

Αναδιαμορφώσιμα Συστήματα
Παραγωγής (RMS): Ανασκόπηση
του Ερευνητικού Πεδίου και των
Εφαρμογών τους

Τομέας: Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας

Εποπτεία: Τασιόπουλος Η., Καθηγητής ΕΜΠ

Επιτήρηση: Γκαγιαλής Σ., Ε.Δι.Π. ΕΜΠ



Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκούπας Απόστολος

Περίληψη

Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον οι εταιρείες παραγωγής καλούνται να αντιμετωπίσουν ριζικές αλλαγές που τις ωθούν να βελτιώσουν τις διαδικασίες παραγωγής, προγραμματισμού και διαχείρισης. Τη νέα αυτή κατάσταση εισήγαγε η παγκοσμιοποίηση που ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '90. Οι αλλαγές που έφερε περιλαμβάνουν την αύξηση της συχνότητας εισαγωγής νέων προϊόντων, αλλαγές στα εξαρτήματα των υφιστάμενων προϊόντων, μεγάλες διακυμάνσεις στη ζήτηση και στο μείγμα προϊόντων και αλλαγές στους κυβερνητικούς κανονισμούς, σε σχέση με την ασφάλεια και το περιβάλλον. Το Αναδιαμορφώσιμο Σύστημα Παραγωγής (RMS) μπορεί να ανταποκριθεί σε αυτές τις προκλήσεις μέσω της δυνατότητάς του να προσαρμόζει την παραγωγικότητα και τη λειτουργικότητά του γρήγορα και αποτελεσματικά, για αυτούς τους λόγους έχει χαρακτηριστεί ευρέως ως το σύστημα παραγωγής του μέλλοντος. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του RMS αποτελεί σημαντική πρόκληση σε σύγκριση με το σχεδιασμό των Συμβατικών Συστημάτων Παραγωγής, καθώς πρέπει να σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να μπορεί να υποστηρίξει την παραγωγή πολλαπλών προϊόντων και παραλλαγών τους στη διάρκεια της ζωής του. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη διερεύνηση του ερευνητικού υποβάθρου του RMS, στην ένταξή του σε ένα πλαίσιο και στην υπόδειξη κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα. Βάσει μιας δομημένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιείται, επιτυγχάνεται η ανάλυση των προτεινόμενων μεθοδολογιών σχεδιασμού, προγραμματισμού και διαχείρισης της παραγωγής, όπως επίσης των τεχνολογιών και των βασικών αρχών που πρέπει να διαθέτουν. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι δεν υπάρχει συμφωνία σχετικά με τη δομή της διαδικασίας σχεδιασμού, η οποία οφείλεται στην έλλειψη γνώσης ως προς το τι είναι το RMS και ποια τα βασικά χαρακτηριστικά για το σχεδιασμό του. Μελλοντικά η έρευνα αυτή μπορεί να αποτελέσει έναν οδηγό για την κατανόηση στοιχειωδών εννοιών όσον αφορά τον ορισμό του RMS, τα βασικά χαρακτηριστικά του και τον τρόπο που μπορεί να ενσωματωθεί η αναδιαμορφωσιμότητα σε ένα σύστημα παραγωγής, βοηθώντας έτσι την μετάβαση στα Αναδιαμορφώσιμα Συστήματα Παραγωγής.

Abstract

In today's industrial environment, manufacturing companies are faced with radical changes that drive them to improve their production, planning, and management processes. This new situation was introduced by globalisation that started in the mid-1990s. The changes introduced include an increase in the frequency of introduction of new products, changes in the components of existing products, large fluctuations in demand and product mix, and changes in government regulations concerning safety and the environment. The Reconfigurable Manufacturing System (RMS) meets these challenges through its ability to adapt its productivity and functionality quickly and efficiently, it is for these reasons that it has been widely described as the manufacturing system of the future. However, the design of RMS poses a significant challenge compared to the design of Conventional Manufacturing Systems, as it must be designed in such a way that can support the production of multiple products and their variants over its lifetime. This thesis presents a structured and updated review of the literature of RMS, highlighting the application areas as well as the key methodologies and tools. The review further provides a schematic of RMS research, identifying 4 emerging and promising research streams. The results of the research indicate that there is no agreement on the structure of the design process, which is due to the lack of knowledge as to what RMS is and what are the key features of its design. Henceforth, this research can provide a guide for understanding elementary concepts regarding the definition of RMS, its key characteristics, and how reconfigurability can be integrated in a manufacturing system, thus aiding the transition to Reconfigurable Manufacturing Systems.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	10
Κατάλογος Σχημάτων	11
Κατάλογος Εικόνων	12
1. Εισαγωγή	13
2. Συστήματα Παραγωγής	16
2.1 Ορισμός Συμβατικών Συστημάτων Παραγωγής	16
2.2 Η Ανάγκη για Ανταποκρισιμότητα.....	16
2.3 Αναδιαμορφώσιμα Συστήματα Παραγωγής.....	17
2.4 Σύγκριση Αναδιαμορφώσιμων & Συμβατικών Συστημάτων Παραγωγής ...	18
3. Λειτουργία των Αναδιαμορφώσιμων Συστημάτων Παραγωγής	20
3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά του RMS	20
3.2 Λειτουργικά Επίπεδα ενός RMS	20
3.2.1 Αναδιαμορφώσιμη Εργαλειομηχανή (RMT)	21
3.2.2 Αναδιαμορφώσιμη Μηχανή Επιθεώρησης (RIM).....	21
3.2.3 Αναδιαμορφώσιμοι Ταινιόδρομοι (RMHS)	22
3.2.4 Αναδιαμορφώσιμος Προγραμματισμός Διεργασιών.....	24
3.2.5 Προσαρμόσιμος Προγραμματισμός και Έλεγχος Παραγωγής.....	24
3.3 Σχεδιασμός Συστήματος Αναδιαμορφώσιμου Συστήματος Παραγωγής	25
3.3.1 Βασικές Αρχές Αναδιαμόρφωσης.....	25
3.3.2 Σχεδιασμός Παραγωγικής Ικανότητας	26
3.3.3 Σχεδιασμός Λειτουργικότητας	26
3.3.4 Διασφάλιση Ποιότητας Προϊόντος.....	27
3.3.5 Σύνθεση Οικογένειας Προϊόντων.....	28
3.3.6 Προγραμματισμός Διεργασιών και Εξισορρόπηση Γραμμής.....	29
3.3.7 Βελτιστοποίηση των Διαδικασιών Συντήρησης	29
3.3.8 Παράδειγμα Σχεδιασμού RMS	30
3.3.9 Μελέτη Περίπτωσης: Το Εργοστάσιο Ford Winsor	32
4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	33
4.1 Διαδικασία Έρευνας	33
4.1.1 Επιλογή Βάσης Δεδομένων	33
4.1.2 Καθορισμός Χρονικού Εύρους και Πεδίου Αναζήτησης	34
4.1.3 Επιλογή Λέξεων-Κλειδιών και Φράσης Αναζήτησης.....	34
4.1.4 Σταχυολόγηση Δημοσιεύσεων	35
4.2 Ποσοτικά Στοιχεία Έρευνας.....	37
4.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	37
4.2.2 Ποσοτικά Δεδομένα Βάσει των Κατευθύνσεων της Έρευνας.....	39
4.3 Ποιοτική Ανάλυση	47
4.3.1 Αντικείμενο Έρευνας	47

4.3.2	Βιομηχανικός Κλάδος	75
4.3.3	Είδος Έρευνας.....	76
4.3.4	Χαρακτηριστικά του RMS που χρησιμοποιούνται.....	77
5.	Συμπεράσματα	81
	Παράρτημα.....	84
6.	Κατάλογος Αναφορών	86

Πίνακας 1 Συνομημύσεις – Αρκτικόλεξα

AGV	Autonomous Guided Vehicle
AHP	Analytic Hierarchy Process
ALC	Average Linkage Clustering
ANN	Artificial Neural Network
APPC	Adaptable Production Planning and Control
BMIM	Bypassing Moves and Idle Machines
CAD	Computer Aided Drawing
CMS	Cellular Manufacturing System
CNC	Computer Numerical Control
CPM	Composite Performance Metric
CRMS	Cellular Reconfigurable Manufacturing System
DEA	Data Envelopment Analysis
DMS	Dedicated Manufacturing System
DMT	Dedicated Machine Tool
FMS	Flexible Manufacturing System
ICTPN	Intelligent Colored Token Petri Nets
IPPS	Integrated Process Planning and Scheduling
LCS	Longest Common Subsequence
MAWC	Measurement Aided Welding Cell
MD-BOM	Multi-Disciplinary Bill of Materials
MDG-BOM	Multi-Disciplinary Green Bill of Materials
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer Non Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
MMLM	Multi-Material Layered Manufacturing
MRM	Modular Reconfigurable Machine
NRC-IMTI	NRC- Integrated Manufacturing Technologies Institute
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
PCB	Printed Circuit Board
PKM	Parallel Kinematic Machine
PlaTooMA	Planning Tool for Micro-Assembly
RAS	Reconfigurable Assembly System
RIM	Reconfigurable Inspection Machine
RMHS	Reconfigurable Material Handling System
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
RMT	Reconfigurable Machine Tool

RMTW	Reconfigurable Maintenance Time Window
ROPN	Resource Oriented Petri Net
RPP	Reconfigurable Production Planning
SoA	Service oriented Architecture
SoV	Stream of Variations
VPRA	Virtual Prototyping system with Reconfigurable Actuators
ΚΕ	Κέντρο Εργασίας

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συντομεύσεις – Αρκτικόλεξα	8
Πίνακας 2 Λεξικό Όρων	84

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σύγκριση RMS-DMS-FMS	19
Σχήμα 3-1 Χαρακτηριστικά στο Φυσικό Επίπεδο	21
Σχήμα 3-2 Ίσιο Τμήμα και Διασταύρωση	22
Σχήμα 3-3 Χαρακτηριστικά στο Λογικό Επίπεδο	24
Σχήμα 3-4 Μία Ιδανική Διαμόρφωση RMS	31
Σχήμα 4-1 Μέθοδος Έρευνας	37
Σχήμα 4-2 Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Έτος	38
Σχήμα 4-3 Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Είδος	39
Σχήμα 4-4 Αντικείμενο Έρευνας	41
Σχήμα 4-5 Ποσοστό Δημοσιεύσεων βάσει Αντικειμένου Έρευνας	41
Σχήμα 4-6 Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Βιομηχανικό Κλάδο	42
Σχήμα 4-7 Βιομηχανικός Κλάδος	43
Σχήμα 4-8 Αριθμός Δημοσιεύσεων στον Κλάδο της Βαριάς Βιομηχανίας	44
Σχήμα 4-9 Είδος Έρευνας	45
Σχήμα 4-10 Ποσοστό Δημοσιεύσεων βάσει Είδους Έρευνας	45
Σχήμα 4-11 Πλήθος Αναφορών στα Χαρακτηριστικά του RMS	46
Σχήμα 4-12 Ροή Δεδομένων μεταξύ των Μοντέλων	50
Σχήμα 4-13 Πολυεπίπεδος Στοχαστικός Προγραμματισμός	53
Σχήμα 4-14 Ο Ρόλος της Ανθρώπινης Φαντασίας	54
Σχήμα 4-15 Διαδικασία Μοντελοποίησης	56
Σχήμα 4-16 Διάγραμμα Ροής για τον προσδιορισμό των Αναγκαίων Αλλαγών	56
Σχήμα 4-17 Προσαρμόσιμος Σχεδιασμός	58
Σχήμα 4-18 Πλαίσιο για την Ανάλυση και Μέτρηση Απόδοσης	59
Σχήμα 4-19 Παράδειγμα Ψηφιακού Διδύμου	60
Σχήμα 4-20 Ποιοτικός Έλεγχος με Ενσωμάτωση RIM	61
Σχήμα 4-21 Μηχανισμός Αναδιαμόρφωσης	63
Σχήμα 4-22 Πλαίσιο Σχηματισμού Οικογένειας Εξαρτημάτων μέσω Green-BOM	65
Σχήμα 4-23 Σύνολα Γνωρισμάτων που Συμβάλλουν στα Ανθρώπινα Λάθη	66
Σχήμα 4-24 Αρχιτεκτονική PlaTooMA	74
Σχήμα 4-25 Βασικά Χαρακτηριστικά της Αναδιαμορφωσιμότητας	78
Σχήμα 4-26 Διαδικασία Ενσωμάτωσης των Χαρακτηριστικών του RMS	79
Σχήμα 5-1 Ερευνητικό Πλαίσιο	81

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3-1 Εργοστάσιο Κινητήρων Ford Winsor	32
Εικόνα 4-1 Αναδιαμορφώσιμη Μηχανή σε Σχήμα Αψίδας	68
Εικόνα 4-2 Σύστημα Αυτόματης Αλλαγής Κοπτικού Εργαλείου	69
Εικόνα 4-3 Διατμητική Μηχανή & Πρέσα Κάμψης	70
Εικόνα 4-4 Επιθεώρηση Τεμαχίου	71
Εικόνα 4-5 Διάταξη MAWC	71
Εικόνα 4-6 Αυτόνομο Ρομπότ Μεταφοράς Υλικών.....	72
Εικόνα 4-7 Χαρακτηριστικά της Αναδιαμορφωσιμότητας	80

1. Εισαγωγή

Τα Συμβατικά Συστήματα Παραγωγής έχουν εξελιχθεί από τα λεγόμενα *job shops* που χαρακτηρίζονται από μηχανές γενικής χρήσης, μικρή παραγωγικότητα, μεγάλη ποικιλία προϊόντων και μεγάλο βαθμό ανάμειξης του ανθρώπινου παράγοντα στις παραγωγικές διαδικασίες. Ένα συμβατικό σύστημα παραγωγής αποτελείται από μηχανές, σύστημα χειρισμού υλικών, υλικά και πληροφορίες. Δεδομένου ότι τα παραπάνω συστήματα έχουν πολλά χαρακτηριστικά, οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να διαχωριστούν ποικίλλουν. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να γίνει διαχωρισμός βάσει της ευελιξίας για την αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων της αγοράς, με τον οποίο διακρίνονται δύο κατηγορίες συστημάτων παραγωγής.

Την πρώτη κατηγορία αποτελούν τα Εξειδικευμένα Συστήματα Παραγωγής ή *Dedicated Manufacturing Systems* (DMS) που κατέχουν την μικρότερη ευελιξία και αποτελούνται από μηχανές ειδικού σκοπού (*Special Purpose Machines*) ή εξειδικευμένες (*dedicated*). Αυτό το σύστημα και οι μηχανές του έχουν σταθερή δομή και είναι δύσκολη και χρονοβόρα η διαδικασία αναδιαμόρφωσής του. Καθώς τα συστήματα αυτά διαθέτουν εξειδικευμένες μηχανές και πολλές φορές αυτές αποτελούνται από κοπτικά εργαλεία πολλαπλών σημείων, η παραγωγικότητα των DMS είναι η υψηλότερη. Επιπλέον έχουν το μικρότερο κόστος και τον απλούστερο σχεδιασμό (Prasad and Jayswal 2019).

Την δεύτερη κατηγορία αποτελούν τα Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής ή *Flexible Manufacturing Systems* (FMS) που, όπως προσδιορίζει και η ονομασία τους, κατέχουν τη μεγαλύτερη ευελιξία. Τα FMS εισάχθηκαν τη δεκαετία του '80 ως απάντηση στην ανάγκη για αυξημένη ανταπόκριση στις αλλαγές των προϊόντων, της τεχνολογίας παραγωγής και της αγοράς. Συνήθως αποτελούνται από εργαλειομηχανές CNC ομαδοποιημένες σε πολλαπλά κέντρα εργασίας που συνδέονται μεταξύ τους με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα χειρισμού υλικών και ελέγχονται από ένα ολοκληρωμένο σύστημα υπολογιστών. Αυτά τα συστήματα έχουν ενσωματωμένη μεγάλη ευελιξία από το σχεδιασμό τους για να ανταπεξέλθουν στις διακυμάνσεις της αγοράς, αλλά έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και σχετικά μικρή παραγωγικότητα. Σύμφωνα με μια έρευνα των Mehrabi et al. (2002) η πλειοψηφία των παραγωγών δηλώνει ότι οι δυνατότητες του FMS δεν αξιοποιούνται πλήρως και ότι αποτρεπτικοί παράγοντες για να επενδύσουν σε αυτό είναι το αρχικό κόστος, η πολυπλοκότητα και η αξιοπιστία του.

Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον οι εταιρείες παραγωγής καλούνται να αντιμετωπίσουν ριζικές αλλαγές που τις ωθούν να βελτιώσουν τις διαδικασίες παραγωγής, προγραμματισμού και διαχείρισης. Τη νέα αυτή κατάσταση εισήγαγε η παγκοσμιοποίηση που ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '90. Οι αλλαγές που έφερε περιλαμβάνουν την αύξηση της συχνότητας εισαγωγής νέων προϊόντων, αλλαγές στα εξαρτήματα των

υφιστάμενων προϊόντων, μεγάλες διακυμάνσεις στη ζήτηση και στο μείγμα προϊόντων και αλλαγές στους κυβερνητικούς κανονισμούς σε σχέση με την ασφάλεια και το περιβάλλον. Σε συνδυασμό με τον επιθετικό ανταγωνισμό, τους πιο μορφωμένους και απαιτητικούς πελάτες και την ταχύρρυθμη αλλαγή στις τεχνολογίες διεργασιών, δημιουργείται η ανάγκη για την εισαγωγή ενός νέου είδους συστήματος παραγωγής που να μπορεί να αντιδρά σε αυτές τις αλλαγές γρήγορα και οικονομικά.

Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, οι Koren et al. (1999) πρότειναν το σχεδιασμό εργοστασίων σύμφωνα με ένα νέο παράδειγμα συστήματος παραγωγής που ονόμασαν Αναδιαμορφώσιμο Σύστημα Παραγωγής ή Reconfigurable Manufacturing System (RMS). Το RMS έχει αρθρωτή δομή (εξοπλισμός και λογισμικό) που του επιτρέπει την αναδιαμόρφωση για να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της αγοράς. Αποτελείται από αρθρωτές μηχανές και ελεγκτές ανοιχτής αρχιτεκτονικής που καθιστούν δυνατή την ενσωμάτωση/αφαίρεση μονάδων λογισμικού υλικού χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο σύστημα. Αυτά τα ειδικά χαρακτηριστικά επιτρέπουν στο σύστημα να μετατρέπεται γρήγορα για την παραγωγή προϊόντων από νέα οικογένεια προϊόντων, να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις παραγωγικότητας και έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει νέες τεχνολογίες. Έτσι, το RMS αποτελεί ένα υπόδειγμα συστήματος παραγωγής, που λόγω της αναδιαμορφωσιμότητάς του είναι πιο ανθεκτικό στο χρόνο.

Επίσης, επειδή αυτή η έρευνα είναι από τις πρώτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην ελληνική γλώσσα, είναι ωφέλιμο να εξηγηθεί η επιλογή της ελληνικής μετάφρασης του όρου «reconfigurable». Ο όρος «configure» σε ελληνική μετάφραση σημαίνει «διαμορφώνω» και «re-» έχει μεταφραστεί ως «ανά-». Συνδυαστικά λοιπόν έχει χρησιμοποιηθεί ο όρος «ανα-διαμορφώνω» και όχι «επανα-διαμορφώνω» που είναι άλλη μια πιθανή μετάφραση.

Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να διερευνήσει ερευνητικό υπόβαθρο του RMS, να το εντάξει σε ένα πλαίσιο και να εντοπίσει τις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Ακόμα δεν υπάρχει εκτενής σύνδεση μεταξύ θεωρίας και πρακτικής εφαρμογής, αφού δεν είναι πολλές οι περιπτώσεις ολοκληρωμένου RMS (Renzi et al. 2014). Για το σκοπό αυτό στο παρόν έγγραφο παρουσιάζεται η έρευνα που έγινε σε επίπεδο βιβλιογραφικής ανασκόπησης σχετικά με το σχεδιασμό, τη διαχείριση και τις εφαρμογές του RMS. Οι κύριες συνεισφορές της παρούσας έρευνας είναι:

- i. Να παρουσιάσει μια δομημένη και επικαιροποιημένη βιβλιογραφική ανασκόπηση που καλύπτει το διάστημα από το 1999 έως το 2022
- ii. Να καλύψει πολλαπλούς τομείς και θέματα του RMS, σχεδιασμός, διαχείριση, προγραμματισμός διεργασιών, τεχνολογίες κ.λπ.
- iii. Να αξιολογήσει τη χρησιμότητα των χαρακτηριστικών του RMS

Σύμφωνα με αυτό το στόχο, η δομή της παρούσας έρευνας οργανώνεται ως εξής:

Στην επόμενη Ενότητα 2 γίνεται εισαγωγή στα συμβατικά συστήματα παραγωγής, αναλύονται τα προτερήματα και μειονεκτήματά τους. Παρουσιάζεται η ανάγκη για αναδιαμορφωσιμότητα ως χαρακτηριστικό που πρέπει να ενσωματώσουν τα συστήματα παραγωγής για να ανταπεξέλθουν στις σύγχρονες ανάγκες της βιομηχανίας. Ύστερα ορίζεται η έννοια του RMS και γίνεται σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής.

Στην Ενότητα 3 παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά του RMS που είναι απαραίτητα για την υλοποίησή του. Επίσης παρουσιάζονται και 3 παραδείγματα σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος.

Στην Ενότητα 4 παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τη δομημένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, γίνεται ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων και ακολουθεί η ποιοτική ανάλυση με την ανάλυση των βασικότερων σημείων από τις επιλεγμένες έρευνες.

Τέλος, στην Ενότητα 5 αναλύονται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται πιθανές ερευνητικές κατευθύνσεις και ανοικτά ζητήματα.

2. Συστήματα Παραγωγής

2.1 Ορισμός Συμβατικών Συστημάτων Παραγωγής

Στην ενότητα αυτή θα δοθεί ο ορισμός των Συμβατικών Συστημάτων Παραγωγής και θα αναλυθούν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες τους.

Ορισμός Εξειδικευμένου Συστήματος Παραγωγής

Το Εξειδικευμένο Σύστημα Παραγωγής ή *Dedicated Manufacturing System* (DMS), έχει σταθερό αυτοματισμό και παράγει τα κύρια προϊόντα ή εξαρτήματα της εταιρείας με μεγάλο ρυθμό. Συνήθως αποτελείται από μία γραμμή παραγωγής που είναι εξειδικευμένη για την παραγωγή ενός μόνο προϊόντος. Όταν λειτουργεί σε πλήρη παραγωγικότητα, το κόστος παραγωγής είναι σχετικά μικρό, επομένως το DMS έχει καλή σχέση κόστους-απόδοσης αρκεί η ζήτηση να είναι μεγαλύτερη από την προσφορά. Λόγω της αυξανόμενης πίεσης από τον παγκόσμιο ανταγωνισμό, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες τα DMS δεν λειτουργούν με πλήρη παραγωγικότητα, οπότε δημιουργούνται απώλειες κόστους. Η παραγωγή διαφορετικών προϊόντων σε ένα DMS είναι ανέφικτη, για αυτό και η θέση της στην μοντέρνα βιομηχανία παρακμάζει.

Ορισμός Ευέλικτου Συστήματος Παραγωγής

Τα Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής ή *Flexible Manufacturing System* (FMS) απαρτίζονται από εργαλειομηχανές με αριθμητικό έλεγχο (CNC) και άλλους προγραμματιζόμενους αυτοματισμούς και μπορούν να παράγουν μεγάλη ποικιλία προϊόντων στο ίδιο σύστημα. Πέραν αυτού του πλεονεκτήματος, έρευνες έχουν δείξει ότι επιχειρήσεις οι οποίες έχουν επενδύσει σε FMS, δεν είναι ευχαριστημένες από την επίδοσή του. Τα μειονεκτήματα των FMS είναι ότι απαιτούν ακριβότερο εξοπλισμό από τα DMS και ότι η παραγωγικότητά τους είναι πολύ μικρή, λόγω της χρήσης ενός μόνο κοπτικού εργαλείου από τα CNC (Dashchenko 2006).

2.2 Η Ανάγκη για Ανταποκρισιμότητα

Οι προαναφερθείσες αδυναμίες των συμβατικών συστημάτων παραγωγής φανερώνουν ανάγκη για συστήματα με μεγαλύτερη ανταποκρισιμότητα.

