 (2015) 012005*.
- Kumar, R.N., Mohan, R., & Gobinath, N. (2021). Improvement in production line efficiency of hemming unit using line balancing techniques. *Materials Today: Proceedings*(46), σσ. 1459-1463. doi:10.1016/j.matpr.2021.03.020
- Make, M., Rashid, M., Razali, M., & Perumal, M. (2017). Assembly line balancing using Heuristic Approaches in Manufacturing Industry. *Journal o Mechanical Engineering*, 171-185.
- Masood, F. (2017). Assembly line balancing problem: A comparative evaluation of heuristics and a computational assessment of objectives . *Journal of Modelling in management*, σσ. 455-474.
- Meng K., Tang Q., Cheng L., Zhang Z. (2022). Mixed-model assembly line balancing problem considering preventive maintenance scenarios: MILP model and cooperative co-evolutionary algorithm. *Applied Soft Computing*, σσ. Volume 127, 109341.
- Miltenburg, J. . (2001). U-shaped production lines: A review of theory and practice. . *International Journal of Production Economics 70 (3)*, σσ. pp. 201–214.
- Mishra, S., & Soni, H. M. (2021, Sept-Oct). Implementation of Heuristic Methods in Manufacturing Industry. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, 7(5).
- Moodie, C.L. (1965). A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *The Journal of Industrial Engineering 1*, σσ. 16(6), 23–29.
- Nils Boysen, P. S. (2021). Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? *European Journal of Operational Research*, σσ. 797-814.

- Pachghare, V., & Dalu, R. S. . (2014, MAY). Assembly Line Balancing Methods—A Case Study. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(5), σσ. 1901-1905. Ανάκτηση από <https://www.ijsr.net/>
- Panneerselvam R. (2005). Production and operations management, 2nd edn. *PHI Learning, New Delhi*.
- Priyal B.P., Vivek A. D. (2020, May). Application of Ranked Position Weighted and Kilbridge and Wester Method at Radiator, Assembly Plant - A Case Study. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, σσ. Volume 8 Issue V, p.p. 2717-2724.
- Rafael M., Gerhard R. (2022). *Exact and Heuristic Methods in Combinatorial Optimization*. Applied Mathematical Sciences book series (AMS, volume 175), 2nd Edition, pp 27–57.
- Rekiek, B., Delchambre, A. (2006). Assembly Line Design: The Balancing of Mixed Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms. *Assembly Automation*, σ. Volume 26 Issue 3.
- Royston, A. . (2016). *Henry Ford and the Assembly Line*. New York: The Rosen Publishing Group, 29 East 21st Street.
- Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing assembly lines*. Heidelberg: Physica, second ed.
- Scholl, A. and Klein, R. . (1997). SALOME: A bidirectional branch-and-bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing* 9 (4), σσ. pp. 319–334.
- Scholl, A., Becker, C.,. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operations Research* 168,, σσ. 666-693.
- Sholl, A. (1998). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines* (Second Revised Edition εκδ.). Physica - verlag.
- Shtub, A., Dar-El, E.M. . (1989). A methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research*, σσ. 175–186.
- Sidar, T. K., & Mishra, S. K. (2023, February). SMALL SCALE INDUSTRY FOR IMPROVEMENT OF PRODUCTION RATE WITH LINE BALANCING- A CASE STUDY. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PROGRESSIVE RESEARCH IN ENGINEERING MANAGEMENT AND SCIENCE (IJPREMS)*, 03(02), σσ. 168-177.
- Sivasankaran, P., & Shahabudeen, P. (2014). Literature review of assembly line balancing problems. *Int J Adv Manuf Technol*, 73, σσ. 1665-1694. doi:10.1007/s00170-014-5944-y
- Sivasankaran, P., & Shahabudeen, P. (2017). Comparison of Single Model and Multi-Model Assembly line Balancing Solutions. 13, 1829-1850.

- Sotskov, Y.N. (2023). Assembly and Production Line Designing, Balancing and Scheduling with Inaccurate Data: A Survey and Perspectives. *Algorithms*, σσ. 16, 100.
- Supriyono,Suryanto D.,Hendra F.,Efenti R. (2020). LINE BALANCING ANALYSIS BY USED RANK POSITIONAL WEIGHT (RPW) (CASE STUDY: PART BODY S11038Z PROCESS). *SINTEK JURNAL, L, Vol. 14 No. 2,,* σσ. p.p.123-129.
- Vilà M.,Pereira J. (2013). An enumeration procedure for the assembly line balancing problem based on branching by non-decreasing idle time. *European Journal of Operational Research*, σσ. Volume 229, Issue 1, Pages 106-113.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized Assembly line balancing . *European Journal od Operational Research* 168, 694-715.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing:Which model to use when? *International Journal of Production Economics* , 111(2), 509-528.
- Κώστογλου, Β. (2015). *Επιχειρησιακή Έρευνα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

- <https://slideplayer.gr/slide/11424370/>(πρόσβαση 20/10/2022)
- <https://www.drive.gr/posts/classic> (πρόσβαση 21/10/2022)
- https://www.researchgate.net/figure/Precedence-graph-representation-of-tasks-in-an-assembly-line_fig2_264709866(πρόσβαση 21/10/2022)
- https://www.researchgate.net/figure/Single-model-line-mixed-model-line-and-multimodel-line_fig2_282538544 (πρόσβαση 22/10/2022)
- <http://www.industrialnews.in/articles/3178-assembly-line-balancing-problem-solution-techniques.html>(πρόσβαση 10/12/2022)
- https://www.researchgate.net/figure/Different-assembly-line-shapes_fig1_360063425(πρόσβαση 15/3/2023)
- https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-paced-mixed-model-synchronous-assembly-line-with-a-jolly-operator_fig1_281336326(πρόσβαση 15/3/2023)
- <https://www.researchgate.net/figure/A-serial-assembly-line-with-four-workstations>(πρόσβαση 2/5/2023)
- <https://www.researchgate.net/figure/U-shaped-assembly-line-stations-may-have-cross-overs>(πρόσβαση 2/5/2023)
- <https://www.researchgate.net/figure/Two-sided-assembly-line> (πρόσβαση 13/6/2023)

- <https://www.researchgate.net/figure/Typical-assembly-line-with-main-line-and-feeder-lines> (πρόσβαση 14/6/2023)
- <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.11.027> (πρόσβαση 14/6/2023)
- <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE> (πρόσβαση 16/6/2023)