Η ανταποκρισιμότητα επιτρέπει σε ένα σύστημα παραγωγής να φέρει νέα προϊόντα γρήγορα και να αντιδράσει βέλτιστα σε:

- Αλλαγές στην αγορά
- Παραγγελίες πελατών
- Αλλαγή των προδιαγραφών από τις κυβερνήσεις (ασφάλεια και περιβάλλον)
- Αστοχίες στο σύστημα

Αλλαγές στην αγορά περιλαμβάνουν:

- i. Αλλαγές στη ζήτηση του προϊόντος
- ii. Αλλαγές σε υπάρχοντα προϊόντα
- iii. Εισαγωγή νέων προϊόντων

Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στον παγκόσμιο ανταγωνισμό, σε πιο μορφωμένους και απαιτητικούς πελάτες και σε ραγδαίες αλλαγές στην τεχνολογία των διεργασιών. Για να επιβιώσουν σε αυτό το νέο κατασκευαστικό περιβάλλον, οι εταιρείες πρέπει να είναι σε θέση να αντιδρούν στις αλλαγές γρήγορα και με χαμηλό κόστος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα σύστημα παραγωγής που είναι σχεδιασμένο να προσαρμόζει την παραγωγική του ικανότητα καθώς η ζήτηση αυξάνεται, και να μπορεί να προσαρτήσει λειτουργικότητα καθώς το προϊόν αλλάζει (Dashchenko 2006). Η ανταποκρισιμότητα θεωρείται μεταξύ των τριών πιο σημαντικών στόχων ενός σύγχρονου συστήματος παραγωγής, εκτός από το χαμηλό κόστος και την υψηλή ποιότητα (Khanna and Kumar 2019).

2.3 Αναδιαμορφώσιμα Συστήματα Παραγωγής

Προκειμένου να καλυφθεί η ανάγκη για ανταποκρισιμότητα αναπτύχθηκαν τα RMS. Ένα RMS έχει μεταβλητή δομή και σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να αλλάξει την παραγωγική του ικανότητα για να καλύψει τις ανάγκες της αγοράς σε μία συγκεκριμένη οικογένεια προϊόντων. Το RMS τυπικά αποτελείται από πολλά κέντρα εργασίας με αναδιαμορφώσιμες εργαλειομηχανές ή *Reconfigurable Manufacturing Tool* (RMT) και εργαλειομηχανές με αριθμητικό έλεγχο (CNC), ένα σύστημα ελέγχου ποιότητας που αποτελείται από πολλές αναδιαμορφώσιμες μηχανές επιθεώρησης ή *Reconfigurable Inspection Machine* (RIM) και ένα αναδιαμορφώσιμο σύστημα χειρισμού υλικών ή *Reconfigurable Material Handling System* (RMHS) για την φόρτωση και εκφόρτωση των μηχανών (ταινιόδρομοι ή/και γερανογέφυρες) (Koren Yoram et al. 2002).

Οι διαδικασίες του RMS εκκινούν με την ομαδοποίηση εξαρτημάτων/προϊόντων στις αντίστοιχες οικογένειές τους, ύστερα διαμόρφωση και αναδιαμόρφωση του συστήματος (υλικό και λογισμικό) και η διαχείριση της παραγωγικότητάς του. Από την αρχή λειτουργίας του RMS έχουν προκύψει και άλλα υποστηρικτικά συστήματα όπως μεταβλητή παραγωγή (Changeable Manufacturing), αναδιαμορφώσιμος προγραμματισμός διεργασιών (Reconfigurable Process Planning), αναδιαμορφώσιμη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας (Reconfigurable Supply Chain Management) και αναδιαμορφώσιμα εκτελεστικά συστήματα παραγωγής (Reconfigurable Manufacturing Execution Systems) (Mubarok Khamdi 2010).

2.4 Σύγκριση Αναδιαμορφώσιμων & Συμβατικών Συστημάτων Παραγωγής

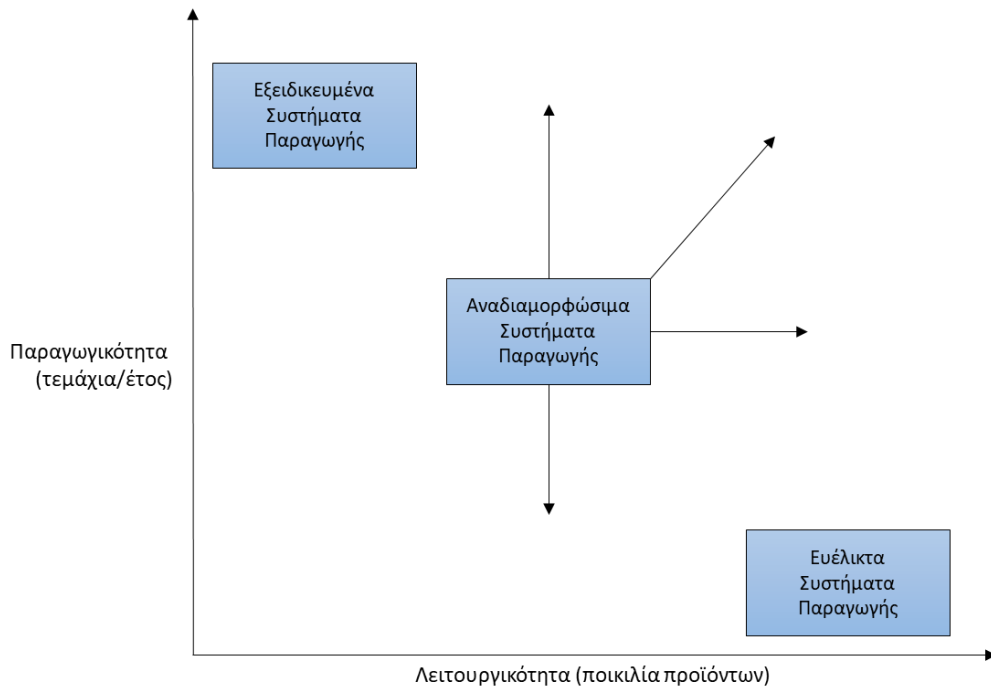
Για να γίνουν αντιληπτά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των RMS σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής, στην υποενότητα αυτή πραγματοποιείται μια σύντομη σχετική σύγκριση.

Τα Εξειδικευμένα Συστήματα Παραγωγής (DMS) έχουν μεγάλη παραγωγικότητα και περιορισμένη λειτουργικότητα, είναι εξειδικευμένες στην παραγωγή ενός τύπου προϊόντων. Επίσης είναι οικονομικές όσο η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την αγορά και εφ' όσον δεν απαιτούνται αλλαγές για την παραγωγή νέου τύπου προϊόντος. Με τις σημερινές συνθήκες (κορεσμένη αγορά, αυξανόμενη πίεση από τον παγκόσμιο ανταγωνισμό) υπάρχουν περιπτώσεις που τα DMS δεν λειτουργούν με την μέγιστη παραγωγικότητά τους, γεγονός που δημιουργεί επιπλέον κόστος.

Τα Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής (FMS) διαθέτουν μέγιστο βαθμό ευελιξίας και λειτουργικότητας, ακόμα και χαρακτηριστικά που δεν φαίνεται να είναι αναγκαία. Ο στόχος τους είναι «όση παραπάνω ευελιξία και λειτουργικότητα γίνεται». Σε αυτές τις περιπτώσεις μέρος του κεφαλαίου επένδυσης για τον εξοπλισμό παραμένει αχρησιμοποίητο, αφού δεν χρειάζονται πάντα τα επιπλέον χαρακτηριστικά.

Αυτά τα δύο είδη δαπανών μειώνονται δραστικά με το Αναδιαμορφώσιμο Σύστημα Παραγωγής (RMS). Το RMS μπορεί να προσθαφαιρέσει παραγωγικότητα και λειτουργικότητα στο σύστημα όπου αυτό είναι αναγκαίο. Στόχος του είναι “όση ακριβώς παραγωγικότητα και λειτουργικότητα χρειάζεται” (Mehrabi M. G., Ulsoy A. G., and Koren Y. 2000). Η διευρυμένη λειτουργικότητά του επιτρέπει την παραγωγή πιο σύνθετων και ποικίλων τύπων τεμαχίων. Από οικονομικής άποψης, ο εξοπλισμός ενός RMS είναι συνήθως πιο ακριβός από ενός DMS και οικονομικότερος από ενός FMS.

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2-1**, το RMS μπορεί να βρίσκεται μεταξύ του DMS και του FMS όσον αφορά τη παραγωγικότητα και τη λειτουργικότητα, όμως το βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι, σε αντίθεση με τα άλλα, η χωρητικότητα και η λειτουργικότητά του δεν είναι σταθερές. Έτσι γεννιέται η πιθανότητα ύπαρξης διαφορετικών τύπων RMS, με διαφορετική προσέγγιση των στοιχείων του, οι οποίοι προκύπτουν από την εξέλιξη ενός DMS ή FMS.



Σχήμα 2-1 Σύγκριση RMS-DMS-FMS

Ακολουθούν δύο παραδείγματα:

- Για την εξέλιξη ενός σημερινού FMS σε RMS που έχει ως βασικό δομικό στοιχείο CNC, απαιτούνται εργαλειομηχανές με χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη ταχύτητα, που διαθέτουν αρθρωτά εργαλεία και συστήματα ελέγχου πραγματικού χρόνου για τη διασφάλιση της σταθερής ποιότητας του προϊόντος.
- Για την εξέλιξη ενός DMS σε RMS που έχει ως βασικό δομικό στοιχείο μονάδες μετάδοσης κίνησης, απαιτούνται εργαλειομηχανές με αρθρωτά μέρη και κατανεμημένους ελεγκτές με επικοινωνία υψηλού εύρους ζώνης (high band width).

Στα παραγωγικά συστήματα DMS και FMS η διαδικασία της αναδιαμόρφωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα δαπανηρή και αποδιοργανωτική, καθώς ολόκληρο το εργοστάσιο πρέπει να κλείσει και η παραγωγή σταματήσει προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι δραστηριότητες αναδιαμόρφωσης. Αυτά τα συστήματα είναι σχεδιασμένα σύμφωνα για συγκεκριμένες ανάγκες. Η διακοπή λειτουργίας τους κάθε φορά που εισάγεται ένα νέο προϊόν στην αγορά ή μεταβάλλεται η ζήτηση είναι εξαιρετικά δύσκολη και δαπανηρή. Έτσι, οι βιομηχανίες πρέπει να διαθέτουν ένα σύστημα παραγωγής το οποίο μπορεί είτε να χρησιμοποιείται για εκτεταμένο εύρος προϊόντων ή μπορεί να αναδιαμορφωθεί εύκολα και αποτελεσματικά. Το RMS θεωρείται ως το πιο ευέλικτο σύστημα παραγωγής που μπορεί να ανταποκριθεί στις σύγχρονες προκλήσεις της βιομηχανίας (Khanna and Kumar 2019).

3. Λειτουργία των Αναδιαμορφώσιμων Συστημάτων Παραγωγής

Στο πλαίσιο λειτουργίας του RMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί πληθώρα από τεχνολογίες, μεθοδολογίες και άλλους παράγοντες. Ορισμένες από αυτές έχουν μεγαλύτερο εύρος πιθανών εφαρμογών, ενώ άλλες είναι γενικής χρήσης (Mehrabi M. G. et al. 2000).

Στο υποενότητα που ακολουθεί θα εξετάσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να είναι ενσωματωμένα στο σύστημα για να μπορεί να θεωρηθεί αναδιαμορφώσιμο (Wiendahl et al. 2007).

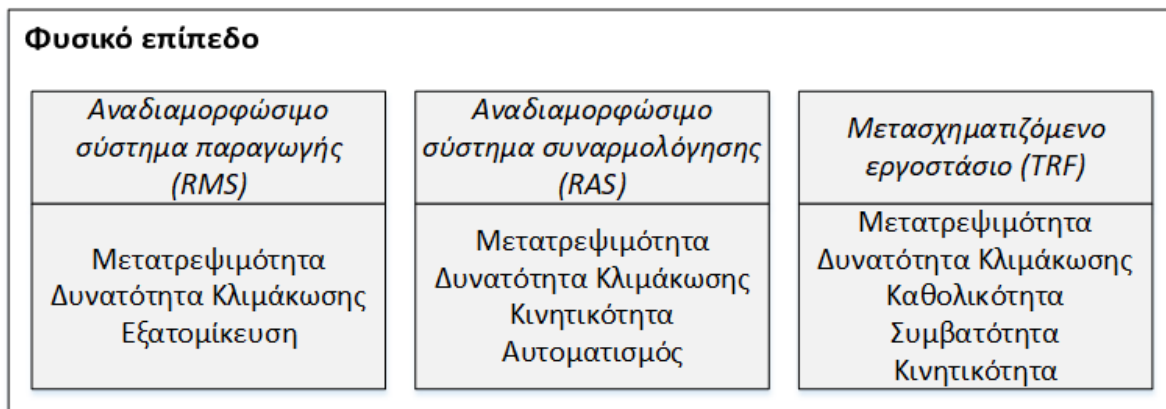
3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά του RMS

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός RMS είναι:

- *Δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability)*: Η δυνατότητα τροποποίησης της παραγωγικής ικανότητας με προσθήκη ή αφαίρεση πόρων ή/και αλλαγή στοιχείων του συστήματος.
- *Μετατρεψιμότητα (convertibility)*: Η ικανότητα μετασχηματισμού της λειτουργικότητας των υπάρχοντων συστημάτων και μηχανημάτων ώστε να ανταποκρίνονται στις νέες απαιτήσεις παραγωγής.
- *Διαγνωσιμότητα (diagnosability)*: Δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της ποιότητας του προϊόντος και ταχεία διάγνωση των αιτιών που προκαλούν ελαττωματικά προϊόντα. Ένα RMS πρέπει να είναι σχεδιασμένο με μηχανήματα επιθεώρησης ενσωματωμένα σε βέλτιστες θέσεις.
- *Εξατομίκευση (customisation)*: Η ευελιξία του συστήματος ή μιας μηχανής είναι σχεδιασμένη γύρω από μια οικογένεια προϊόντων.
- *Αρθρωτή δομή (modularity)*: Τα δομοστοιχεία είναι εύκολο να μετακινηθούν και να εγκατασταθούν. Σε επίπεδο συστήματος οι μηχανές είναι δομοστοιχεία, ενώ σε επίπεδο μηχανής είναι οι άξονες κίνησης. Τα δομοστοιχεία είναι πιο εύκολο να συντηρηθούν και να αναβαθμίζονται.
- *Δυνατότητα ενσωμάτωσης (integrability)*: Η δυνατότητα ταχείας ενσωμάτωσης δομοστοιχείων μέσω μηχανικών, πληροφοριακών και ελέγχων διεπαφών που επιτρέπουν την ενοποίηση και επικοινωνία των μονάδων. Σε επίπεδο συστήματος, οι μηχανές ενσωματώνονται μέσω συστημάτων μεταφοράς υλικών για να σχηματίσουν ένα αναδιαμορφώσιμο σύστημα παραγωγής (Koren, Gu, and Guo 2018).

3.2 Λειτουργικά Επίπεδα ενός RMS

Στο φυσικό επίπεδο τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει κάθε σύστημα παρατίθενται στο **Σχήμα 3-1** που ακολουθεί.



Σχήμα 3-1 Χαρακτηριστικά στο Φυσικό Επίπεδο

(EIMaraghy 2009)

Για την ενσωμάτωση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών στα RMS έχουν αναπτυχθεί οι παρακάτω τεχνολογίες.

3.2.1 Αναδιαμορφώσιμη Εργαλειομηχανή (RMT)

Η εργαλειομηχανή αυτού του τύπου μπορεί εύκολα να αναδιαμορφωθεί έτσι ώστε να έχει ακριβώς όση λειτουργικότητα απαιτείται για να εκτελέσει μία ή περισσότερες κατεργασίες σε ένα εξάρτημα. Το RMT επιτρέπει την αλλαγή της δομής ενός μηχανήματος πολύ γρήγορα μετακινώντας τις δομικές του μονάδες. Αποτελείται από το τραπέζι κατεργασίας όπου στερεώνεται το ακατέργαστο τεμάχιο και τους βραχίονες που φέρουν τουλάχιστον μία μονο-αξονική άτρακτο. Ο άξονας μπορεί εύκολα να στερεωθεί σε έναν από τους βραχίονες και να μετακινηθεί πάνω τους για κατεργασία από διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας. Εργαλεία κοπής ή άλλες εργαλειομηχανές συνδέονται σε κάθε άξονα που ελέγχεται από υπολογιστή. Οι βραχίονες είναι και αυτοί αναδιαμορφώσιμοι και μπορούν να αλλάξουν εύκολα τη θέση και τον προσανατολισμό τους σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας (Koren Yoram and Kota Sridhar 1999).

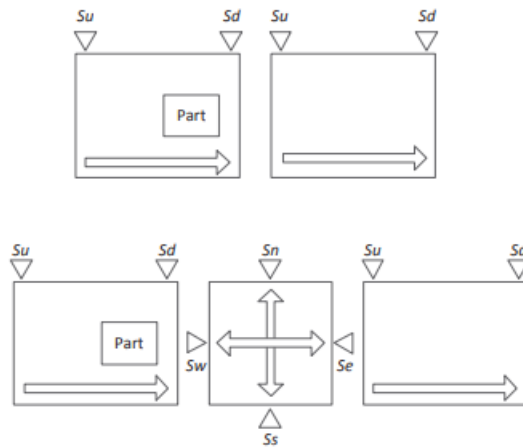
3.2.2 Αναδιαμορφώσιμη Μηχανή Επιθεώρησης (RIM)

Μια συσκευή, σύστημα και μέθοδος επιθεώρησης για την επιθεώρηση εξαρτημάτων κατά την παραγωγή. Η συσκευή αποτελείται από ένα σύνολο αισθητήρων και καμερών τοποθετημένων σε σταθερούς βραχίονες δίπλα στη γραμμή μεταφοράς. Η γραμμή

μεταφοράς μπορεί να είναι μέρος ή δίπλα στη γραμμή παραγωγής. Ο αισθητήρας μετρά ένα χαρακτηριστικό του εξαρτήματος και μπορεί να διαμορφωθεί εκ νέου για να ελέγξει τουλάχιστον ένα διαφορετικό χαρακτηριστικό ενός δεύτερου εξαρτήματος ή για επανέλεγχο του πρώτου εξαρτήματος σε διαφορετικό στάδιο παραγωγής. Το RIM μπορεί να περιλαμβάνει ένα σύστημα υπολογιστή που συλλέγει τα σήματα από την έξοδο του αισθητήρα και παράγει πληροφορίες προσβάσιμες στο χειριστή. Εναλλακτικά, τα εξαρτήματα μπορεί να είναι ακίνητα και το στήριγμα στο οποίο είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες μπορεί να κινείται σε σχέση με αυτά (Koren Yoram and Katz Reuven 2003).

3.2.3 Αναδιαμορφώσιμοι Ταινιόδρομοι (RMHS)

Έχει προταθεί από τους (An et al. 2011) ένα μοντέλο αναδιαμορφώσιμου ταινιόδρομου για τη διακίνηση τεμαχίων από πολλαπλές εισροές προς πολλαπλές εκροές. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο ειδών δομικές μονάδες, ευθεία τμήματα και διασταυρώσεις τα οποία φαίνονται στο **Σχήμα 3-2**. Η κάθε μονάδα έχει ενσωματωμένους μικροελεγκτές, οι οποίοι είναι ασύρματα συνδεδεμένοι με τις γειτονικές μονάδες, και ρυθμίζουν αυτόνομα τη μεταφορά εξαρτημάτων.



Σχήμα 3-2 Ίσιο Τμήμα και Διασταύρωση

(An et al. 2011)

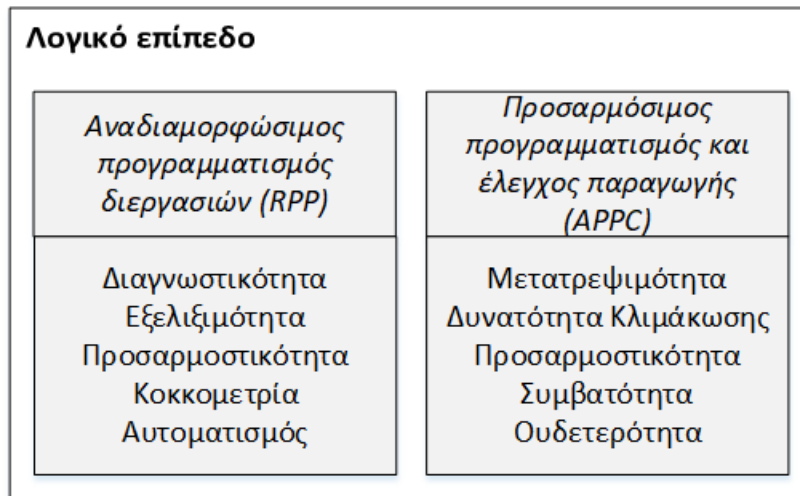
Τα ευθεία τμήματα μπορούν να κινήσουν το εξάρτημα προς δύο κατευθύνσεις (upwards&downwards) και για προκαθορισμένη απόσταση. Επίσης έχουν ενσωματωμένους δύο αισθητήρες S_u και S_d , που ενεργοποιούνται όταν ένα τεμάχιο κινείται μέσα στην εμβέλεια σάρωσής τους.

Οι διασταυρώσεις έχουν τέσσερις θύρες, η καθεμία από τις οποίες μπορεί να ρυθμιστεί ως εισροή ή εκροή και έχει ενσωματωμένο από έναν αισθητήρα σε κάθε θύρα. Στο σχήμα ο κάθε αισθητήρας ονομάζεται σύμφωνα με την κατεύθυνσή του (east, west, north, south). Οι δομικές μονάδες είναι αυτόνομες και μπορούν να αναδιοργανωθούν ή και να προστεθούν τμήματα σύμφωνα με τις ανάγκες διαχείρισης υλικών του συστήματος.

Αναπόσπαστο μέρος των RMS είναι το λογισμικό που απαιτείται για τη διεκπεραίωση καθηκόντων σε διάφορα επίπεδα, όπως ο έλεγχος, η παρακολούθηση και η επικοινωνία μεταξύ μηχανικών, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (σε χαμηλό επίπεδο), καθώς και καθήκοντα υψηλότερου επιπέδου, όπως ο προγραμματισμός διεργασιών, η διεπαφή χρήστη, ο έλεγχος διεργασιών και η συλλογή/αναφορά δεδομένων από τη διεργασία. Η δυνατότητα αναδιαμόρφωσης που κατέχουν τα RMS καθιστά τη διαδικασία προγραμματισμού της παραγωγής, από τον μακροπρόθεσμο προγραμματισμό της παραγωγικής ικανότητας ως το βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό των παραγωγικών μονάδων, πολύ σύνθετη.

Η δομή και η λειτουργικότητα του λογισμικού επικοινωνίας και ελέγχου είναι πολύ κρίσιμη και επηρεάζει άμεσα την απόδοση ολόκληρου του συστήματος. Από οικονομική άποψη, περίπου το 25% του συνολικού αρχικού κόστους μιας εργαλειομηχανής οφείλεται στην ανάπτυξη λογισμικού. Ο αρθρωτός χαρακτήρας των RMS απαιτεί ότι το λογισμικό/υλικό του συστήματος να έχει αρθρωτή δομή, δηλαδή να αποτελείται από ξεχωριστές οντότητες πλήρως αποδεσμευμένες από το υπόλοιπο σύστημα, ώστε να είναι δυνατή η προσθήκη ή τροποποίηση ενός στοιχείου. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι επεκτάσιμο (δηλαδή να μπορεί να ανταποκρίνεται σε νέα χαρακτηριστικά, περιβάλλοντα και απαιτήσεις), τροποποιήσιμο/επαναχρησιμοποιήσιμο (εύκολο να τροποποιηθεί και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά προγράμματα, εάν είναι απαραίτητο), και κυρίως αναδιαμορφώσιμο (ικανό να προσαρμόζεται σε διαφορετικές διαμορφώσεις και να υποστηρίζει εσωτερικές και εξωτερικές αλληλεπιδράσεις των μονάδων χωρίς τροποποιήσεις στο λογισμικό).

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να είναι ενσωματωμένα στο λογικό επίπεδο ενός RMS φαίνονται στο **Σχήμα 3-3**.



Σχήμα 3-3 Χαρακτηριστικά στο Λογικό Επίπεδο
(EIMaraghy 2009)

3.2.4 Αναδιαμορφώσιμος Προγραμματισμός Διεργασιών

Είναι απαραίτητο για τη λειτουργία ενός εργοστασίου να έχει στο λογικό επίπεδο ενσωματωμένο σύστημα προγραμματισμού διεργασιών ικανό να αντιδρά σε αλλαγές στο σχεδιασμό του προϊόντος ή στο φυσικό επίπεδο, έτσι ορίζεται ο αναδιαμορφώσιμος προγραμματισμός παραγωγής ή *Reconfigurable Production Planning* (RPP).

3.2.5 Προσαρμόσιμος Προγραμματισμός και Έλεγχος Παραγωγής

Ο προγραμματισμός και έλεγχος της παραγωγής πρέπει να αντιδρά σε αλλαγές στον όγκο του προϊόντος, στο μείγμα ή σε αναδιαμόρφωση του προγραμματισμού διεργασιών και είναι αποτέλεσμα μίας συνδυαστικής λειτουργίας, που ονομάζεται προσαρμόσιμος προγραμματισμός και έλεγχος παραγωγής ή *Adaptable Production Planning and Control* (APPC). Ένα πρόσθετο στοιχείο σε σχέση με το RPP, είναι ένας βρόχος ελέγχου για την παρακολούθηση των εξωτερικών ή εσωτερικών παραγόντων αλλαγής και την ενεργοποίηση της διαδικασίας αλλαγής στο φυσικό ή στο λογικό επίπεδο. Τέλος, πρέπει να διενεργηθεί μια διαδικασία αξιολόγησης που είναι απαραίτητη για την αιτιολόγηση των πρόσθετων δαπανών λόγω της μετατρεψιμότητας των φυσικών και λογικών αντικειμένων. (Wiendahl et al. 2007). Σύμφωνα με τους (Shukalov et al. 2020), η διαδικασία ελέγχου και παρακολούθησης πρέπει να μιμείται την αντίδραση ενός έμπειρου και ικανού χειριστή μηχανής.

3.3 Σχεδιασμός Συστήματος Αναδιαμορφώσιμου Συστήματος Παραγωγής

Για να γίνει κατανοητή σε μεγαλύτερο βάθος η λειτουργικότητα ενός RMS, στην συγκεκριμένη υποενότητα αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να σχεδιαστεί ένα τέτοιου είδους σύστημα.

3.3.1 Βασικές Αρχές Αναδιαμόρφωσης

Οι έξι βασικές αρχές για το σχεδιασμό των RMS είναι:

- i. *Δυνατότητα κλιμάκωσης*: Σχεδιασμός παραγωγικής ικανότητας συστήματος για οικονομική προσαρμογή στη μελλοντική ζήτηση.
- ii. *Μετατρεψιμότητα*: Σχεδιασμός συστήματος για προσαρμογή σε νέες ανάγκες του πελάτη.
- iii. *Διαγνωστικότητα*: Σχεδιασμός βέλτιστα ενσωματωμένου ελέγχου ποιότητας στο σύστημα.
- iv. *Εξατομίκευση*: Σχεδιασμός συστήματος γύρω από μια οικογένεια προϊόντων.
- v. *Μεγιστοποίηση παραγωγικότητας* με αναδιαμόρφωση του συστήματος και ανακατανομή εργασιών στις μηχανές.
- vi. *Αποτελεσματική συντήρηση* που μεγιστοποιεί την αξιοπιστία των μηχανημάτων και την απόδοση του συστήματος.

Ο βασικός σκοπός του σχεδιασμού ενός εργοστασίου είναι να καθορίσει το βαθμό μετατρεψιμότητας που είναι κατάλληλος και δικαιολογείται οικονομικά σε κάθε περίπτωση. Δεν είναι εφικτό να καθοριστεί ο ακριβής βαθμός μετατρεψιμότητας, όμως μπορεί να ερμηνευθεί κατ' αναλογία με την ποιότητα. Η ποιότητα ορίζεται ως «συμμόρφωση με τις απαιτήσεις» και είναι το άθροισμα πολλαπλών ξεχωριστών χαρακτηριστικών. Για την μετατρεψιμότητα, αυτό σημαίνει ότι μια επιχείρηση πρέπει να καθορίζει τις απαιτήσεις μετατρεψιμότητας, να τις συγκρίνει με τον πραγματικό βαθμό συμμόρφωσης με αυτές τις απαιτήσεις και στη συνέχεια να επιδιώκει τη συνεχή προσαρμογή. Ο καθορισμός του στόχου μετατρεψιμότητας πρέπει να βασιστεί σε εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι το πεδίο εφαρμογής (επιχειρησιακό, τακτικό και στρατηγικό), το επίπεδο (εργοστάσιο, τμήμα, κέντρο εργασίας) και τα αντικείμενα (προϊόν, διαδικασία, όγκος, μείγμα) της μετατρεψιμότητας. Το προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι η *επιθυμητή μετατρεψιμότητα*. Από την άλλη πλευρά, η υπάρχουσα διαδικασία έχει ορισμένους βαθμούς ελευθερίας για την αλλαγή, επομένως η *πραγματική μετατρεψιμότητα* είναι ένας δείκτης της δυνατότητας αλλαγής. Συνήθως αυτό το δυναμικό δεν επαρκεί για να αντιμετωπίσει το επιθυμητό επίπεδο μετατρεψιμότητας. Επομένως, πρέπει να διενεργηθεί οικονομική αξιολόγηση για τον προσδιορισμό των εφικτών και δικαιολογημένων τρόπων δράσης που συνάδουν με τη συνολική εταιρική στρατηγική και το όραμα της διοίκησης (EIMaraghy 2009).

3.3.2 Σχεδιασμός Παραγωγικής Ικανότητας

Ο μέγιστος αριθμός προϊόντων που μπορεί να παράξει ετήσια ένα παραγωγικό σύστημα ονομάζεται *παραγωγική ικανότητα*. Ο καθορισμός της παραγωγικής ικανότητας σε ένα νέο σύστημα αποτελεί μεγάλη πρόκληση λόγω των απρόβλεπτων αλλαγών στην αγορά. Αν στο μέλλον η ζήτηση της αγοράς είναι μικρότερη από την παραγωγική ικανότητα του συστήματος, κάποιες μηχανές μένουν αδρανείς, γεγονός που προκαλεί μεγάλη απώλεια κεφαλαίου για την εταιρεία. Αντιθέτως, αν η παραγωγική ικανότητα που απαιτείται για να ικανοποιήσει τη ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την πραγματική, τότε η εταιρεία θα χάσει ευκαιρίες πώλησης και μερίδιο της αγοράς. Ο καθορισμός της παραγωγικής ικανότητας είναι κρίσιμος για την βιωσιμότητα μιας για μια νέας επιχείρησης. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μεγάλου εργοστασίου μπορεί να διαρκέσει 2 με 3 χρόνια και θα είναι λειτουργικό για άλλα 12 με 25 χρόνια. Όμως, η πρόβλεψη ζήτησης στην οποία θα βασιστεί ο σχεδιασμός, βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα και παρέχει πληροφορίες για τα επόμενα χρόνια (συνήθως μέχρι 8 χρόνια).

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί βέλτιστα αυτή η πρόβλεψη για τον καθορισμό της παραγωγικής ικανότητας, οι (Koren et al. 2018) προτείνουν το σχεδιασμό του RMS σύμφωνα με την 1η Βασική Αρχή του RMS: *«Δυνατότητα κλιμάκωσης: Σχεδιασμός παραγωγικής ικανότητας συστήματος για οικονομική προσαρμογή στη μελλοντική ζήτηση.»*, έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα για τον καθορισμό της βέλτιστης παραγωγικότητας στο στάδιο του σχεδιασμού, αλλά και για πιθανές στρατηγικές για την αύξησή της στο μέλλον.

3.3.3 Σχεδιασμός Λειτουργικότητας

Η λειτουργικότητα ενός συστήματος είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη πολιτικών αναδιαμόρφωσης του συστήματος. Επικεντρώνεται στην αλλαγή του συστήματος από την κατασκευή ενός προϊόντος σε ένα άλλο από την ίδια οικογένεια προϊόντων. Απαιτεί επακόλουθες αλλαγές στον προγραμματισμό των διαδικασιών και τη ρύθμιση των παραμέτρων. Το RMS σχεδιάζεται σύμφωνα με τη 2η Βασική Αρχή *«Μετατρεψιμότητα: Σχεδιασμός συστήματος για προσαρμογή σε νέες ανάγκες του πελάτη»* (Koren et al. 2018), που επιτρέπει στο σύστημα να μετατρέπεται αποδοτικά για να παράξει ένα νέο προϊόν.

Βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον καθορισμό της παραγωγικής ικανότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος είναι η μεταβατική περίοδος (ramp up period). Αυτή ορίζεται ως *«το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένα νεοεισαχθέν ή μόλις αναδιαμορφωμένο σύστημα παραγωγής για να είναι οικονομικά βιώσιμο και να έχει μακροπρόθεσμα σταθερή παραγωγικότητα από πλευρά απόδοσης και ποιότητας»*. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του RMS επιτρέπουν την κλιμάκωση με μεγάλη ακρίβεια και ταχεία ανταπόκριση σε αλλαγές, συνεπώς μειώνουν τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου (ramp-up period).

3.3.4 Διασφάλιση Ποιότητας Προϊόντος

Η διασφάλιση της ποιότητας είναι κρίσιμος παράγοντας στο σχεδιασμό ενός παραγωγικού συστήματος. Κάθε μηχανή έχει συγκεκριμένη ανοχή, η οποία συσσωρεύεται ως απόκλιση διαστάσεων στο τελικό προϊόν. Σε μία σειριακή γραμμή παραγωγής η διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει η παραγωγή είναι μόνο μία, οπότε και το εύρος της απόκλισης είναι μικρό. Αν το σύστημα έχει παραπάνω σειριακές γραμμές παραγωγής συνδεδεμένες παράλληλα, τότε ο αριθμός των διαδρομών που μπορεί να ακολουθήσει η παραγωγή είναι ίσος με τον αριθμό των γραμμών παραγωγής. Σε ένα RMS οι πιθανές διαδρομές παραγωγής είναι πολλές. Έστω ότι το εργοστάσιο αποτελείται από μ κέντρα εργασίας και ν παράλληλες μηχανές σε κάθε κέντρο, τότε θα υπάρχουν $\mu * \nu$ πιθανές διαδρομές. Κατά το σχεδιασμό του συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη αυτός ο παράγοντας και να δοθεί η αναγκαία προσοχή στο θέμα της διασφάλισης ποιότητας.

Τα προβλήματα που δημιουργεί ο μεγάλος αριθμός διαδρομών παραγωγής στο RMS είναι:

1. η αυξημένη διακύμανση στην ποιότητα του προϊόντος
2. αν μια μηχανή δεν παράγει σταθερή ποιότητα, αυτό είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί με ποιοτικό έλεγχο μόνο στο τελικό προϊόν

Άρα για το σχεδιασμό ενός συστήματος όσον αφορά την εξερχόμενη ποιότητα, πρέπει να εφαρμοστεί η 3η Βασική Αρχή του RMS «*Διαγνωστικότητα (diagnosability): Σχεδιασμός βέλτιστα ενσωματωμένου ελέγχου ποιότητας στο σύστημα*» (Koren et al. 2018). Αν εντοπιστούν διακυμάνσεις στην εξερχόμενη ποιότητα από συστήματα ελέγχου πάνω στη γραμμή παραγωγής, το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίσει γρήγορα τον παράγοντα σφάλματος (π.χ. μηχανή) και να προβεί σε ενέργειες αντιμετώπισης (π.χ. προληπτική συντήρηση). Η μέθοδος ροή της απόκλισης (stream of variation) έχει αναπτυχθεί για να κάνει ανάλυση στη διάδοση της ποιότητας σε πολυεπίπεδα παραγωγικά συστήματα. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση Monte Carlo για την ανάλυση της διακύμανσης των προϊόντων.

Για τον έλεγχο της ποιότητας πάνω στη γραμμή παραγωγής (in-line inspection), συνιστάται η ενσωμάτωση RIM στο RMS. Κατά τον σχεδιασμό πρέπει να καθοριστούν οι κρίσιμες θέσεις στις οποίες πρέπει να τοποθετηθούν οι RIM. Επιπλέον μπορεί να εγκατασταθεί και ταινιόδρομος ή αυτόνομα κατευθυνόμενο όχημα (AGV) για τη επιστροφή των τεμαχίων που χρειάζονται ανακατεργασία.

3.3.5 Σύνθεση Οικογένειας Προϊόντων

Για την μείωση κόστους και αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος, τα RMS πρέπει να σχεδιάζονται σύμφωνα με την 4η Βασική Αρχή “Εξατομίκευση (*customisation*): Σχεδιασμός συστήματος γύρω από μια οικογένεια προϊόντων” (Koren et al. 2018). Τα προϊόντα κατηγοριοποιούνται σε οικογένειες προϊόντων οι οποίες απαιτούν μία συγκεκριμένη διαμόρφωση στο σύστημα. Το παραγωγικό σύστημα μπορεί να παράξει οποιοδήποτε προϊόν από αυτή την οικογένεια με καλή απόδοση και χωρίς αναδιαμόρφωση (καθόλου ή μικρή προετοιμασία).

Μια οικογένεια προϊόντων αποτελείται από προϊόντα που διαθέτουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Για τη διαμόρφωση της οικογένειας προϊόντων πρέπει να δημιουργηθεί ένας ποσοτικός δείκτης για τη μέτρηση της ομοιότητας μεταξύ διαφορετικών προϊόντων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Koren et al. 2018) η μέθοδος του συνδέσμου αναδιαμόρφωσης (*reconfiguration link*) εκτελεί τα καθήκοντα του καθορισμού της οικογένειας προϊόντων και της επιλογής της κατάλληλης οικογένειας σε κάθε στάδιο αναδιαμόρφωσης. Χρησιμοποιείται ένα μοντέλο αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας ή *Analytical Hierarchical Process* (AHP) λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις απαιτήσεις της αγοράς, όσο και τις απαιτήσεις της κατασκευής. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός πίνακα ομοιότητας μεταξύ διαφορετικών προϊόντων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του προϊόντος όπως η αρθρωτή δομή, η κοινοτυπία, η συμβατότητα, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και η ζήτηση. Με βάση τον πίνακα ομοιότητας, ο αλγόριθμος ομαδοποίησης μέσης σύνδεσης ή *Average Linkage Clustering* (ALC) εφαρμόστηκε για τη διαμόρφωση των οικογενειών προϊόντων.

Σε λειτουργικό επίπεδο, μελετώνται προβλήματα προγραμματισμού λειτουργίας που βελτιστοποιούν την αλληλουχία παραγωγής διαφορετικών προϊόντων, προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος. Η επιχειρησιακή αλληλουχία θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση των ομοιοτήτων των προϊόντων και τον καθορισμό των οικογενειών. Έχει αναπτυχθεί μια επιχειρησιακή διαδικασία βασισμένη στον συντελεστή BMIM (*Bypassing Moves and Idle Machines*), ο οποίος χρησιμοποιεί διάφορες έννοιες της θεωρίας συνόλων, όπως η μακρύτερη κοινή υπακολουθία ή *Longest Common Subsequence* (LCS) και ο ελάχιστος αριθμός των κινήσεων παράκαμψης και ο αριθμός των αδρανών μηχανών. Αυτοί οι συντελεστές ομοιότητας χρησιμοποιούνται ως βάση για την ομαδοποίηση των εξαρτημάτων και το σχηματισμό οικογενειών. Πέραν των κατασκευαστικών συστημάτων, η έννοια του σχηματισμού οικογένειας προϊόντων εφαρμόζεται και σε συστήματα συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης.

3.3.6 Προγραμματισμός Διεργασιών και Εξισορρόπηση Γραμμής

Ο προγραμματισμός διεργασιών προσδιορίζει τα συστατικά και τις λειτουργίες που απαιτούνται για την επεξεργασία ενός τεμαχίου σε ένα εξάρτημα ή ένα προϊόν. Ο προγραμματισμός διεργασιών σε ένα RMS απαιτεί εξέταση πολλαπλών οικογενειών προϊόντων, ή πολλαπλών γενεών προϊόντων. Ο αποτελεσματικός προγραμματισμός μπορεί να μειώσει το κόστος αναδιαμόρφωσης, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του συστήματος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Koren et al. 2018) έχει προταθεί η ιδέα του *αναδιαμορφώσιμου προγραμματισμού διεργασιών (RPP)*, η οποία διατυπώθηκε ως πρόβλημα ακέραίου προγραμματισμού. Επίσης εφαρμόστηκε η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης για την αναδιάταξη των κατεργασιών προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος αδράνειας του συστήματος.

Κάθε φορά που ζητείται να παραχθεί ένα νέο προϊόν ή προστίθεται μία νέα μηχανή στο σύστημα, είναι αναγκαίο να παραχθεί καινούριος προγραμματισμός διεργασιών. Αυτός περιλαμβάνει την αλληλουχία όλων των επιμέρους διεργασιών που είναι αναγκαίες για την ολοκλήρωση του προϊόντος. Οι διεργασίες πρέπει να καταμερίζονται ανάμεσα στις μηχανές σύμφωνα με την 5η Βασική Αρχή: *«Μεγιστοποίηση παραγωγικότητας με επαναδιαμόρφωση στις λειτουργίες και ανακατανομή εργασιών στις μηχανές»* (Koren et al. 2018). Ο σκοπός είναι να επιτευχθούν, όσο το δυνατόν γίνεται, ίδιοι χρόνοι κατεργασιών στις μηχανές ή στα Κέντρα Εργασίας του συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι η εξισορρόπηση του συστήματος και η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητάς του.

Παράγοντες που επηρεάζουν τον προγραμματισμό διεργασιών είναι:

- περιορισμοί προτεραιότητας διεργασιών
- ελαχιστοποίηση του χρόνου προετοιμασίας της μηχανής
- ελαχιστοποίηση κόστους αναδιαμόρφωσης RMS

3.3.7 Βελτιστοποίηση των Διαδικασιών Συντήρησης

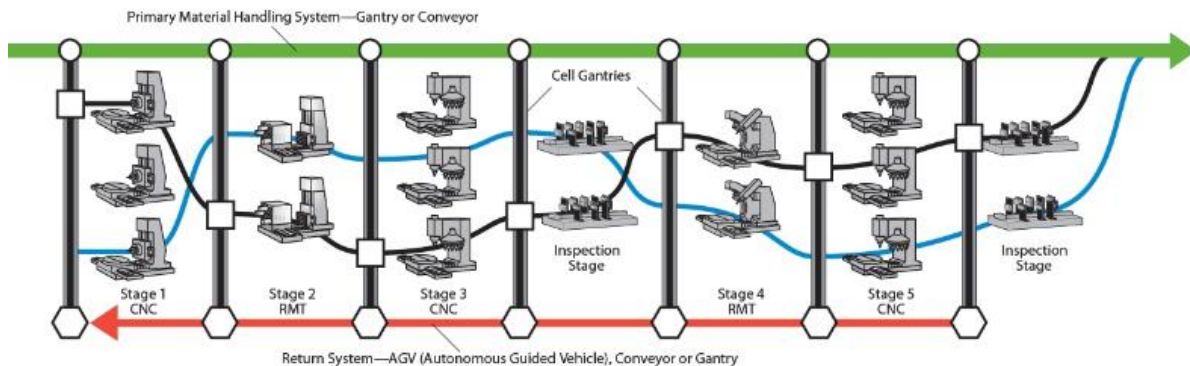
Η σωστή συντήρηση του εξοπλισμού είναι καθοριστικός παράγοντας για την αξιοπιστία του συστήματος και για την εξερχόμενη ποιότητα. Είναι σημαντική επιχειρησιακή απόφαση η επιλογή μιας αποτελεσματικής πολιτικής συντήρησης, αφού το κόστος συντήρησης για μεγάλα συστήματα έχει παρατηρηθεί ότι είναι ο 2ος μεγαλύτερος παράγοντας κόστους. Σε επίπεδο συστήματος, οι πολιτικές συντήρησης πρέπει να αναπτύσσονται σύμφωνα με την 6η Βασική Αρχή του RMS: *«Αποτελεσματική συντήρηση που μεγιστοποιεί την αξιοπιστία των μηχανημάτων και την απόδοση του συστήματος»* (Koren et al. 2018). Η λήψη αποφάσεων συντήρησης είναι σύνθετη υπόθεση λόγω των παρακάτω παραγόντων:

1. Σε επίπεδο συστήματος μπορεί να υπάρχουν διαφορετικές πολιτικές συντήρησης που πρέπει να αντιμετωπίζονται ταυτόχρονα, όπως προληπτική, επιθεώρηση και διορθωτική.
2. Πρέπει να ενσωματωθούν πολλαπλές πηγές πληροφοριών από το επίπεδο μηχανημάτων (π.χ. κατάσταση υγείας των μηχανών) και από το επίπεδο συστήματος (π.χ. απόθεμα στις αποθήκες, απαίτηση στην παραγωγικότητα και η διαθεσιμότητα του προσωπικού συντήρησης).
3. Στα RMS παρόλο που οι παράλληλες μηχανές σε κάθε κέντρο εργασίας εκτελούν τις ίδιες διεργασίες, η κατάσταση υγείας της κάθε μηχανής μπορεί να είναι διαφορετική. Κατά την προσπάθεια εντοπισμού ευκαιρίας συντήρησης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι προγραμματισμένες διαδικασίες αναδιαμόρφωσης.

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, οι περισσότερες επιχειρήσεις κάνουν χρήση προσομοιώσεων βάσει προσεγγίσεων, για να εντοπιστεί η ευκαιρία συντήρησης.

3.3.8 Παράδειγμα Σχεδιασμού RMS

Σε αυτή την υποενότητα θα παρουσιαστεί ένα θεωρητικό παράδειγμα αρχιτεκτονικής ενός RMS για την καλύτερη κατανόηση της πιθανής διάταξης και λειτουργίας του. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3-4** (Koren et al. 2018), το σύστημα διαθέτει 7 κέντρα εργασίας (ΚΕ) συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους, από τα οποία 2 λειτουργούν ως σταθμοί επιθεώρησης. Υπάρχουν 3 ΚΕ εξοπλισμένα με 3 CNC το καθένα και 2 ΚΕ εξοπλισμένα με 2 RMT. Επίσης, οι σταθμοί επιθεώρησης διαθέτουν από 2 RIM. Επιπλέον κάθε ΚΕ είναι συνδεδεμένο με το σύστημα χειρισμού υλικών (γερανογέφυρα), απεικονίζεται με κάθετη μαύρη γραμμή, για τη μεταφορά τεμαχίων από/προς αυτά. Με οριζόντια πράσινη γραμμή απεικονίζεται το κύριο σύστημα χειρισμού υλικών (ταινιόδρομος), όπου οι γερανογέφυρες αποθέτουν τα τεμάχια ώστε αυτά να μεταβούν στο επόμενο ΚΕ. Στο σύστημα είναι ενσωματωμένο και ένα σύστημα επιστροφής ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων που δεν πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Αυτό το σύστημα μπορεί να είναι ένα αυτόνομα κατευθυνόμενο όχημα (AGV), ταινιόδρομος ή γερανογέφυρα.



Σχήμα 3-4 Μία Ιδανική Διαμόρφωση RMS

(Koren et al. 2018)

Παρατηρούμε ότι όλα τα κέντρα εργασίας είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους και ότι οι μηχανές στο κάθε κέντρο είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Επιπλέον στο σχήμα φαίνονται από τη μπλε και μαύρη καμπύλη γραμμή οι διαφορετικές πορείες που μπορεί να ακολουθήσει η παραγωγή ενός προϊόντος. Αυτές οι γραμμές δείχνουν ποιες μηχανές συνέβαλαν στην παραγωγή, όχι την πραγματική πορεία του τεμαχίου. Για παράδειγμα, η πραγματική πορεία της παραγωγής ενός τεμαχίου όπως υποδεικνύεται από τη μαύρη γραμμή είναι:

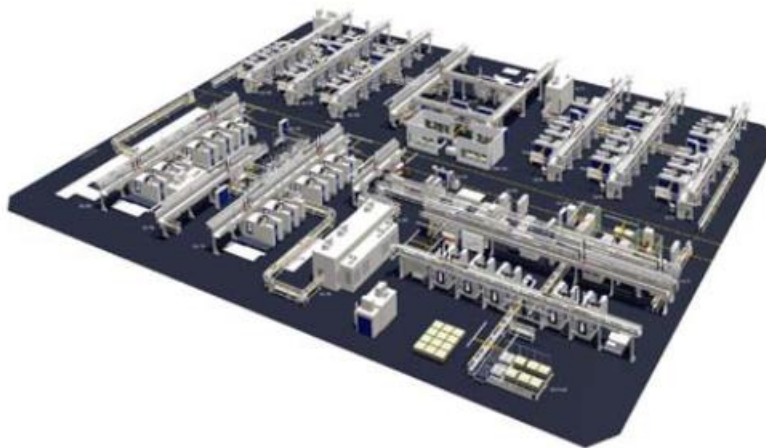
- i. Εισέρχεται στο σύστημα παραγωγής μέσω του κύριου ταινιόδρομου.
 - ii. Η γερανογέφυρα του 1^{ου} ΚΕ το παραλαμβάνει και το τοποθετεί στο 1^ο CNC του ΚΕ.
 - iii. Ύστερα από την κατεργασία του, παραλαμβάνεται από τη γερανογέφυρα του 1^{ου} ΚΕ και επιστρέφει στον κύριο ταινιόδρομο.
 - iv. Η γερανογέφυρα του 2^{ου} ΚΕ το παραλαμβάνει και το τοποθετεί στο 2^ο RMT του ΚΕ.
 - v. Ύστερα από την κατεργασία του, παραλαμβάνεται από τη γερανογέφυρα του 2^{ου} ΚΕ και επιστρέφει στον κύριο ταινιόδρομο.
- κ.ο.κ.

Έστω ότι ύστερα από την επιθεώρηση του τεμαχίου κρίθηκε ότι αυτό δεν πληροί τις προδιαγραφές, τότε το σύστημα επιστροφής μπορεί να μεταφέρει το τεμάχιο στο κατάλληλο ΚΕ για να ανακατεργαστεί. Αξίζει να σχολιασθεί ότι σε ένα RMS δεν είναι αναγκαίο όλες οι μηχανές να παίρνουν μέρος στην παραγωγή, αλλά μπορεί να είναι ανενεργές, να συντηρούνται ή να βρίσκονται σε διαδικασία προετοιμασίας για την παραγωγή ενός νέου προϊόντος. Η προετοιμασία μπορεί να περιλαμβάνει μετακίνηση της μηχανής σε άλλο ΚΕ ή διεργασίες αναδιαμόρφωσης στην δομή του.

3.3.9 Μελέτη Περίπτωσης: Το Εργοστάσιο Ford Winsor

Ολοκληρώνοντας την ενότητα για τον σχεδιασμό των RMS κρίθηκε σκόπιμη η σύντομη παρουσίαση μιας επιτυχημένης περίπτωσης υλοποίησης αναδιαμορφώσιμου συστήματος παραγωγής. Το εργοστάσιο κινητήρων Ford Winsor σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το 1998 έως το 2000. Διαθέτει περίπου 120 μηχανές CNC διατεταγμένες σε μια αναδιαμορφώσιμη αρχιτεκτονική συστήματος που αποτελείται από 20 κέντρα εργασίας, το καθένα με 6 μηχανές (**Εικόνα 3-1**). Η Ford Motor Company ονόμασε το σύστημα ένα «ευέλικτο, αναδιαμορφώσιμο σύστημα παραγωγής». Ευέλικτο καθώς το CNC μπορεί να παράξει πολλά είδη προϊόντος. Σε επίπεδο συστήματος, κάθε CNC είναι μια δομική μονάδα της οποίας η λειτουργία μπορεί να αλλάξει όταν χρειαστεί να παραχθεί ένας νέος τύπος προϊόντος. Κάθε κέντρο εργασίας αποτελείται από πολλαπλά CNC συνδεδεμένα παράλληλα με γερανογέφυρες για φόρτωση και εκφόρτωση. Επιπλέον, όλα τα κέντρα εργασίας του συστήματος επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου γερανογεφυρών που κινούνται κατά μήκος της οροφής.

Το σύστημα έχει διαγνωστικότητα μέσω ενσωματωμένων σταθμών ελέγχου στη γραμμή παραγωγής, οι οποίοι είναι στρατηγικά τοποθετημένοι στην έξοδο των κρίσιμων για την παραγωγή κέντρων εργασίας. Το σύστημα έχει επίσης δυνατότητα κλιμάκωσης καθώς μπορούν εύκολα να προστεθούν περισσότερα μηχανήματα για να αυξηθεί η παραγωγική του ικανότητα. Ειδικότερα, από το 2000 που τέθηκε σε λειτουργία το εργοστάσιο της Ford, αναδιαμορφώθηκε τρεις φορές προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγική του ικανότητα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αν, αντί για CNC, προστεθεί ένα RMT που μπορεί να επεξεργαστεί ευρύτερο φάσμα εξαρτημάτων, το εργοστάσιο θα είχε και το χαρακτηριστικό της εξατομίκευσης (Koren et al. 2018).



Εικόνα 3-1 Εργοστάσιο Κινητήρων Ford Winsor
(Koren et al. 2018)

4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Αυτή η ενότητα πραγματεύεται μια δομημένη βιβλιογραφική ανασκόπηση στη βάση δεδομένων Elsevier Scopus με στόχο τη διερεύνηση του ερευνητικού υποβάθρου του RMS, την ένταξή του σε ένα πλαίσιο και τον εντοπισμό κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα. Πρόκειται δηλαδή για μια δομημένη διαδικασία έρευνας της βιβλιογραφίας με σκοπό τη συγκέντρωση, αξιολόγηση και ανάλυση όλων των διαθέσιμων δεδομένων που αφορούν τον συγκεκριμένο ερευνητικό κλάδο. Αναλυτικότερα, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να διαρθρωθεί η συγκεκριμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο τρόπος με τον οποίο ομαδοποιήθηκαν τα δεδομένα και ύστερα παρουσιάζονται τα ποσοτικά αποτελέσματα της ανασκόπησης και γίνεται ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά κατηγορία.

4.1 Διαδικασία Έρευνας

Είναι σημαντικό να καθοριστεί το πρωτόκολλο έρευνας καθώς και τα κριτήρια επιλογής και απόρριψης των δημοσιεύσεων. Σκοπός είναι το φιλτράρισμα των αποτελεσμάτων ώστε να παραμείνουν μόνο όσα είναι σχετικά με τη θεματολογία της έρευνας. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία τα αποτελέσματα που μένουν ελέγχονται διεξοδικά και κατηγοριοποιούνται ώστε να οδηγηθούμε σε μία στατιστική ανάλυση.

4.1.1 Επιλογή Βάσης Δεδομένων

Είναι σημαντικό να επιλεγεί μία βάση δεδομένων με αν ελεύθερη πρόσβαση, αξιόπιστη και ευρέως διαδεδομένη στο επιστημονικό κοινό. Η σύγκριση των δυνατοτήτων από τις πιο διαδεδομένες βάσεις δεδομένων έδειξε ότι για την ανάλυση των αναφορών, το Scopus παρέχει περίπου 20% μεγαλύτερη κάλυψη από το Web of Science, ενώ το Google Scholar παρέχει αποτελέσματα ασυνεπούς ακρίβειας. Το PubMed παραμένει ένα βέλτιστο εργαλείο για την βιοϊατρική έρευνα. Το Scopus καλύπτει ένα ευρύτερο φάσμα επιστημονικών περιοδικών, γεγονός που βοηθά τόσο στη σύνθετη αναζήτηση με λέξεις-κλειδιά όσο και στην ανάλυση των αναφορών, αλλά προς το παρόν περιορίζεται σε πρόσφατα άρθρα (δημοσιευμένα μετά το 1990) σε σύγκριση με το Web of Science. Το Google Scholar μερικές φορές παρέχει ξεχωριστές πληροφορίες στον επιστημονικό τομέα, αλλά η χρήση του επισκιάζεται από τις ανεπαρκείς και λιγότερο συχνά επικαιροποιημένες πληροφορίες για τις αναφορές (Falagas et al. 2008). Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε η επιστημονική βάση δεδομένων Scopus. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων φιλοξενεί περισσότερους από 41.462 επιστημονικούς τίτλους και 11.678 εκδοτικούς οίκους. Όλα τα αρχεία που φιλοξενούνται ελέγχονται ετησίως βάση 4 παραγόντων για να διακριβωθεί η ποιότητά τους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα ακαδημαϊκής σύνδεσης μέσω του Εθνικού

Μετσόβιου Πολυτεχνείου που του παρέχει την πρόσβαση σε όλα τα αρχεία «Ελεύθερης Πρόσβασης».

4.1.2 Καθορισμός Χρονικού Εύρους και Πεδίου Αναζήτησης

Ο καθορισμός ενός αυστηρά ορισμένου χρονικού εύρους αναζήτησης δεν είναι απαραίτητος για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, αφού αυτή ασχολείται με το σύνολο των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για την υποστήριξη της ανάπτυξης του RMS. Στο αντικείμενο του RMS, όπως παρατηρείται από τη βιβλιογραφία, έγινε πρώτη φορά αναφορά το έτος 1990 και ύστερα από το έτος 1999 αυξήθηκε η δημοσιότητά του, συνεπώς το εύρος των αποτελεσμάτων της σύνθετης αναζήτησης αναμένεται να είναι από το 1990 έως το 2022. Επίσης η ανάλυση των δημοσιεύσεων βάσει χρονολογικής σειράς συμβάλλει στην κατανόηση της εξέλιξης των μεθοδολογιών, των τεχνολογιών, αλλά και των εμποδίων, για την υλοποίηση του RMS.

Αναφορικά με το πεδίο αναζήτησης, κρίθηκε σκόπιμο η φράση αναζήτησης να αναζητείται μόνο στον *Τίτλο*, την *Περίληψη* και τις *Λέξεις-κλειδιά* της εκάστοτε δημοσίευσης.

4.1.3 Επιλογή Λέξεων-Κλειδιών και Φράσης Αναζήτησης

Οι λέξεις-κλειδιά αποτελούν τη βάση για την αναζήτηση σε μία βιβλιογραφική πηγή δεδομένων. Επιλέχθηκαν προσεκτικά κάποιες λέξεις-κλειδιά βάσει του αντικειμένου της έρευνας με σκοπό να στοχοποιήσουν μόνο σχετικές δημοσιεύσεις. Ύστερα πραγματοποιήθηκε συνδυασμός αυτών μέσω Boolean άλγεβρας. Η διαδικασία αυτή διευκολύνει τον ερευνητή γιατί αποκλείει δημοσιεύσεις που δεν έχουν άμεση συσχέτιση με το θέμα και ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της σύνθετης αναζήτησης είναι αντιπροσωπευτικά από άποψη ποιότητας και ποσότητας.

Πιο συγκεκριμένα, οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Reconfigurable manufacturing
- System
- Application
- Methodology
- Tool

Και τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Final (τελική έκδοση δημοσίευσης)
- English (αγγλική γλώσσα)
- Ar (άρθρο)
- Ch (κεφάλαιο βιβλίου)
- Bk (βιβλίο)

Ο συνδυασμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των λογικών τελεστών AND και OR αλλά και του φίλτρου LIMIT TO ως εξής:

("reconfigurable manufacturing" AND system AND (application OR methodology OR tool)) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "bk"))

Μέσω της συγκεκριμένης φράσης αναζήτησης στοχεύονται δημοσιεύσεις οι οποίες αφορούν:

- i. Τα RMS
- i. Μεθοδολογίες ή εφαρμογές ή εργαλεία
- ii. Τελική έκδοση των δημοσιεύσεων
- iii. Δημοσιεύσεις στην αγγλική γλώσσα (παρέχει ευρύ φάσμα, ενώ δεν υπήρχε δυνατότητα μεταφράσεων
- iv. Άρθρα ή κεφάλαια βιβλίων ή βιβλία

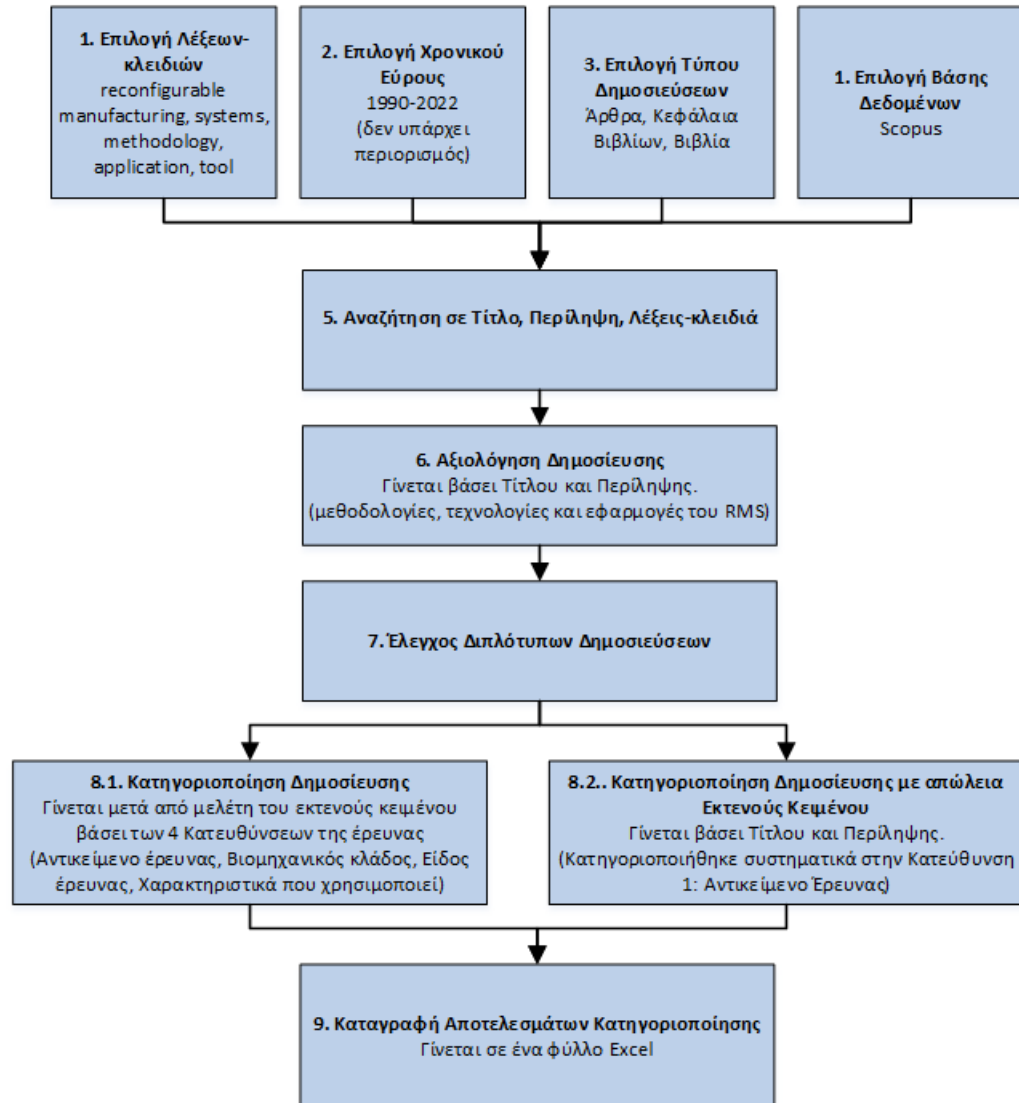
4.1.4 Σταχυολόγηση Δημοσιεύσεων

Ύστερα από την παραμετροποίηση της αναζήτησης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βάση δεδομένων ανέρχονται στις 252 δημοσιεύσεις. Στη συνέχεια στοιχειοθετήθηκαν σε ένα αρχείο Microsoft Excel βάσει της ημερομηνίας δημοσίευσης, μελετήθηκαν οι περιλήψεις, οι εισαγωγές και τα αποτελέσματα της κάθε έρευνας προκειμένου να εξεταστεί η σχετικότητα και η αξιοπιστία τους. Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων βρέθηκε σχετική με τον θεματικό άξονα, ενώ 7 δημοσιεύσεις αποκλείστηκαν επειδή δεν ήταν σχετικές με την έρευνα, αναλυτικότερα οι 4 έκαναν αναφορά σε άλλα είδη παραγωγικών συστημάτων (ψηφιακός μετασχηματισμός για FMS, εικονική προτυποποίηση για FMS, πτυχές της ενσωμάτωσης 3 μεθόδων διαχείρισης, συνδυασμός 3 ειδών συστημάτων παραγωγής για την επίτευξη νέου παραδείγματος) οι οποίες είναι εκτός του θεματικού άξονα της παρούσας έρευνας αφού δεν αφορούν τον κλάδο του RMS. Επιπλέον, 1 δημοσίευση βρέθηκε διπλότυπη, 1 αφορά μεθοδολογίες διδασκαλίας για την εξοικείωση των φοιτητών με το αντικείμενο και 1 ερευνάει μεθόδους για τον σχεδιασμό του τελικού προϊόντος.

Από τα αποτελέσματα της σύνθετης αναζήτησης βρέθηκε ένα πλήθος δημοσιεύσεων (63) στο οποίο υπήρχε περιορισμένη πρόσβαση, δηλαδή ο ερευνητής δεν είχε πρόσβαση στο πλήρες κείμενο, αλλά μόνο στον *Τίτλο*, *Περίληψη* και *Λέξεις-κλειδιά*. Με σκοπό των εμπλουτισμό της παρούσας έρευνας, κρίθηκε σκόπιμο να αξιολογηθεί η αξιοπιστία τους και η συμβατότητα με την θεματολογία ώστε να ποσοτικοποιηθούν σύμφωνα με τις διαστάσεις της έρευνας που μπορεί να έχουν κάποια αντιστοίχιση. Όπως ήταν αναμενόμενο από τις περισσότερες δημοσιεύσεις μπόρεσαν να εξαχθούν συμπεράσματα μόνο περί του αντικειμένου της έρευνας, ενώ σε λίγες περιπτώσεις για το βιομηχανικό κλάδο ή το είδος της έρευνας. Σε περίπτωση ασάφειας ως προς την αντιστοίχιση, η δημοσίευση δεν ποσοτικοποιήθηκε σε όλες τις κατευθύνσεις, αφού ο ερευνητής δεν είχε τη δυνατότητα να επεξεργαστεί το πλήρες κείμενο για να βγάλει συμπεράσματα.

Από τις 63 δημοσιεύσεις που είχαν περιορισμένη πρόσβαση αποκλείστηκαν 4, μία από αυτές γιατί η έρευνα δεν σχετιζόταν με το θεματικό άξονα και οι άλλες 3 γιατί η περίληψή τους δεν περιείχε επαρκείς πληροφορίες για την εξαγωγή συμπερασμάτων και δεν υπήρχε πρόσβαση στο πλήρες κείμενο. Τελικά, μετά την εφαρμογή των κριτηρίων συμβατότητας με τη θεματολογία, απέμειναν 241 δημοσιεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του ερευνητικού πεδίου του RMS και των εφαρμογών του.

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία της έρευνας που έχει εφαρμοστεί **Σχήμα 4-1**.



Σχήμα 4-1 Μέθοδος Έρευνας

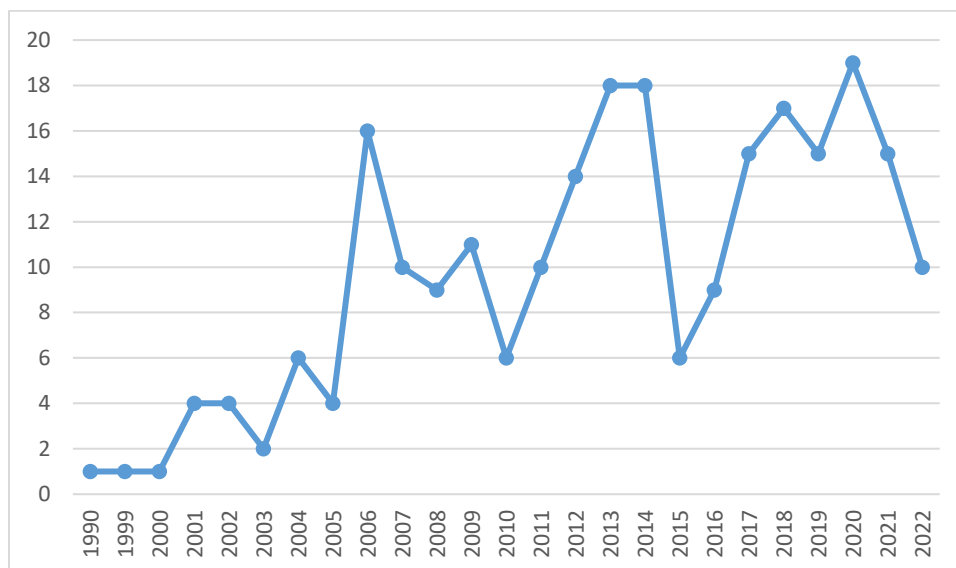
4.2 Ποσοτικά Στοιχεία Έρευνας

Από την ομαδοποίηση των 241 σχετικών δημοσιεύσεων εξήχθησαν στατιστικά αποτελέσματα τα οποία θα δειχθούν με την κατάλληλη γραφική αναπαράσταση και στη συνέχεια θα σχολιασθούν.

4.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

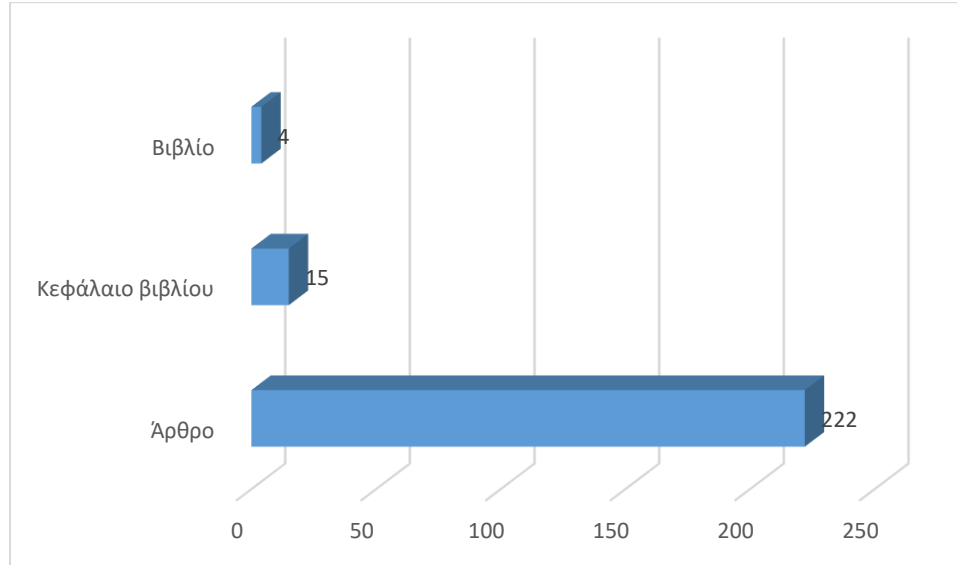
Αρχικά, οι δημοσιεύσεις ομαδοποιήθηκαν βάσει της χρονολογίας που δημοσιεύτηκαν. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4-2**, παρατηρείται ότι το 66% των αποτελεσμάτων έχει

δημοσιευτεί μετά το 2011. Το συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή την παρατήρηση είναι η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη εδραίωσης ευέλικτων και ανταποκρίσιμων συστημάτων παραγωγής, όπως είναι το RMS, για να ανταπεξέλθουν στις νέες απαιτήσεις της αγοράς. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο αριθμός δημοσιεύσεων ανά έτος δεν έχει αυστηρά αυξανόμενη τάση, καθώς τα έτη 2010 και 2015 παρουσιάζουν μικρό αριθμό δημοσιεύσεων σε σχέση με τα υπόλοιπα του εύρους 2006-2022. Λόγω των δύο μεμονωμένων περιπτώσεων, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ίσως οφείλεται σε παράγοντα τυχαιότητας.



Σχήμα 4-2 Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Έτος

Στην ομαδοποίηση με κριτήριο το είδος της δημοσίευσης φαίνεται (Σχήμα 4-3) ότι η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων είναι επιστημονικά άρθρα και μειοψηφία αποτελούν τα βιβλία και τα κεφάλαια βιβλίων.



Σχήμα 4-3 Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Είδος

4.2.2 Ποσοτικά Δεδομένα Βάσει των Κατευθύνσεων της Έρευνας

Ο καθορισμός ενός σαφούς πλαισίου έρευνας είναι απαραίτητος για να συστηματοποιήσει την ανασκόπηση. Για την κατηγοριοποίηση των άρθρων έχουν οριστεί 4 κατευθύνσεις σύμφωνα με τον θεματικό άξονα της έρευνας:

1. Αντικείμενο έρευνας
2. Βιομηχανικός κλάδος
3. Είδος έρευνας
4. Χαρακτηριστικά του RMS που χρησιμοποιεί

Κάθε κατεύθυνση είναι πολυδιάστατη, δηλαδή διακρίνονται υποκατηγορίες με τις οποίες μπορεί να είναι σχετική η κάθε δημοσίευση. Μετά από μελέτη του εκτενούς κειμένου, έχει προσπαθήσει να γίνει αντιστοίχιση κάθε δημοσίευσης στις πιο αντιπροσωπευτικές υποκατηγορίες για αυτό, π.χ. στην διάσταση 4. *Χαρακτηριστικά του RMS που χρησιμοποιεί* για να γίνει αντιστοίχιση του άρθρου με ένα χαρακτηριστικό βασική προϋπόθεση είναι, όχι μόνο να αναφέρεται το χαρακτηριστικό στο πλήρες κείμενο, αλλά και να γίνεται ουσιαστική χρήση του για την ανάπτυξη της εκάστοτε έρευνας. Επίσης να σημειωθεί ότι κάποιες

δημοσιεύσεις μπορεί να έχουν αντιστοίχιση σε παραπάνω από μία υποκατηγορίες και άλλες μπορεί να μην έχουν αντιστοίχιση σε κάποια κατεύθυνση.

4.2.2.1 Αντικείμενο Έρευνας

Η 1^η κατεύθυνση αφορά το αντικείμενο της έρευνας, πιο συγκεκριμένα τις *μεθοδολογίες* και τις *τεχνολογίες* που αναπτύχθηκαν. Με σκοπό να γίνει αναλυτικότερη κατηγοριοποίηση των άρθρων έχουν καθοριστεί 3 υποκατηγορίες.

1.1. Διαμόρφωση στο φυσικό επίπεδο

Σε αυτή την υποκατηγορία περιλαμβάνονται όλες οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για:

- Τη διάταξη του εξοπλισμού (προσθήκη/αφαίρεση/αναδιάταξη μηχανών και μονάδων μεταφοράς υλικών)
- Το σχεδιασμό και την επιλογή διαμόρφωσης των μηχανών
- Την επιλογή τύπου μηχανής (RMT, CNC, DMT)

1.2. Διαμόρφωση στο λογικό επίπεδο

Αυτή η υποκατηγορία αφορά όλες τις μεθοδολογίες για:

- Τον προγραμματισμό/αναπρογραμματισμό των διεργασιών (δρομολόγηση παραγωγής, αλληλουχία διεργασιών)
- Τη δημιουργία οικογένειας προϊόντων (σχεδιασμός και ομαδοποίηση προϊόντων)
- Το σχέδιο ελέγχου ποιότητας (σημεία επιθεώρησης, πολιτική διαχείρισης ποιότητας, συμμόρφωση με τις προδιαγραφές, επιστροφή σκάρτων προϊόντων)
- Την οργάνωση του συστήματος (διεπαφή ανθρώπου-μηχανής, ασφάλεια συστήματος, θέματα εργονομίας, βιωσιμότητα)

1.3. Τεχνολογίες

Η υποκατηγορία αυτή περιλαμβάνει:

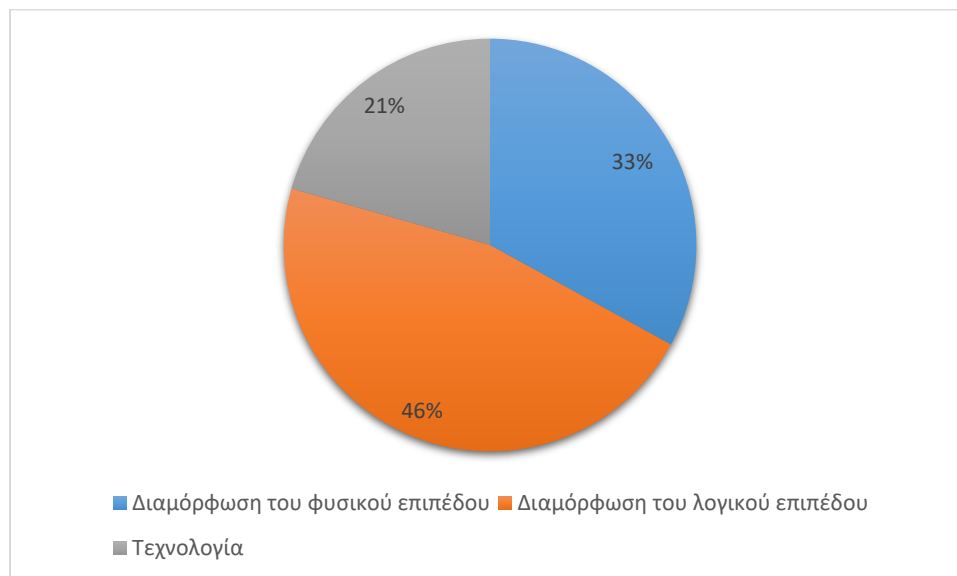
- Στοιχεία εξοπλισμού σε μορφή πρωτοτύπων (εξέλιξη υπαρχόντων μηχανών, ανάπτυξη πρωτοτύπου για ειδικές εφαρμογές)
- Πακέτα λογισμικού
- Σχεδιασμός αναδιαμορφώσιμων μηχανών (μεθοδολογίες και τεχνικές προδιαγραφές)

Ακολουθεί **Σχήμα 4-4** που φαίνονται οι υποκατηγορίες και οι επιμέρους ομαδοποιήσεις της 1^{ης} κατεύθυνσης της έρευνας.



Σχήμα 4-4 Αντικείμενο Έρευνας

Μετά από τη μελέτη του εκτενούς κειμένου των δημοσιεύσεων έγινε αντιστοίχισή τους στις πιο αντιπροσωπευτικές υποκατηγορίες. Στο τέλος μετρήθηκαν οι αντιστοιχίσεις, ποσοτικοποιήθηκαν και βάσει των αποτελεσμάτων δείχθηκαν σχηματικά.



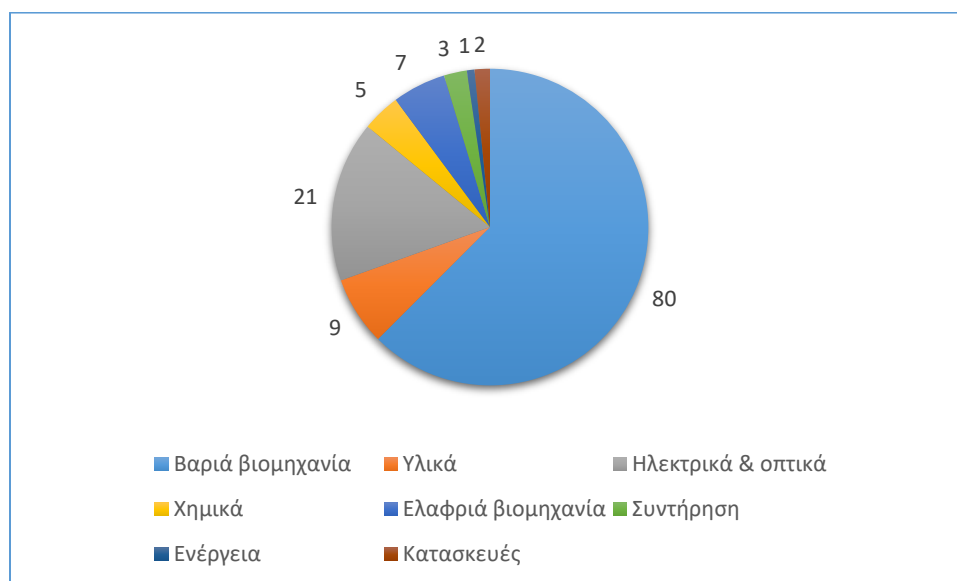
Σχήμα 4-5 Ποσοστό Δημοσιεύσεων βάσει Αντικειμένου Έρευνας

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-5, η πλειοψηφία των άρθρων (σχεδόν το 50%) αφορά μεθοδολογίες Διαμόρφωσης του λογικού επιπέδου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο γιατί τα RMS είναι πολύπλοκα συστήματα (Huang et al. 2018), δηλαδή αποτελούνται από πληθώρα μεταβλητών στοιχείων που πρέπει να συνεργάζονται βέλτιστα

για να επιτευχθούν οι στόχοι της παραγωγικότητας. Συνεπώς απαιτείται εξέλιξη των μεθοδολογιών που υποστηρίζουν στη λήψη αποφάσεων οργάνωσης και διαχείρισης του συστήματος. Επόμενο πιο διαδεδομένο θέμα έρευνας είναι οι διαδικασίες για τη *Διαμόρφωση του φυσικού επιπέδου*, δηλαδή προσπαθούν να επιλύσουν το πρόβλημα σχεδιασμού και αναδιαμόρφωσης του εξοπλισμού (εγκαταστάσεις, μηχανές κ.λπ.). Τέλος, οι έρευνες που αναπτύσσουν καινοτόμες *Τεχνολογίες* και μεθοδολογίες σχεδιασμού αναδιαμορφώσιμων μηχανών έχουν τις λιγότερες αναφορές. Σε αυτό ίσως οφείλεται η απουσία ολοκληρωμένων RMS, με την έννοια ότι η πλειοψηφία των παραγωγικών συστημάτων που ακολουθούν τις βασικές αρχές του RMS δεν είναι πλήρως εξοπλισμένες με τις τελευταίες τεχνολογίες (π.χ. χρησιμοποιούν εργαλειομηχανές CNC και όχι αναδιαμορφώσιμες εργαλειομηχανές). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανατροφοδότηση από τη λειτουργία και τις ανάγκες που αναπτύσσονται από τη χρήση αναδιαμορφώσιμων στοιχείων εξοπλισμού ή λογισμικού. Επίσης, είναι αναμενόμενο πως κάποιες εταιρείες δεν δημοσιεύουν πρωτότυπα τεχνολογίας που έχουν αναπτύξει τα οποία τους δίνουν πλεονέκτημα απέναντι στον ανταγωνισμό.

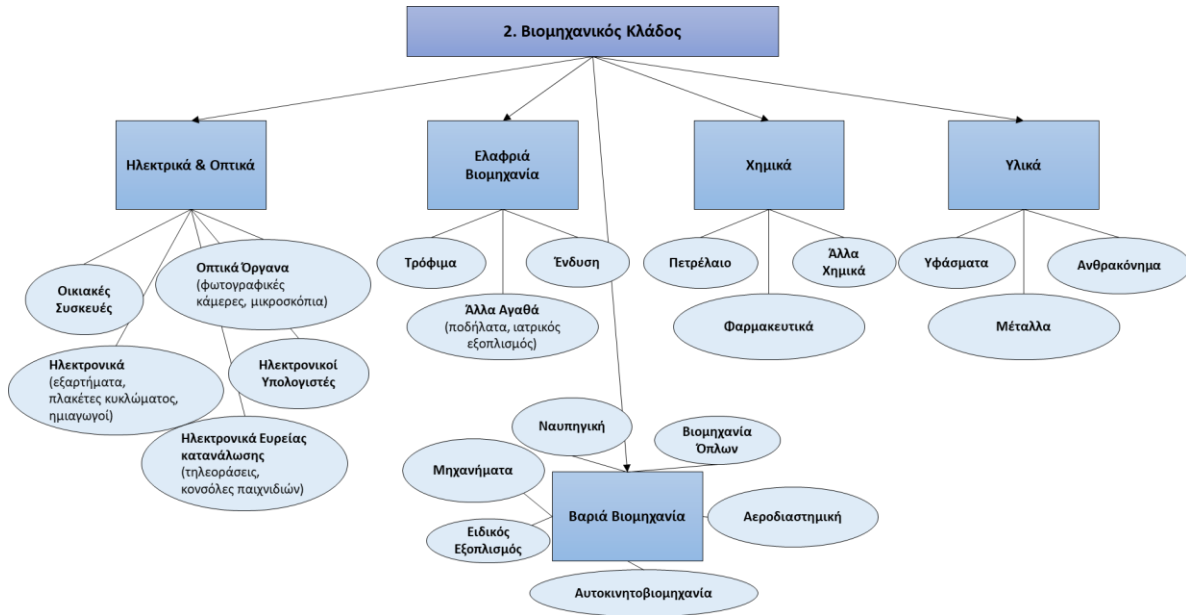
4.2.2.2 Βιομηχανικός Κλάδος

Επόμενη ποσοτικοποίηση των άρθρων έχει γίνει στην κατεύθυνση 2: *Βιομηχανικός κλάδος*. Η κατηγοριοποίηση των βασικών βιομηχανικών κλάδων προέκυψε από δεδομένα της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής. Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 4-6**, παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των εφαρμογών του RMS είναι στον κλάδο «Βαριά βιομηχανία» και σε δεύτερη θέση είναι οι εφαρμογές στον κλάδο «Ηλεκτρικά & οπτικά».



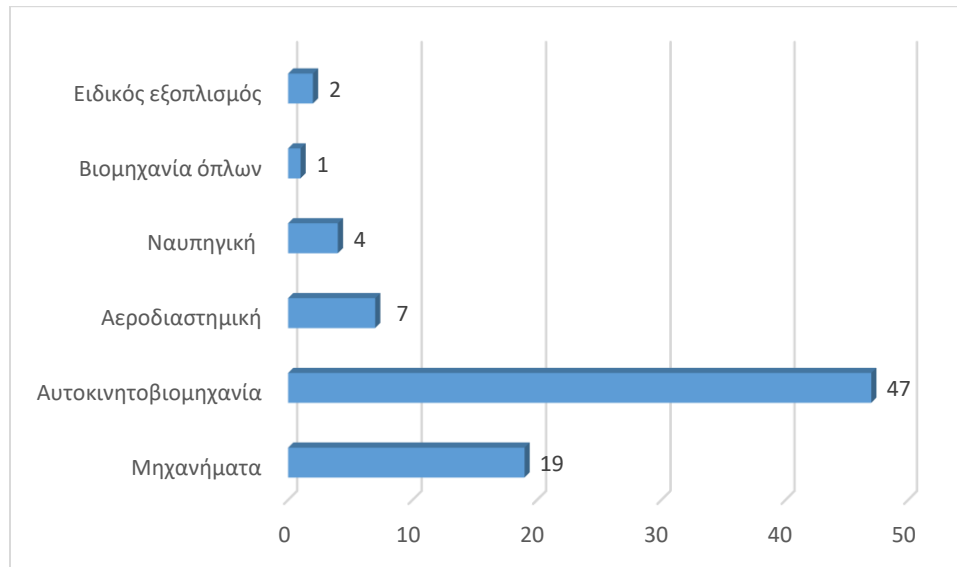
Σχήμα 4-6 Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Βιομηχανικό Κλάδο

Είναι χρήσιμο να αναφερθούν οι πιο διαδεδομένες υποκατηγορίες των δευτερευόντων κλάδων που δεν θα αναλυθούν **Σχήμα 4-7**.



Σχήμα 4-7 Βιομηχανικός Κλάδος

Είναι ωφέλιμο να αναλυθεί περαιτέρω ο κλάδος της βαριάς βιομηχανίας επειδή είναι αυτός που αναφέρεται πιο συχνά στη βιβλιογραφία. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4-8** η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων αφορά την αυτοκινητοβιομηχανία, αφού είναι και ο κλάδος για τον οποίο προορίστηκε η ιδέα του RMS (Koren et al. 1999). Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι από τους σημαντικότερους παραγωγικούς κλάδους της βαριάς βιομηχανίας και το αγοραστικό κοινό είναι επίσης εκτενέστατο. Κάθε χρόνο εισάγονται στην αγορά νέα προϊόντα, αλλάζουν οι προδιαγραφές όσο αφορά τους ρύπους και τον τύπο καυσίμου και ο ανταγωνισμός είναι πολύ μεγάλος μεταξύ των διαφόρων εταιριών. Είναι αναγκαίο αυτού του είδους οι επιχειρήσεις να έχουν ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής που μπορεί να ανταποκριθεί σε απότομες αλλαγές στην αγορά γρήγορα και οικονομικά. Συμπληρωματικός κλάδος της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι η παραγωγή μηχανημάτων όπως αναδιαμορφώσιμες εργαλειομηχανές και ρομποτικά συστήματα, που παρέχουν τη δυνατότητα αυτοματοποίησης σε μεγάλα παραγωγικά συστήματα.

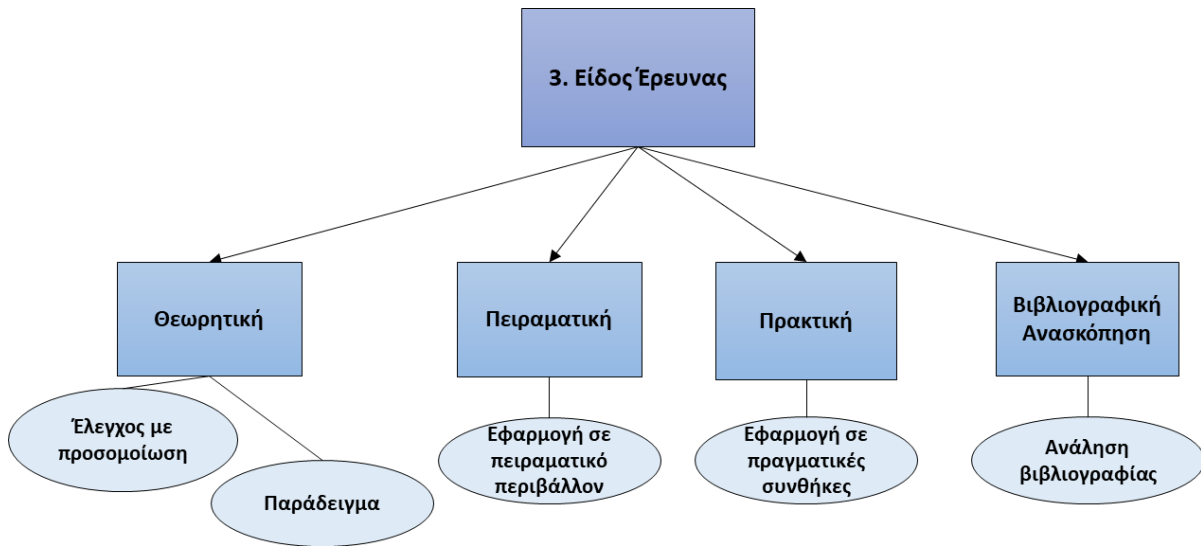


Σχήμα 4-8 Αριθμός Δημοσιεύσεων στον Κλάδο της Βαριάς Βιομηχανίας

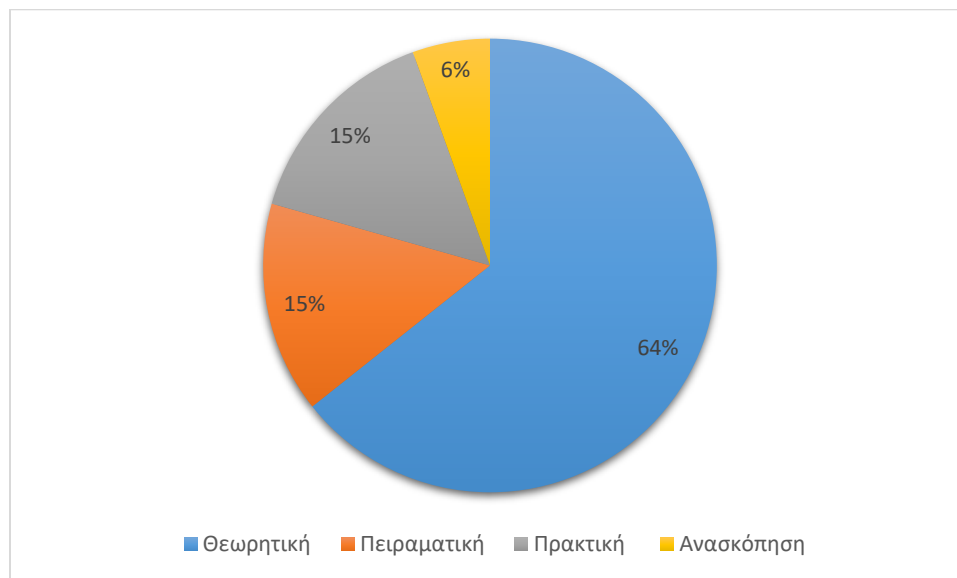
4.2.2.3 Είδος Έρευνας

Η κατεύθυνση 3: «Είδος έρευνας» αφορά το είδος της εκάστοτε έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί για τη σύνθεση των άρθρων (Σχήμα 4-9). Το είδος της έρευνας μπορεί να είναι:

- *Θεωρητική*: ανάπτυξη μεθοδολογίας ή τεχνολογίας και έλεγχος της απόδοσης/εγκυρότητάς της μέσω προσομοίωσης ή παραδειγμάτων.
- *Πειραματική*: έλεγχος μέσω ανάπτυξης πρωτοτύπου και εφαρμογή σε εργαστηριακό περιβάλλον.
- *Πρακτική*: υλοποίηση της μεθόδου σε βιομηχανικό περιβάλλον σε πραγματικές συνθήκες.
- *Ανασκόπηση*: ανάλυση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 4-9 Είδος Έρευνας



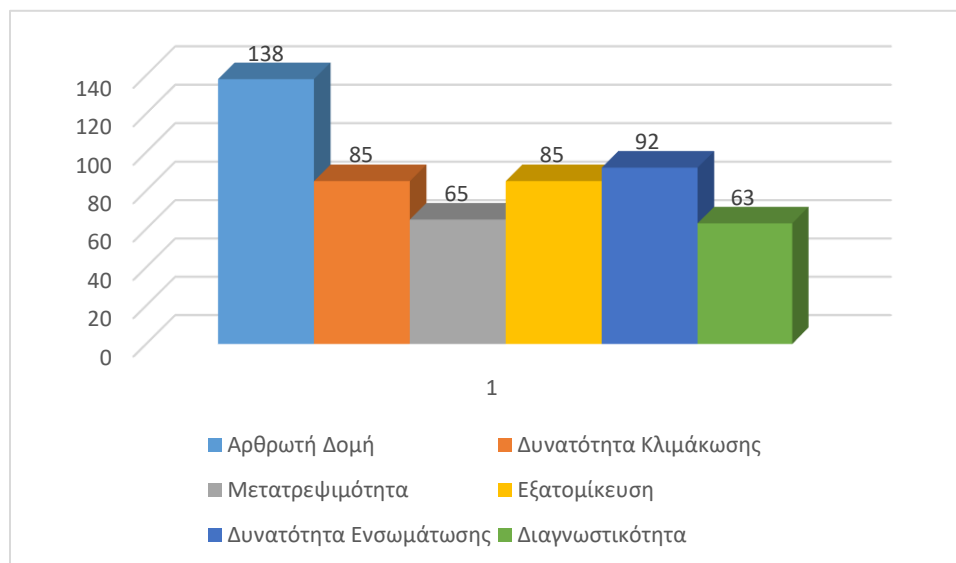
Σχήμα 4-10 Ποσοστό Δημοσιεύσεων βάσει Είδους Έρευνας

Σε αυτή την έρευνα γίνεται επίσης προσπάθεια αξιολόγησης της πρακτικότητας των μεθοδολογιών που έχουν προταθεί βάσει του είδους έρευνας που έχει προηγηθεί. Οι πιο χρήσιμες μεθοδολογίες είναι αυτές που έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες, οπότε και η λειτουργικότητά τους και τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι επικυρωμένα. Όπως ήταν αναμενόμενο, και υποστηρίζει προηγούμενη πρόταση περί απουσίας ολοκληρωμένων

RMS (βλ. 4.2.2.1), η πλειοψηφία των ερευνών είναι θεωρητικές (Σχήμα 4-10) που σημαίνει ότι αποτελούν πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση και εφαρμογή.

4.2.2.4 Χαρακτηριστικά του RMS που χρησιμοποιούνται

Ύστερα από την αναζήτηση στο πλήρες κείμενο των δημοσιεύσεων έχει γίνει ποσοτική ανάλυση στην κατεύθυνση 4: «Χαρακτηριστικά του RMS που χρησιμοποιούνται» από την εκάστοτε έρευνα. Από την ποσοτικοποίηση αυτή (Σχήμα 4-11) εξάγονται συμπεράσματα ως προς τη χρησιμότητα των βασικών χαρακτηριστικών για την ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών και τεχνολογιών.



Σχήμα 4-11 Πλήθος Αναφορών στα Χαρακτηριστικά του RMS

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει γίνει προσπάθεια ποσοτικοποίησης μόνο των χαρακτηριστικών που γίνεται ουσιαστική χρήση τους στην έρευνα και όχι αυτών που γίνεται μία αναφορά στις πρώτες ενότητες της έρευνας που γίνεται εισαγωγή στο RMS. Παρατηρείται λοιπόν ότι κυριότερο χαρακτηριστικό, που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάπτυξη μιας καινοτόμας μεθοδολογίας ή τεχνολογίας, είναι η αρθρωτή δομή, η οποία είναι απόλυτα συνδεδεμένη με την ικανότητα ενός συστήματος να αναδιαμορφώνεται. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα σύστημα, μηχανή ή στοιχείο λογισμικού δεν έχει το χαρακτηριστικό της αρθρωτή δομής, δηλαδή να δεν έχει τη δυνατότητα να αλλάξει με ευκολία τις δομικές του μονάδες, δεν μπορεί να είναι και αναδιαμορφώσιμο. Σε δεύτερο επίπεδο σημαντικότητας είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης, η δυνατότητα κλιμάκωσης και η εξατομίκευση. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης συνδέεται άμεσα με την ανάγκη για ένα

παραγωγικό σύστημα που έχει τη δυνατότητα να εξελίσσεται τεχνολογικά με την πάροδο του χρόνου ώστε να είναι σε θέση να καλύπτει τις ανάγκες της αγοράς σε νέα προϊόντα. Η δυνατότητα κλιμάκωσης και η εξατομίκευση είναι πολύ στενά συνδεδεμένες με τις ανάγκες της αγοράς, οπότε και δικαιολογείται αυτή η θέση. Η *εξατομίκευση* είναι συνδεδεμένη με την ανάγκη ενός συστήματος να προσαρμόζεται στις ανάγκες για την παραγωγή προϊόντων από μια διαφορετική οικογένεια προϊόντων. Δευτερεύοντα χαρακτηριστικά είναι η *μετατρεψιμότητα* και η *δυνατότητα διάγνωσης*.

4.3 Ποιοτική Ανάλυση

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν τα σημαντικότερα σημεία από τη βιβλιογραφία για κάθε κατεύθυνση που έχει ακολουθήσει η έρευνα και στο τέλος θα καταγραφούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

4.3.1 Αντικείμενο Έρευνας

4.3.1.1 Διαμόρφωση στο Φυσικό Επίπεδο

Υστερα από την επεξεργασία των άρθρων μπορεί να γίνει ένας διαχωρισμός των μεθοδολογιών που προτείνονται, σύμφωνα με τους Andersen et al. (2017), σε κυκλικές μεθόδους επίλυσης και σταδιακού σχεδιασμού. Στην πράξη, οι μεθοδολογίες σχεδιασμού ακολουθούν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις και λαμβάνουν υπόψη διάφορους παράγοντες για την επίλυση του σχεδιαστικού προβλήματος. Επιπλέον πολλά άρθρα αναπτύσσουν συνδυαστικές μεθοδολογίες για τη ταυτόχρονη διαμόρφωση στο φυσικό και λογικό επίπεδο. Η χρήση αυτού του διαχωρισμού κρίνεται ότι βοηθάει την κατηγοριοποίηση των μεθοδολογιών.

Μεθοδολογίες σταδιακού σχεδιασμού

Στις μεθοδολογίες σταδιακού σχεδιασμού γίνεται εστίαση στις δομικές πτυχές που σχετίζονται με τη διαδικασία σχεδιασμού, όπου η μεθοδολογία περιγράφεται μέσω διαφορετικών διαδοχικών φάσεων που καταλήγουν σε ένα συγκεκριμένο στάδιο του σχεδιασμού. Η πορεία της επίλυσης που ακολουθούν όπως και τα ενδιάμεσα στάδια μπορεί να παρουσιάζουν παρεκκλίσεις, αλλά τα πιο κοινά ενδιάμεσα στάδια που παρατηρούνται είναι ο σχεδιασμός των προδιαγραφών, η ανάπτυξη ιδεών, ο προκαταρκτικός σχεδιασμός και ο λεπτομερής σχεδιασμός.

Οι Beauville dit Eynaud et al. (2022) δημιούργησαν μια γενική μεθοδολογία αποτελούμενη από 5 βήματα και ακολουθεί τις βασικές αρχές σχεδιασμού του RMS. Στο 1^ο βήμα γίνεται ο στρατηγικός σχεδιασμός από τον οποίο πηγάζει το πλάνο ανάπτυξης. Στο βήμα αυτό γίνεται

χρηματοοικονομική βελτιστοποίηση και χρησιμοποιώντας την αναλυτική ιεραρχική επεξεργασία γίνεται ποιοτική ανάλυση της διαμόρφωσης βάσει ικανότητας αντίδρασης του RMS, του κόστους και άλλων παραγόντων. Στο 2^ο βήμα γίνεται ο προσδιορισμός των απαιτήσεων και των στοιχείων του RMS που θα χρησιμοποιηθούν (προκαταρκτικός σχεδιασμός). Σε αυτό το στάδιο προσδιορίζονται οι οικογένειες προϊόντων και καθορίζεται ο βαθμός και ο τύπος την αναδιαμορφωσιμότητας που είναι αναγκαίος. Ύστερα πραγματοποιείται ο εξελιγμένος σχεδιασμός όπου αναπτύσσονται τα δομοστοιχεία, αυτό εμπεριέχει τον καθορισμό της διεπαφής του συστήματος, τα εργαλεία και το σύστημα ελέγχου. Στο επόμενο βήμα γίνεται η υλοποίηση του σχεδιασμού και η εκκίνηση της παραγωγικής διαδικασίας. Στην περίπτωση που στο μέλλον χρειαστεί να γίνει αναδιαμόρφωση του συστήματος, αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί.

Μία παρόμοια μεθοδολογία με 5 βήματα ανέπτυξαν και οι Andersen et al. (2017). Η διαφορά της είναι ότι εντάσσουν στη μεθοδολογία και τη διαδικασία της αναδιαμόρφωσης ως τελευταίο βήμα. Ο σκοπός είναι από τη στιγμή που θα υλοποιηθεί η παραγμένη διαμόρφωση και θα ξεκινήσει η παραγωγική διαδικασία, πρέπει να συνεχίζεται η αναζήτηση της βέλτιστης διαμόρφωσης βάσει των προβλέψεων για την εξερχόμενη ποιότητα και τους επερχόμενους ανασχεδιασμούς προϊόντων και διαδικασιών.

Οι Saxena and Jain (2012) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία τριών φάσεων για την επιλογή διαμόρφωσης του RMS που λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικά όπως την γραμμή παραγωγής με πολλά προϊόντα, τον αριθμό των κέντρων εργασίας, την επιλογή τύπου μηχανής, τη διαμόρφωσή της, τον αριθμό των μηχανών σε κάθε κέντρο εργασίας, την επιλογή μηχανής σε όλα τα κέντρα εργασίας κ.λπ. αλλά και διάφορους περιορισμούς και την ικανοποίηση επιδόσεων. Η 1^η φάση αποσκοπεί στον προσδιορισμό της εξέλιξης του RMS, ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος λειτουργίας, συντήρησης και αναδιαμόρφωσης. Στην 2^η φάση αναπτύσσονται εναλλακτικές διαμορφώσεις και η 3^η φάση επιλέγεται η βέλτιστη/κοντά στη βέλτιστη διαμόρφωση για το RMS στην επιθυμητή περίοδο, λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη διαμόρφωση.

Οι Maganha, Silva, and Ferreira (2021) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία 4^{ων} βημάτων για την ενσωμάτωση των βασικών χαρακτηριστικών της αναδιαμορφωσιμότητας. Η μεθοδολογία αυτή παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός συστήματος και αποτελεί μία βάση για να βοηθήσει στη μετατροπή των συμβατικών συστημάτων παραγωγής σε RMS.

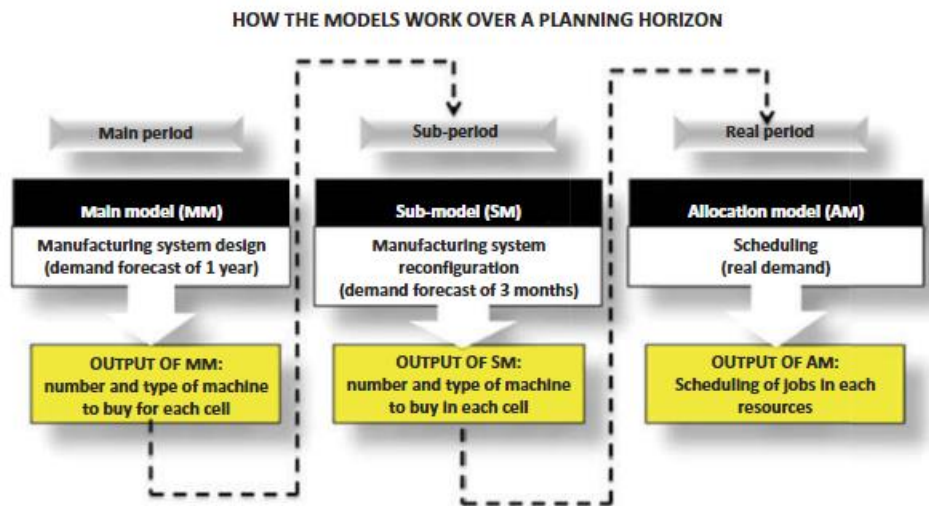
Οι Kaid et al. (2020) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία υποστήριξης στην μοντελοποίηση, τον έλεγχο και την αξιολόγηση της διαμόρφωσης του RMS χρησιμοποιώντας τη μέθοδο *Intelligent Colored Token Petri Nets* (ICTPN). Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εξάγει εναλλακτική διαδικασία παραγωγής ή μοντέλο για την αναδιαμόρφωση του συστήματος σε

περιπτώσεις που: μία μηχανή παρουσιάζει σφάλμα, προστεθεί ένα νέο προϊόν ή νέα μηχανή ή τέλος κάποιο τεμάχιο απαιτεί συμπληρωματική κατεργασία λόγω μη συμμόρφωσής του με τις προδιαγραφές. Η μέθοδος Petri nets χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τους Henry, Zamaï, and Jacomino (2012); Hsieh (2018); Jiang et al. (2017); Zhang and Rodrigues (2009). Οι πρώτοι ανέπτυξαν μια μέθοδο σχεδιασμού διαμόρφωσης 4^{ων} βημάτων που ελαχιστοποιεί το χρόνο προετοιμασίας, ικανοποιεί τους στόχους εντολών παραγωγής αλλά η διαμόρφωση που προκύπτει δεν είναι η βέλτιστη, όμως είναι αποτέλεσμα συμβιβασμού μεταξύ της πολυπλοκότητας της δομής του συστήματος και της υπολογιζόμενης απόδοσης της βέλτιστης διαμόρφωσης.

Οι Mittal, Kumar, and Jain (2018) πρότειναν η επιλογή μιας νέας διαμόρφωσης να γίνεται βάσει της προηγούμενης διαμόρφωσης του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αλλαγής και συνεπώς το κόστος αλλαγής.

Οι Abdi and Labib (2017) σε μία μεθοδολογία που ανέπτυξαν για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση των αναδιαμορφώσεων του συστήματος που απαιτούνται λόγω αλλαγών στις οικογένειες προϊόντων, προτείνουν την προετοιμασία της αναδιαμόρφωσης αρκετά πριν τη λήξη του κύκλου ζωής ενός υφιστάμενου προϊόντος για τη μετάβαση από μια οικογένεια προϊόντων σε μια άλλη.

Οι Renna and Ambrico (2015) ανέπτυξαν μια διαδικασία μοντελοποίησης ενός κυψελοειδούς συστήματος παραγωγής (CRMS). Η διαδικασία αποτελείται από το κύριο μοντέλο το οποίο ασχολείται με τον σχεδιασμό των κυψελίδων σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα προγραμματισμού (τάξης ετών). Η αντικειμενική συνάρτησή του πρέπει να ελαχιστοποιήσει τα αναμενόμενα κόστη διακίνησης υλικών και το κόστος επένδυσης σε μηχανές. Η έξοδος του κύριου μοντέλου είναι η είσοδος του υπομοντέλου που λειτουργεί σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα (π.χ. 3 μήνες). Το υπομοντέλο είναι μοντέλο βελτιστοποίησης με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους και της ικανοποίησης της ζήτησης των πελατών σε κάθε υποπερίοδο. Τέλος το μοντέλο κατανομής, κατανέμει τις εργασίες στις κυψελίδες με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους. Παρακάτω φαίνεται η ροή δεδομένων μεταξύ των μοντέλων (**Σχήμα 4-12**).



Σχήμα 4-12 Ροή Δεδομένων μεταξύ των Μοντέλων
(Renna and Ambrico 2015)

Μία μεθοδολογία που μπορεί να βοηθήσει στη φάση του προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι αυτή που ανέπτυξαν οι Andersen et al. (2018). Αυτή η μεθοδολογία μπορεί να βοηθήσει στην λήψη αποφάσεων στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού και στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας του προτεινόμενου σχεδιασμού. Προτείνει ένα ποσοτικό μοντέλο το οποίο αξιολογεί την παρούσα αξία των κεφαλαιακών και λειτουργικών δαπανών των υποψήφιων σχεδιασμών και βοηθάει στην λήψη απόφασης βάση του χαμηλότερου κόστους.

Κυκλικές μεθοδολογίες σχεδιασμού

Στις κυκλικές μεθοδολογίες σχεδιασμού η διαδικασία επίλυσης ακολουθεί κυκλική πορεία, δηλαδή όταν βρεθεί μια λύση του προβλήματος αυτή δοκιμάζεται και αξιολογείται ώστε να εντοπισθούν πιθανές διορθωτικές ενέργειες που πρέπει να γίνουν. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος η μεθοδολογία πρέπει να επαναληφθεί πολλές φορές μέχρι να συγκλίνει. Τα βήματα που παρουσιάζουν οι μεθοδολογίες αυτού του τύπου είναι η ανάλυση των λειτουργικών απαιτήσεων ώστε να καταλήξει στον καθορισμό των προδιαγραφών, σύνθεση προτάσεων σχεδιασμού, προσομοίωση και αξιολόγηση των προτάσεων βάσει των προδιαγραφών και τελική απόφαση για τη βέλτιστη πρόταση σχεδιασμού.

Το πρώτο στάδιο κατά την πρώτη διαμόρφωση ή την αναδιαμόρφωση ενός RMS είναι ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του παραγωγικού συστήματος, δηλαδή η αναδιάταξη των

παραγωγικών πόρων και των υποστηρικτικών συστημάτων. Τα RMS είναι πολύπλοκα συστήματα που μπορεί να παράγουν πολλά προϊόντα ταυτόχρονα και μπορούν να ανταποκριθούν σε αλλαγές των αναγκών της αγοράς. Είναι απαραίτητο λοιπόν να έχουν μια ανοιχτή αρχιτεκτονική, που σημαίνει ότι οποιοδήποτε στοιχείο απαιτείται πρέπει να μπορεί να μετακινηθεί σε άλλη θέση μέσα στο εργοστάσιο. Η επιλογή της βέλτιστης αρχιτεκτονικής συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η παραγωγικότητα του συστήματος, το κόστος επένδυσης, η εξερχόμενη ποιότητα και η πολιτική της εταιρείας.

Από πλευράς παραγωγικότητας, αν το σύστημα χειρισμού υλικών και το σύστημα παραγωγής είναι απολύτως αξιόπιστα, τότε η αρχιτεκτονική του RMS θα είναι καλύτερη από την αρχιτεκτονική μιας γραμμής παραγωγής λόγω της ευελιξίας της. Ωστόσο οι γερανογέφυρες και τα RMT υπάρχει περίπτωση να παρουσιάσουν αστοχίες, γεγονός που μειώνει την παραγωγικότητα του συστήματος. Ο Gu (2022) ανέπτυξε μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής ενός RMS που αποτελείται από εργαλειομηχανές και γερανογέφυρες με γεωμετρική αξιοπιστία και οι αστοχίες τους εξαρτώνται από χρονικούς και λειτουργικούς παράγοντες. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό είναι ο βαθμός κλιμάκωσης και η μετατρεψιμότητα του συστήματος, οι οποίοι επηρεάζουν την ικανότητα διαμόρφωσης του συστήματος στο χρονικό ορίζοντα της ζωής του.

Ακολουθώντας την ίδια κατεύθυνση οι Farid and Ribeiro (2015) δημιούργησαν μια μεθοδολογία αξιωματικού σχεδιασμού αρχιτεκτονικής και συμπεριέλαβαν την μετρούμενη αναδιαμορφωσιμότητα στους παράγοντες. Οι Al-Zaher, Elmaraghy, and Pasek (2013) χρησιμοποίησαν τις ίδιες αρχές και ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για συστήματα πλαισίωσης αυτοκινήτων.

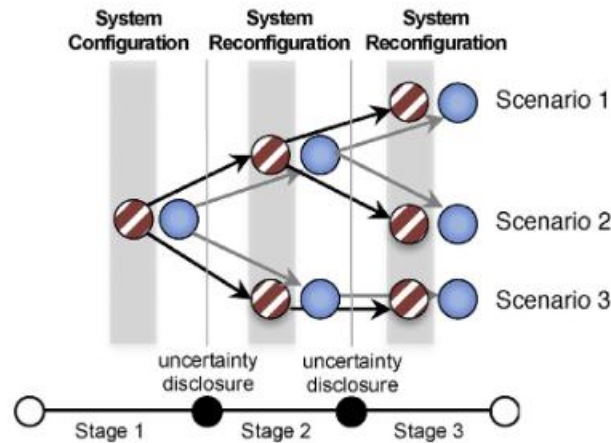
Ο I. H. Garbie (2014) εισήγαγε την έννοια του *αναγκαίου επιπέδου αναδιαμόρφωσης*, η μέτρηση του οποίου βασίζεται στην ευελιξία των παραγωγικών επιχειρήσεων και την τρέχουσα κατάσταση του σχεδιασμού των παραγωγικών τους συστημάτων. Η διαδικασία για το σχεδιασμό και την εφαρμογή της αναδιαμόρφωσης που πρότεινε είναι αρχικά η ποσοτικοποίηση του αναγκαίου επιπέδου αναδιαμόρφωσης, εφαρμογή μεθοδολογίας αναδιαμόρφωσης και τέλος αξιολόγηση της επίδοσης. Η μεθοδολογία αναδιαμόρφωσης που ανέπτυξε έχει ως σκοπό την επιλογή ενός συστήματος με μικρή πολυπλοκότητα στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, ενώ λαμβάνει υπόψη κριτήρια όπως το μέγεθος και ο τύπος του παραγωγικού συστήματος, το σύστημα χειρισμού υλικών και η τρέχουσα αρχιτεκτονική του συστήματος.

Λόγω της αβέβαιης ζήτησης και της δυσκολίας ποσοτικοποίησης των κριτηρίων διαμόρφωσης, οι εναλλακτικές διαμορφώσεις πρέπει να αξιολογούνται βάσει πολλαπλών κριτηρίων για την κάθε οικογένεια προϊόντων (Abdi et al. 2018). Οι Battaïa, Dolgui, and

Guschinsky (2017) πρότειναν μια προσέγγιση για την υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων στο σχεδιασμό ενός αναδιαμορφώσιμου συστήματος περιστροφικής κατεργασίας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή διαφόρων οικογενειών εξαρτημάτων. Η μεθοδολογία επιτρέπει τη λήψη αποτελεσματικών αποφάσεων σχετικά με τον προσανατολισμό των τεμαχίων, την επιλογή των δομοστοιχείων και τη διαμόρφωση/αναδιαμόρφωση των θέσεων εργασίας ανάλογα με τις οικογένειες προϊόντων που πρόκειται να παραχθούν.

Οι Pal Singh, Madan, and Singh (2021) προσδιόρισαν τα 9 σημαντικότερα κριτήρια για την αξιολόγηση της επίδοσης μιας διαμόρφωσης για το RMS, πιο συγκεκριμένα: το συνολικό κόστος διαμόρφωσης, ο χρόνος αναδιαμόρφωσης, ο χρόνος για την παράδοση του προϊόντος, η προσπάθεια που απαιτείται για την αναδιαμόρφωση, η μέγιστη παραγωγικότητα του συστήματος, η αξιοπιστία, το ποσοστό αξιοποίησης του συστήματος, η διαθεσιμότητα του συστήματος και η επιχειρησιακή ικανότητα. Ύστερα συνέθεσαν μια CPM μεθοδολογία που χρησιμοποιεί την υποκειμενική ή αντικειμενική βαρύτητα που προσάπτεται σε κάθε κριτήριο και τελικά μπορεί να αξιολογήσει και να επιλέξει την ιδανική διαμόρφωση του συστήματος.

Οι μεθοδολογίες σχεδιασμού για συστήματα εστιασμένης ευελιξίας βασίζονται στη σεναριακή μοντελοποίηση και τον στοχαστικό προγραμματισμό. Οι Corani and Urgo (2015) προτείνουν τη δημιουργία ενός δέντρου εναλλακτικών σεναρίων που λαμβάνει υπόψη την εξέλιξη που μπορεί να ακολουθήσει η αγορά στο μέλλον και τις πιθανές αναδιαμορφώσεις του συστήματος παραγωγής. Στην βάση του δέντρου βρίσκεται η τρέχουσα διαμόρφωση του συστήματος και σε κάθε διακλάδωση το κάθε στάδιο εξέλιξης της αγοράς και η προβλεπόμενη αναδιαμόρφωση του συστήματος (**Σχήμα 4-13**). Με αυτό το εργαλείο μπορεί να γίνει αξιολόγηση της βιωσιμότητας στο χρονικό ορίζοντα της ζωής του συστήματος και να βοηθήσει την επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης. Αυτή η μεθοδολογία προϋποθέτει βέβαια ότι μπορεί να γίνει πρόβλεψη της ζήτησης και των αναγκών της αγοράς.



Σχήμα 4-13 Πολυεπίπεδος Στοχαστικός Προγραμματισμός
(Corani and Urgo 2015)

Συνδυασμός των δύο προηγούμενων μεθοδολογιών αποτελεί η μεθοδολογία που ανέπτυξαν οι Moghaddam et al. (2020) η οποία αποτελείται από δύο προσεγγίσεις. Με την 1^η προσέγγιση το σύστημα σχεδιάζεται βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών κατά την περίοδο της αναδιαμόρφωσης. Σε δεύτερη φάση το σύστημα αναδιαμορφώνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αγοράς σε κάθε επόμενη περίοδο. Κατά την 2^η προσέγγιση καθορίζονται όλες οι αποφάσεις αναδιαμόρφωσης για τις επόμενες περιόδους βάσει του ελαχίστου κόστους και την πρόγνωση της ζήτησης. Η 2^η προσέγγιση αποδεικνύεται πιο αποδοτική από πλευράς κόστους μακροπρόθεσμα, ενώ η 1^η προσέγγιση είναι πιο πρακτική λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα που ενέχει το μέλλον της αγοράς.

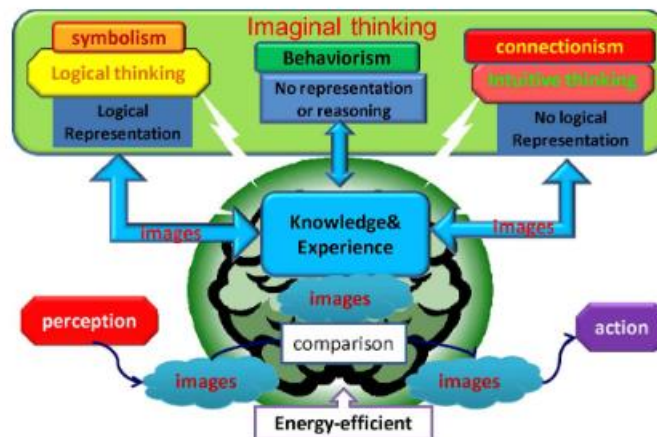
Επιλογή μηχανής

Οι Bensmaine, Dahane, and Benyoucef (2013) πρότειναν μια μέθοδο για την επιλογή των μηχανών που θα πραγματοποιήσουν τις απαιτούμενες διεργασίες για την παραγωγή του προϊόντος. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος διαλογής χωρίς κυριαρχία ή *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II* (NSGA-II) που λαμβάνει υπόψη δύο κύριους στόχους: την ελαχιστοποίηση του κόστους (κόστος παραγωγής, κόστος αναδιαμόρφωσης, κόστος αλλαγής εργαλείων και κόστος χρήσης εργαλείων) και του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης.

Οι Shabaka and Elmaraghy (2007) πρότειναν την αναπαράσταση της δομής της εργαλειομηχανής σε μορφή κινηματικής αλυσίδας που αποτυπώνει τον αριθμό, τον τύπο και τη διαδοχή των αξόνων κίνησης. Με τη μεθοδολογία που ανέπτυξαν μπορεί να δημιουργηθούν περισσότερες από μία διαμορφώσεις μηχανής για ένα σύμπλεγμα εργασιών, γεγονός που αυξάνει την ευελιξία στην επιλογή μηχανής.

Οι μεθοδολογίες για το σχεδιασμό των διαμορφώσεων εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα του συστήματος. Όσο αναφορά τη φύση σύζευξης μεταξύ των δομοστοιχείων, ένα RMS μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως ισχυρά ή χαλαρά συζευγμένο ή αποζευγμένο σύστημα. Σε ένα αποζευγμένο σύστημα όπως π.χ. ένα σύστημα υπολογιστή, το κάθε στοιχείο ανταποκρίνεται σε μία συγκεκριμένη απαίτηση (η οθόνη για την εμφάνιση εικόνας, το πληκτρολόγιο για την εισαγωγή κειμένου κ.λπ.). Σε αντίθεση ένα ισχυρά συζευγμένο σύστημα, όπως ένα αναδιαμορφώσιμο ρομποτικό σύστημα, η λειτουργία κάθε δομοστοιχείου δεν έχει άμεση συσχέτιση με τις απαιτήσεις του συστήματος. Ο συνδυασμός των λειτουργιών όλων των δομοστοιχείων είναι αυτός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αξιολόγηση της εκπλήρωσης των απαιτήσεων και εάν τελικά η σχεδιασμένη διαμόρφωση είναι κατάλληλη (Bi et al. 2008).

Η αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής έχει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό διαμόρφωσης, ειδικά για τις αναδιαμορφώσιμες εργαλειομηχανές (RMT). Δεν υπάρχουν όμως κατάλληλες υποδομές για την αρμονική αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου και υπολογιστή κυρίως λόγω του περιορισμού της συμβατικής τεχνητής νοημοσύνης. Οι Yin et al. (2012) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία διαδραστικού σχεδιασμού που βασίζεται στην ανθρώπινη φαντασία για το σχεδιασμό διαμόρφωσης του RMT. Αυτή η μεθοδολογία μιμείται τον τρόπο που λειτουργεί η ανθρώπινη φαντασία για να λύσει προβλήματα. Ο τρόπος που λειτουργεί η ανθρώπινη φαντασία, όπως την αναπαρέστησαν οι Yin et al. (2012), φαίνεται στο **Σχήμα 4-14**.



Σχήμα 4-14 Ο Ρόλος της Ανθρώπινης Φαντασίας
(Yin et al. 2012)

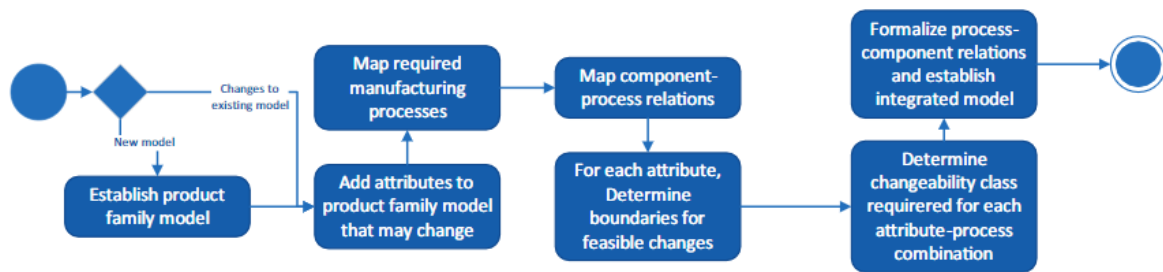
4.3.1.2 Διαμόρφωση στο Λογικό Επίπεδο

Οικογένεια προϊόντων

Σε ένα RMS τα προϊόντα ομαδοποιούνται σε οικογένειες, καθεμία από τις οποίες απαιτεί συγκεκριμένη διαμόρφωση του συστήματος. Αρχικά το σύστημα διαμορφώνεται για την παραγωγή της πρώτης οικογένειας προϊόντων. Όταν ένα νέο προϊόν ή νέες προδιαγραφές για τα υπάρχοντα προϊόντα εισέρχονται στην αγορά δημιουργείται η ανάγκη να αναδιαμορφωθεί το σύστημα παραγωγής ώστε να ανταποκριθεί σε αυτές τις αλλαγές. Η αποδοτικότητα ενός RMS βασίζεται στη βέλτιστη επιλογή οικογενειών προϊόντων και του προγραμματισμού τους. Οι Galan et al. (2007) πρότειναν μια μεθοδολογία για την ομαδοποίηση των προϊόντων σε οικογένειες βασισμένη στις απαιτήσεις αρθρωτή δομής, ομοιότητας, συμβατότητας και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των προϊόντων.

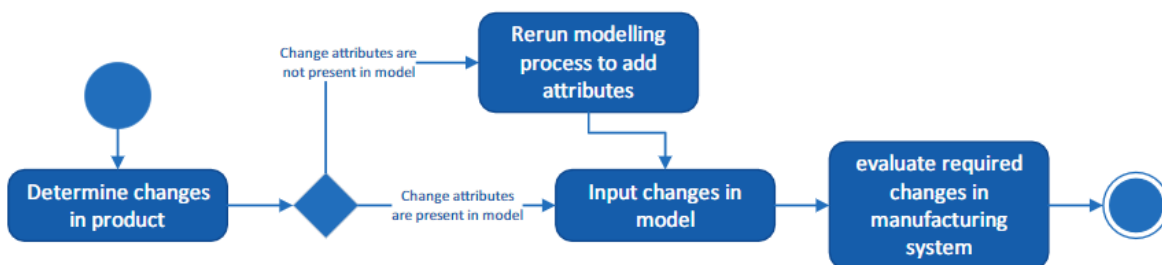
Οι Gupta, Jain, and Kumar (2013, 2014) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία 2 φάσεων για την οικονομική ομαδοποίηση των εξαρτημάτων σε οικογένειες. Στην 1^η φάση χρησιμοποιείται ο συσσωρευτικός ιεραρχικός αλγόριθμος K-means για το σχηματισμό οικογένειας εξαρτημάτων και στη 2^η φάση αναπτύσσεται ένα μοντέλο κόστους για την επιλογή της αλληλουχίας των σχηματισμένων οικογενειών. Αντίστοιχες μεθοδολογίες 2 φάσεων ανέπτυξαν οι Eguia et al. (2011); Galán (2008); Pattanaik and Kumar (2011) που χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους και καταφέρνουν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος αναδιαμόρφωσης και να μεγιστοποιήσουν την παραγωγικότητα και τη λειτουργικότητα των μηχανών.

Οι Schou et al. (2020) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία 10 βημάτων, η οποία δημιουργεί ένα μοντέλο που περιγράφει τα χαρακτηριστικά μιας οικογένειας προϊόντων, ένα μοντέλο των παραγωγικών διεργασιών και των μεταξύ τους σχέσεων. Τα τρία αυτά μοντέλα συνδυάζονται σε ένα μοντέλο διαμόρφωσης το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αναγκαίων αλλαγών στο σύστημα παραγωγής που προκαλούν οι αλλαγές στις προδιαγραφές του προϊόντος. Η μέθοδος μοντελοποίησης και η μέθοδος αξιολόγησης των αναγκαίων αλλαγών παρουσιάζονται σχηματικά στα **Σχήμα 4-15** και **Σχήμα 4-16** αντίστοιχα.



Σχήμα 4-15 Διαδικασία Μοντελοποίησης

(Schou et al. 2020)



Σχήμα 4-16 Διάγραμμα Ροής για τον προσδιορισμό των Αναγκαίων Αλλαγών

(Schou et al. 2020)

Ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για το σχεδιασμό RMS αναπτύχθηκε από τους Battaïa et al. (2017) με στόχο την εύρεση μιας οικονομικά αποδοτικής λύσης για τη δημιουργία πολλών οικογενειών προϊόντων.

Οι περισσότερες προσεγγίσεις βασίζονται στον σχεδιασμό της οικογένειας προϊόντων από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού, χωρίς να εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί η υπάρχουσα βάση δεδομένων για τις οικογένειες προϊόντων ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη οικογένεια που θα ενταχθεί ένα νέο προϊόν. Οι Hasan and Jain (2016) πρότειναν μια προσέγγιση βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα ταξινόμησης για την εν λόγω κατάταξη και οι Mittal, Jain, and Kumar (2018) επικεντρώνονται στον προσδιορισμό

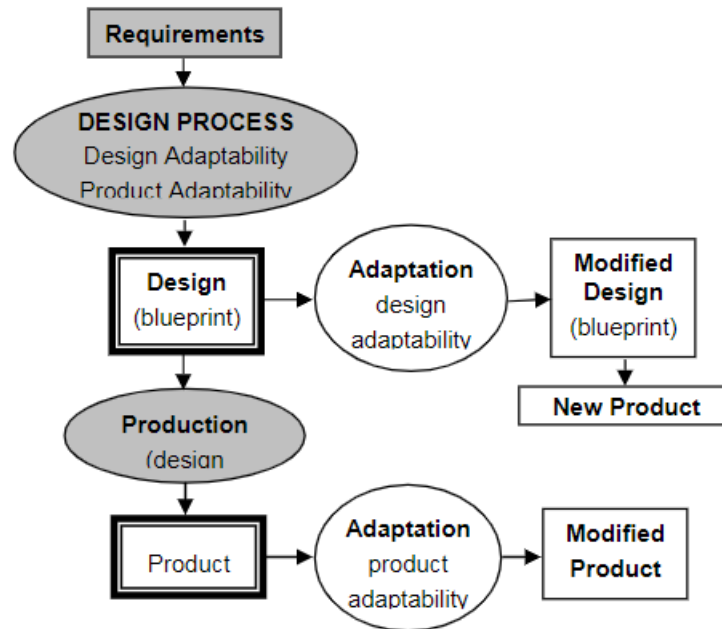
της βέλτιστης αλληλουχίας σχηματισμού οικογενειών και επιλογής διαμόρφωσης βάσει της προηγούμενης.

Οι Prasad and Jayswal (2019) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία σχεδιασμού που υπολογίζει τον πίνακα ομοιότητας, σχηματίζει οικογένειες εξαρτημάτων και επιλέγει την βέλτιστη. Ο σχηματισμός της οικογένειας εξαρτημάτων γίνεται με τον αλγόριθμο ALC και η επιλογή της οικογένειας με τη μέθοδο AHP βάσει τριών παραγόντων: η προσπάθεια αναδιαμόρφωσης, το κόστος υπολειτουργίας και το κόστος του χώρου. Η μεθοδολογία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι μηχανές πρέπει να ομαδοποιούνται με βάση το κόστος αναδιαμόρφωσης.

Για το σχεδιασμό προϊόντος, οι Gielisch et al. (2019) αξιολόγησαν 4 προϋπάρχουσες μεθοδολογίες και κατέληξαν σε μια νέα προσέγγιση για τον εννοιολογικό σχεδιασμό προϊόντων που σκοπός του είναι να αντιμετωπίσει τον παράγοντα αβεβαιότητας του πελάτη κατά τη διαδικασία ανάπτυξης.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής και σχεδιασμού των δομοστοιχείων ενός αρθρωτού προϊόντος, οι Yigit, Ulsoy, and Allahverdi (2002) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία που βασίζεται στην εύρεση του βέλτιστου συμψηφισμού μεταξύ της μείωσης της ποιότητας λόγω της αρθρωτής δομής του προϊόντος και τους κόστους αναδιαμόρφωσης και οι Mittal, Jain, et al. (2018) πρότειναν μια μεθοδολογία για τη βέλτιστη επιλογή αρθρωτών προϊόντων με τη χρήση της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας (AHP).

Οι Gu, Hashemian, and Nee (2004) πρότειναν ένα παράδειγμα προσαρμόσιμου σχεδιασμού για την ανάπτυξη προϊόντων που είναι ευέλικτα στον σχεδιασμό ή/και στην παραγωγή τους. Ο προσαρμόσιμος σχεδιασμός βασίζεται στην ανεξαρτησία των λειτουργιών, σε ένα μέτρο προσαρμοστικότητας και σε ένα μοντέλο διαδικασίας σχεδιασμού. Στο **Σχήμα 4-17** παρουσιάζεται η μέθοδος του προσαρμόσιμου σχεδιασμού.



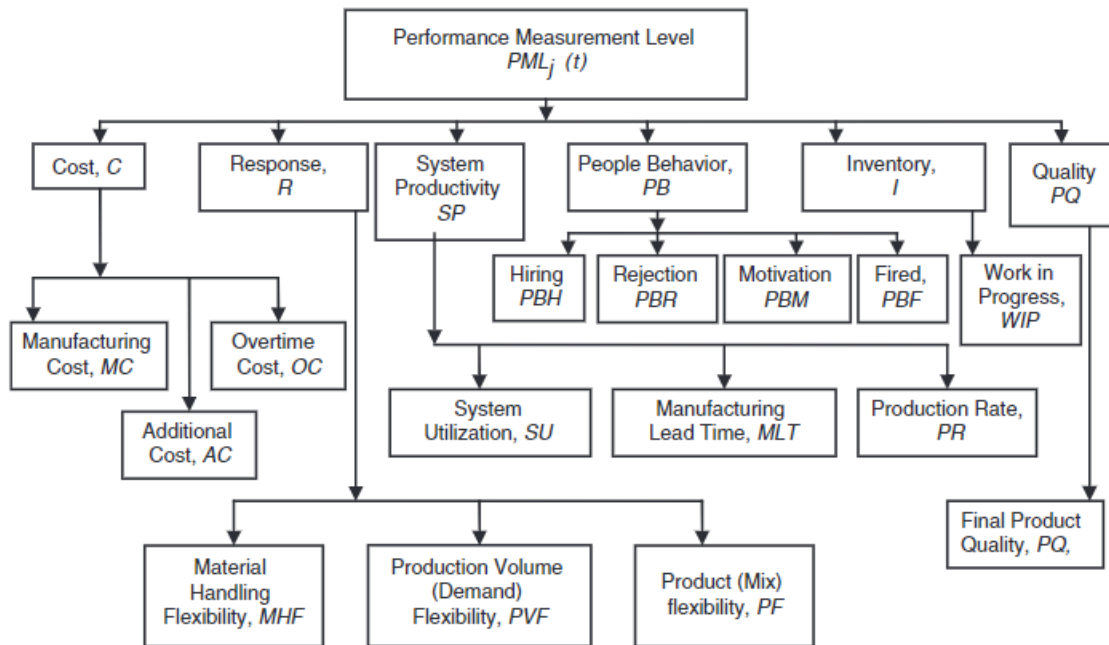
Σχήμα 4-17 Προσαρμόσιμος Σχεδιασμός

(Gu et al. 2004)

Σχέδιο ελέγχου

Η ικανότητα παραγωγής μεγάλης ποικιλίας προϊόντων δημιουργεί πολυπλοκότητα στις διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας που εμπλέκονται σε ένα σύστημα παραγωγής. Οι παραδοσιακές μέθοδοι για τη διασφάλιση ποιότητας δεν επαρκούν για ένα RMS. Οι Davrajh and Bright (2013) συνέταξαν μία μεθοδολογία ολιστικής διαχείρισης της ποιότητας των προϊόντων σε ένα περιβάλλον παραγωγής με υψηλή ζήτηση και μεγάλη ποικιλία προϊόντων.

Ο I. Garbie (2014) παρουσίασε ένα νέο μοντέλο για τη μέτρηση της απόδοσης της διαδικασίας διαμόρφωσης που εξετάζει έξι παράγοντες: το κόστος, την ανταποκρισιμότητα και την παραγωγικότητα συστήματος, τη συμπεριφορά των ανθρώπων, τις διεργασίες σε εξέλιξη και την εξερχόμενη ποιότητα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4-18**. Ύστερα γίνεται εκτίμηση των σχετικών βαρών τους με τη μέθοδο της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας (AHP).

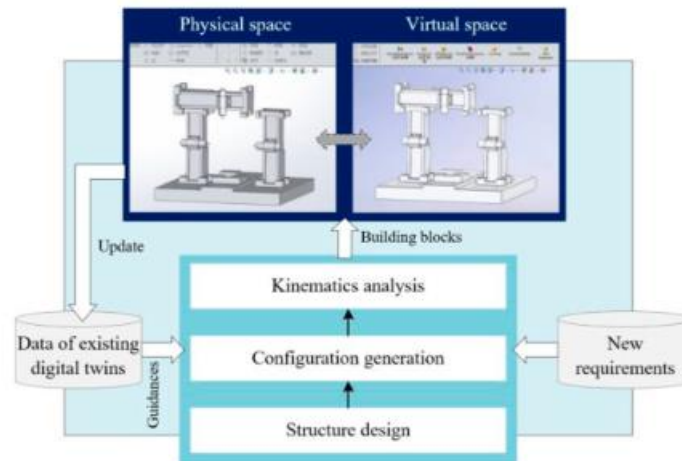


**Σχήμα 4-18 Πλαίσιο για την Ανάλυση και Μέτρηση Απόδοσης
(I. Garbie 2014)**

Μια καινοτόμα μέθοδος ακριβούς και σύγχρονης προσομοίωσης για την υποστήριξη στην διαδικασία αναδιαμόρφωσης είναι το ψηφιακό δίδυμο (digital twin). Η σύγχρονη σύνδεση μεταξύ του πραγματικού εργοστασίου με το ψηφιακό δίδυμό του βοηθάει την αποτελεσματική αξιολόγηση των διαμορφώσεων, την αποφυγή λαθών και την επιθεώρηση του συστήματος ως προς την πλήρωση των προδιαγραφών. Το μοντέλο πληροφοριών χρησιμοποιεί δεδομένα πραγματικού χρόνου που συλλέγονται από την παραγωγή για τη δημιουργία, το συγχρονισμό και την προσομοίωση του ψηφιακού δίδυμου. Επίσης είναι συγχρονισμένο με το εργοστάσιο και μέσω των προσομοιώσεων προβλέπει τα αποτελέσματα της παραγωγής. Ύστερα η μονάδα αξιολόγησης της διαμόρφωσης αξιολογεί τις αναδιαμορφώσεις της γραμμής παραγωγής με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα κριτήρια αξιολόγησης και καταλήγει έτσι στη βέλτιστη διαμόρφωση.

Τη μέθοδο αυτή χρησιμοποίησαν οι Leng et al. (2020), Yang et al. (2022), Huang, Wang, and Yan (2022), Hu (2022) και την εφάρμοσαν σε πραγματικές συνθήκες για να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητά της. Παρακάτω παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση από

την έρευνα των Huang et al. (2022) για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη (Σχήμα 4-19).



**Σχήμα 4-19 Παράδειγμα Ψηφιακού Διδύμου
(Huang et al. 2022)**

Κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας μπορεί να συμβούν έκτακτα γεγονότα σε επίπεδο συστήματος (βλάβες μηχανών, αλλαγή στις προτεραιότητες διεργασιών κ.λπ.) και σε επίπεδο κέντρου εργασίας (αστοχίες εργαλείων, συγκρούσεις ρομπότ κ.λπ.). Τέτοια συμβάντα διακόπτουν την ομαλή ροή της παραγωγής προκαλώντας απόκλιση στον προγραμματισμό διεργασιών.

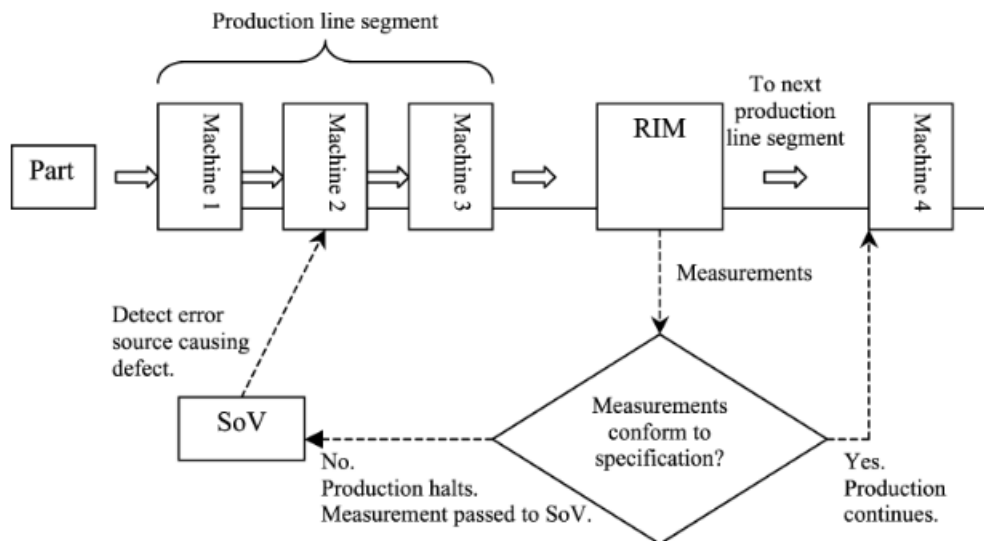
Οι Bruccoleri, Pasek, and Koren (2006) υποστηρίζουν ότι η ικανότητα αναδιαμόρφωσης είναι ο βασικός παράγοντας για την ενσωμάτωση στρατηγικών αντιμετώπισης σφαλμάτων. Επίσης ανέπτυξαν μια αντικειμενοστραφή δομή ελέγχου για το χειρισμό σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο, η οποία ενσωματώνει τη τεχνολογία χειρισμού σφαλμάτων στο υπάρχον σύστημα προγραμματισμού διεργασιών. Επίσης, οι Kaid et al. (2021) ανέπτυξαν μια πολιτική ελέγχου συμφόρησης 4 βημάτων για την ανίχνευση και την αντιμετώπιση σφαλμάτων σε ένα RMS.

Οι Lahrichi et al. (2021) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για την εξισορρόπηση γραμμής για μία αναδιαμορφώσιμη γραμμή μεταφοράς υλικών σε ένα σειριακό σύστημα παραγωγής με πολλαπλές μηχανές σε κάθε κέντρο εργασίας. Η μεθοδολογία βασίζεται σε μία ευριστική μέθοδο 2 βημάτων (κατασκευή, βελτιστοποίηση).

Κάθε στάδιο στην πορεία μιας παραγωγικής διαδικασίας ενέχει την πιθανότητα να δημιουργίας απόκλισης από την προδιαγραφόμενη διάσταση. Αυτές οι αποκλίσεις συσσωρεύονται και επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ακολουθώντας τις στρατηγικές του παραδοσιακού ποιοτικού ελέγχου που επικεντρώνονται στο προϊόν οι μετρήσεις γίνονται μόνο για να ελεγχθεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ο γρήγορος και ακριβής εντοπισμός της πηγής του προβλήματος θα βοηθήσει τη γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη εξάλειψη αυτών των πηγών και εν συνεπεία την ταχύτερη επανεκκίνηση της παραγωγικής διαδικασίας και εξασφάλιση της υψηλής ποιότητας των εξερχόμενων προϊόντων.

Για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα, οι Koren et al. (1999) πρότειναν τη χρήση της μεθοδολογίας *Stream of Variations* (SoV) η οποία αναλύει τον προγραμματισμό διεργασιών βάσει στατιστικών μοντέλων και υπολογίζει τη συσσώρευση απόκλισης στις διαστάσεις του κατεργαζόμενου τεμαχίου καθώς αυτό κινείται σε ένα σύστημα παραγωγής. Για την υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας απαιτείται η κατάλληλη τοποθέτηση επιλεγμένων αισθητήρων για τη διάγνωση των πηγών σφάλματος.

Οι Barhak et al. (2005) ανέπτυξαν μια διαδικασία ενσωμάτωσης των μετρήσεων από RIM στην μέθοδο SoV, επιτυγχάνοντας έτσι ένα ευέλικτο, κλειστού βρόγχου σύστημα ποιοτικού ελέγχου το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4-20**.



Σχήμα 4-20 Ποιοτικός Έλεγχος με Ενσωμάτωση RIM

(Barhak et al. 2005)

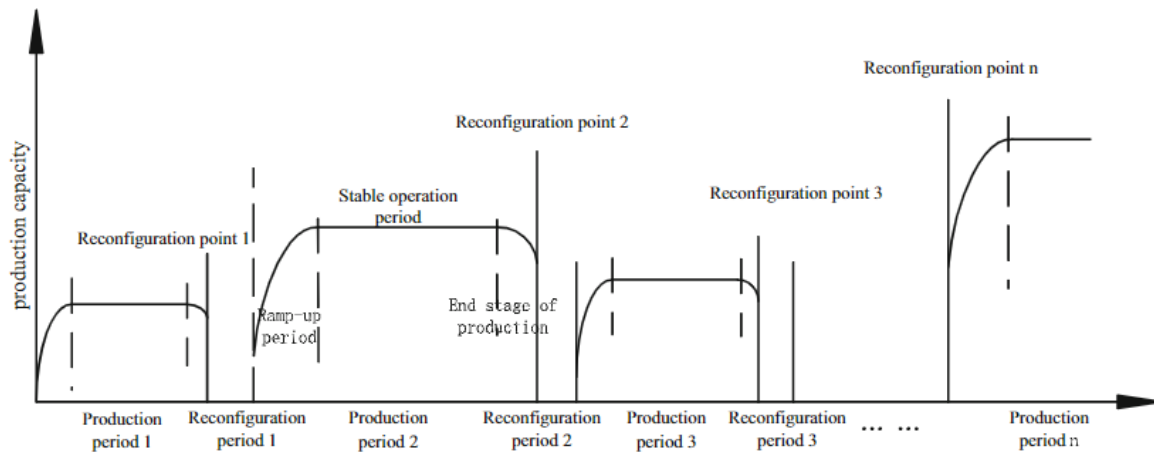
Η υιοθέτηση μιας στρατηγικής για τη συντήρηση ενός RMS είναι πολύ σημαντική και δεν μπορεί να προγραμματίζεται σύμφωνα με τις παραδοσιακές τακτικές. Σε επίπεδο μηχανής τα διαστήματα συντήρησης προγραμματίζονται σύμφωνα με την υποβάθμιση των επιμέρους μηχανών. Σε επίπεδο συστήματος η συντήρηση πρέπει να προγραμματίζεται κατά τη περίοδο αναδιαμόρφωσης που αναστέλλονται οι παραγωγικές διεργασίες. Οι Xia et al. (2017) πρότειναν μια μέθοδο αναδιαμορφώσιμου χρονικού παραθύρου συντήρησης ή *Reconfigurable Maintenance Time Window* (RMTW) για τον προγραμματισμό ευκαιριακής συντήρησης στο επίπεδο του συστήματος.

Πολύ λίγες έρευνες έχουν ασχοληθεί με τα προβλήματα ασφάλειας που δημιουργούνται σε ένα τόσο αυτοματοποιημένο σύστημα όπως το RMS. Οι Sallez, Berger, and Bonte (2020) υποστηρίζουν ότι το ζήτημα αυτό είναι πρωταρχικής σημασίας για τα αναδιαμορφώσιμα συστήματα συναρμολόγησης (RAS), τα οποία περιλαμβάνουν ρομποτικές μονάδες και συχνές παρεμβάσεις χειριστών μηχανής. Για το λόγο αυτό προτείνουν τη μεθοδολογία φούσκα ασφαλείας (safety bubble) η οποία καθιστά δυνατή την ανταλλαγή δεδομένων ασφαλείας μεταξύ των ρομποτικών μονάδων συναρμολόγησης.

Προγραμματισμός διεργασιών

Οι συμβατικές προσεγγίσεις για τον προγραμματισμό διεργασιών δεν μπορούν να συμβαδίσουν με τις ανάγκες του RMS. Οι Hees, Schutte, and Reinhart (2017) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία σχεδιασμού του πλάνου παραγωγής που ενσωματώνει συνεχώς τα βασικά χαρακτηριστικά του RMS στον προγραμματισμό και τον έλεγχο της παραγωγής.

Οι Huang et al. (2018) ανέπτυξαν μια δυναμική μεθοδολογία που βασίζεται στη πολυπλοκότητα του RMS για τον καθορισμό της κατάλληλης χρονικής στιγμής που πρέπει να ξεκινήσει η διαδικασία αναδιαμόρφωσης. Αρχικά αναλύεται η επίδραση των παραγωγικών διεργασιών και της παραγωγικής ικανότητας στο RMS και αναπτύσσεται η σχέση μεταξύ της πολυπλοκότητας και της κατάστασης του συστήματος. Αυτό δείχνει ότι η στιγμή της καταστροφής της κατάστασης του RMS είναι η καλύτερη στιγμή για την εφαρμογή της νέας διαμόρφωσης. Στη συνέχεια δημιουργούνται ποσοτικά μοντέλα για την πολυπλοκότητα των επιμέρους στοιχείων του συστήματος και σε συνδυασμό με την θεωρία καταστροφής της κορυφής αναλύεται η κατάσταση παραλλαγών του συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι μια μεθοδολογία που μπορεί να προβλέψει το σημείο καταστροφής της κατάστασης του συστήματος, αποτελώντας ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον προγραμματισμό της αναδιαμόρφωσης ενός RMS. Ο μηχανισμός της αναδιαμόρφωσης φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 4-21**.



Σχήμα 4-21 Μηχανισμός Αναδιαμόρφωσης

(Huang et al. 2018)

Οι Bensmaine, Dahane, and Benyoucef (2014) πρότειναν μία ευριστική μέθοδο/εργαλείο ολοκληρωμένου σχεδιασμού και προγραμματισμού διεργασιών σε ένα RMS που μειώνει το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης. Αυτή η μέθοδος είναι «online», δηλαδή εξετάζει τη διαθεσιμότητα των μηχανών σε κάθε βήμα και παρακάμπτει τις μηχανές που έχουν παρουσιάσει σφάλμα. Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός και προγραμματισμός διεργασιών ή *Integrated Process Planning and Scheduling (IPPS)* είναι μια στρατηγική παραγωγής που θεωρεί το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό διεργασιών ως μια ολοκληρωμένη λειτουργία και όχι ως δύο ξεχωριστές λειτουργίες που εκτελούνται διαδοχικά. Οι Bensmaine et al. (2014) προτείνουν μια ευριστική προσέγγιση στο πρόβλημα IPPS η οποία λαμβάνει υπόψη τη φύση των RMT.

Οι Abbasi and Houshmand (2009, 2011) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα του προγραμματισμού παραγωγής εισάγοντας μοντέλα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού ή *Mixed Integer Non Linear Programming (MINLP)* για τη βελτιστοποίηση του συνολικού κέρδους, στο οποίο υποτίθεται ότι υπάρχει στοχαστική ζήτηση προϊόντων. Τα προτεινόμενα μοντέλα αποσκοπούν στον προσδιορισμό της βέλτιστης ακολουθίας εργασιών παραγωγής και των αντίστοιχων διαμορφώσεων και μεγεθών παρτίδων.

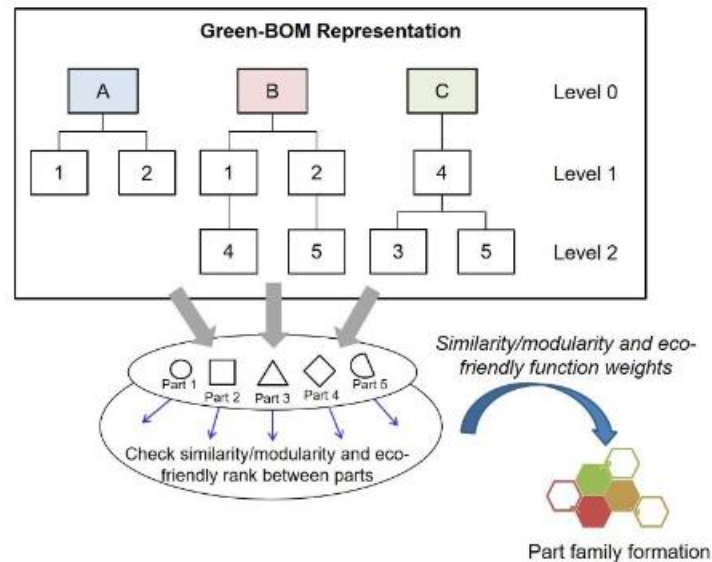
Οι Xiaowen, Beirong, and Wei (2013) ενσωμάτωσαν το σχεδιασμό του πλάνου παραγωγής με τη διαμόρφωση των RMT προτείνοντας μια συνδυαστική βελτιστοποίηση αυτών για τη βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος και τη μείωση του κόστους παραγωγής.

Οργάνωση

Οι Napoleone et al. (2022) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία που επιτρέπει τη σύγκριση των μηχανών με βάση την επαναχρησιμοποίησή τους και τις γεωγραφικές τους θέσεις. Η μεθοδολογία αποτελείται από ένα δείκτη για την αξιολόγηση της επαναχρησιμοποίησης των μηχανών και έναν αλγόριθμο MIP για την υποστήριξη του εντοπισμού των υποψήφιων επαναχρησιμοποιήσιμων και αναδιαμορφώσιμων μηχανών στο πρώιμο στάδιο του στρατηγικού σχεδιασμού του συστήματος.

Οι Wu and Zhou (2009) ανέπτυξαν ένα μοντέλο δικτύων Petri προσανατολισμένο στους πόρους ή *Resource Oriented Petri Net (ROPN)* που μπορεί να μειώσει το μέγεθος του μοντέλου συστήματος και διευκολύνει την αποτελεσματική μοντελοποίηση, ανάλυση και έλεγχο του RMS. Αυτή η μεθοδολογία αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την αποφυγή αδιεξόδων στη δρομολόγηση, το χρονοπρογραμματισμό.

Η διαδικασία της αναδιαμόρφωσης είναι στενά συνδεδεμένη με το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας και κυρίως τη διαχείριση δεδομένων. Η πολυπλοκότητα των διαδικασιών διαμόρφωσης απαιτεί εργαλεία που είναι ικανά να διαχειρίζονται πολυδιάστατους πίνακες εκδόσεων (MD-BOM) και να παρέχουν υποστήριξη στην παρακολούθηση δεδομένων. Για αυτούς τους λόγους οι Kurniadi and Ryu (2020, 2021) πρότειναν έναν πολυδιάστατο πράσινο πίνακα εκδόσεων ή *Multi-Dimensional Green Bill Of Materials (MDG-BOM)* που κατέχει ένα πρόσθετο πολυδιάστατο χαρακτηριστικό για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών και των επικίνδυνων υλικών κατά την ανάπτυξη προϊόντων, καθώς και τη διαχείριση πληροφοριών του προϊόντος κατά τη διάρκεια της αναδιαμόρφωσης. Επίσης ανέπτυξαν ένα έξυπνο λογιστικό φύλλο για τη διαχείριση του MDG-BOM, το οποίο επιτρέπει την ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών δεδομένων σχεδιασμού CAD σε πολλαπλά τμήματα και την παρακολούθηση των αλλαγών σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Το πλαίσιο σχηματισμού οικογένειας εξαρτημάτων μέσω Green-BOM φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 4-22**.



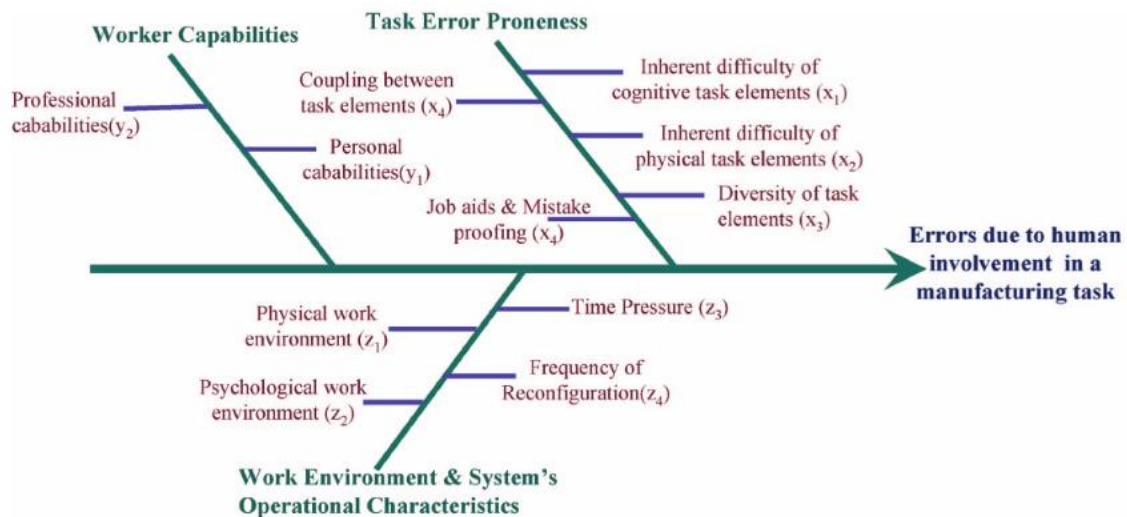
Σχήμα 4-22 Πλαίσιο Σχηματισμού Οικογένειας Εξαρτημάτων μέσω Green-BOM (Kurniadi and Ryu 2020)

Οι Lozano, Villa, and Eguía (2017) εξέλιξαν την μεθοδολογία της ανάλυσης φακέλου δεδομένων ή *Data Envelopment Analysis* (DEA) ώστε αυτή να λαμβάνει υπόψη τους διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας ενός παραγωγικού συστήματος. Η προτεινόμενη μοντελοποίηση υπολογίζει ένα σημείο-στόχο λειτουργίας για κάθε τρόπο λειτουργίας με σκοπό την μέγιστη αποδοτικότητα του συστήματος από μεριάς τεχνικής απόδοσης, απόδοσης του κόστους και διάταξης.

Στα περισσότερα συστήματα παραγωγής, η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα θεωρείται από τα πιο κρίσιμα στοιχεία που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Στα RMS τα καθήκοντα των εργαζομένων αναμένεται να αλλάζουν συχνά καθώς το σύστημα αναδιαμορφώνεται. Η ικανότητα πρόβλεψης της πιθανότητας ανθρώπινων σφαλμάτων παρέχει στο σχεδιαστή του συστήματος πληροφορίες σχετικά με τα απαιτούμενα επίπεδα δεξιοτήτων, το σχεδιασμό θέσεων εργασίας, την ανάθεση καθηκόντων, την οργάνωση της εργασίας, καθώς και επιλογές για την τροποποίηση του σχεδιασμού για να επιτευχθούν βέλτιστα ποιοτικά αποτελέσματα. Οι Elmaraghy, Nada, and Elmaraghy (2008) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την εκτίμηση της πιθανότητας ανθρώπινων σφαλμάτων με βάση τα χαρακτηριστικά των καθηκόντων, το περιβάλλον εργασίας και τις ικανότητες των εργαζομένων.

Οι Urbanic and Hedrick (2015) προσπάθησαν να αναπτύξουν ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων και μεθόδων για τη διαχείριση της αναδιαμόρφωσης που βοηθάει στην

ανάπτυξη των καταλληλότερων στρατηγικών αλλαγής ανάλογα με τις τρέχουσες συνθήκες του εκάστοτε εργοστασίου. Οι παράγοντες που λαμβάνουν υπόψη είναι η δομή των μηχανών, το σχέδιο ελέγχου, η διαθεσιμότητα και οι δεξιότητες του προσωπικού. Ακολουθεί το **Σχήμα 4-23** που απεικονίζει τα σύνολα γνωρισμάτων που συμβάλλουν στα ανθρώπινα λάθη.



Σχήμα 4-23 Σύνολα Γνωρισμάτων που Συμβάλλουν στα Ανθρώπινα Λάθη
(Elmaraghy et al. 2008)

Παρά την αυτοματοποίηση που διαθέτουν, τα RMS εξακολουθούν να απαιτούν ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν από τους χειριστές των μηχανών. Ειδικότερα απαιτούν συχνή συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση των δομοστοιχείων που ενσωματώνονται στα RMT κατά τη διαδικασία αναδιαμόρφωσης. Αυτή η συνεργασία ανθρώπου-μηχανής δημιουργεί ζητήματα εργονομίας και ασφάλειας τα οποία προσπαθούν να λύσουν οι Bortolini et al. (2021) με μια μεθοδολογία δύο στόχων. Ο τεχνικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου αναδιαμόρφωσης βελτιστοποιώντας τις επιμέρους εργασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν, όπως την ενσωμάτωση νέων δομοστοιχείων στα RMT, τη δρομολόγηση αυτών των δομοστοιχείων από τις αποθήκες στα κέντρα εργασίας κ.λπ. Ο εργονομικός στόχος είναι να ελαχιστοποιήσει τις επαναλαμβανόμενες κινήσεις που πραγματοποιούν οι χειριστές. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιεί μια μεθοδολογία εκτίμησης κινδύνου επαναλαμβανόμενων κινήσεων που απαιτούν χειρωνακτικό χειρισμό μικρού φορτίου σε υψηλή συχνότητα.

Οι Mrofu and Tale (2014) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τη διευκόλυνση των χειριστών μηχανής κατά τη διαδικασία της αναδιαμόρφωσης, που προσδιορίζει εκ των προτέρων της

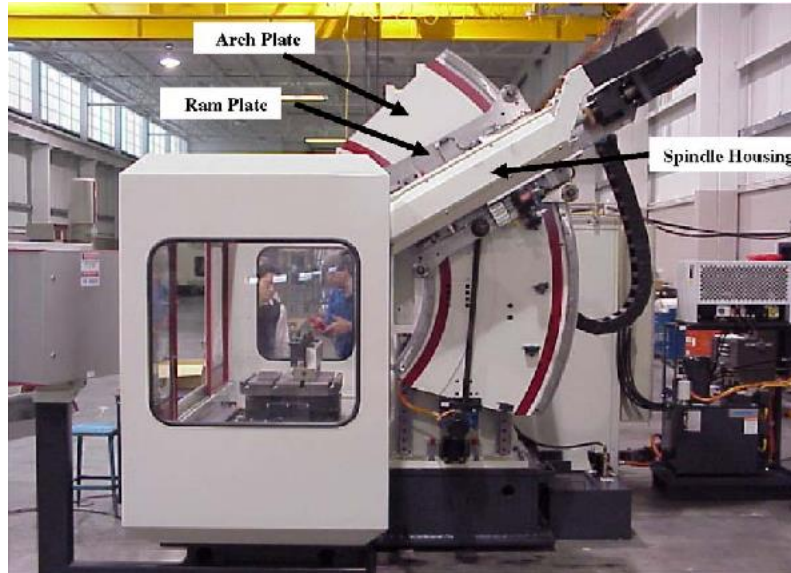
επιμέρους διεργασίες και τα εργαλεία που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να προετοιμαστεί ο χειριστής. Μια μεθοδολογία για την οργάνωση και εξειδίκευση του εργατικού δυναμικού ανέπτυξαν οι Wang et al. (2009). Η μεθοδολογία προτείνει οι χειριστές να κινούνται κατά μήκος της γραμμής παραγωγής εκτελώντας εργασίες συναρμολόγησης σε κάθε σταθμό η οποία αποδεικνύεται ότι μειώνει το χρόνο αναμονής.

Οι Goyal, Jain, and Jain (2013) πρότειναν μία μεθοδολογία για την μέτρηση της ανταποκρισιμότητας ενός RMT βάσει την αναδιαμορφωσιμότητάς του και της λειτουργικής του ικανότητας. Η λειτουργική ικανότητα είναι η ικανότητα εκτέλεσης πλήθους διεργασιών χωρίς αλλαγή διαμόρφωσης και η αναδιαμορφωσιμότητα προκύπτει από τον αριθμό των πιθανών διαμορφώσεων και τη απαιτούμενη προσπάθεια αναδιαμόρφωσης. Υψηλές τιμές της λειτουργικής ικανότητας και της αναδιαμορφωσιμότητας της μηχανής μειώνουν το χρόνο συντήρησης και μειώνουν το σχετικό κόστος της αναδιαμόρφωσης. Συνεπώς η ανταποκρισιμότητα αποτελεί το μέσο όρο των κανονικοποιημένων τιμών των δύο παραπάνω μετρήσεων.

4.3.1.3 Εξοπλισμός

Ο βασικότερος παράγοντας που καθιστά το RMS υλοποιήσιμο είναι οι αναδιαμορφώσιμες εργαλειομηχανές (RMT). Οι εργαλειομηχανές αυτές αποτελούν μια νέα κατηγορία μηχανών που σχεδιάζονται γύρω από μια συγκεκριμένη οικογένεια προϊόντων και αποτελούν μια μέση λύση μεταξύ της μεγάλης ευελιξίας και του υψηλού κόστους των ευέλικτων εργαλειομηχανών (βλ. [FMS](#)) και την περιορισμένη ευελιξία αλλά χαμηλό κόστος των εξειδικευμένων μηχανών (βλ. [DMS](#)).

Ο Katz (2007) εισήγαγε μία αναδιαμορφώσιμη μηχανή σε σχήμα αψίδας (**Εικόνα 4-1**) η οποία επιτρέπει την παραγωγή μιας οικογένειας προϊόντων με διαφορετικές γωνίες κλίσης. Η εργαλειομηχανή σε σχήμα αψίδας είναι κατάλληλη για κατεργασίες σε κλίση από -15° έως 45° και χρησιμοποιείται για την κατεργασία του μπλοκ κινητήρων V6 και V8.

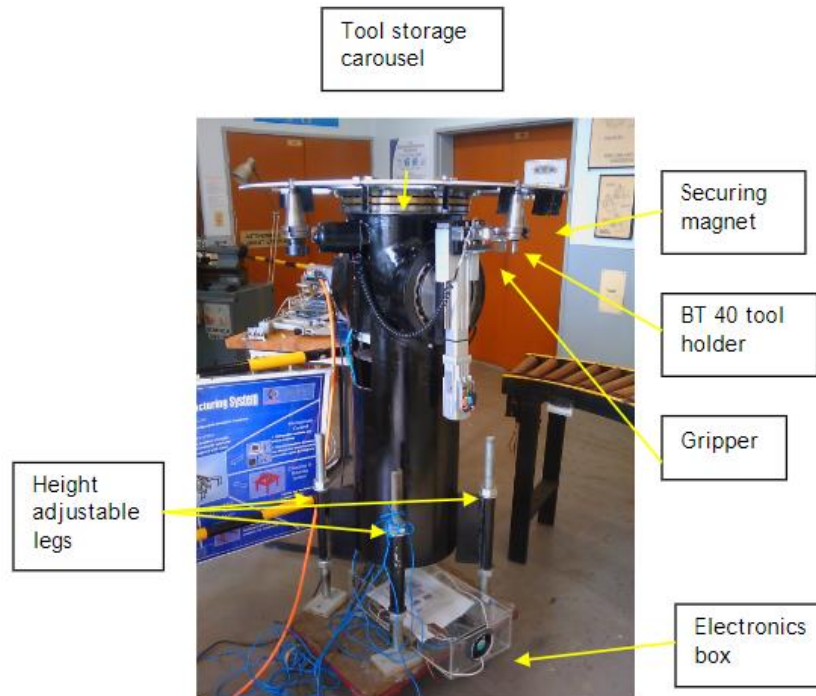


Εικόνα 4-1 Αναδιαμορφώσιμη Μηχανή σε Σχήμα Αψίδας
(Katz 2007)

Οι Bi et al. (2008) κάνουν αναφορά στην παράλληλη κινηματική μηχανή ή Parallel Kinematic Machine (PKM) που αναπτύχθηκε στο NRC-IMTI. Το PKM παρέχει 3 είδη κίνησης: έκταση, κύλιση και εκτροπή. Οι κινήσεις X και Y πραγματοποιούνται από την τράπεζα κατεργασίας η οποία μπορεί να ρυθμίσει το ύψος της. Το PKM έχει επίσης ενσωματωμένη ρυθμιζόμενη γερανογέφυρα και σε συνδυασμό με την κινητή τράπεζα κατεργασίας επιτρέπει την ταχεία αναδιαμόρφωσή του π.χ. την αλλαγή της κλίσης κατεργασίας από οριζόντια σε κάθετη και στις ενδιάμεσες γωνίες κλίσης.

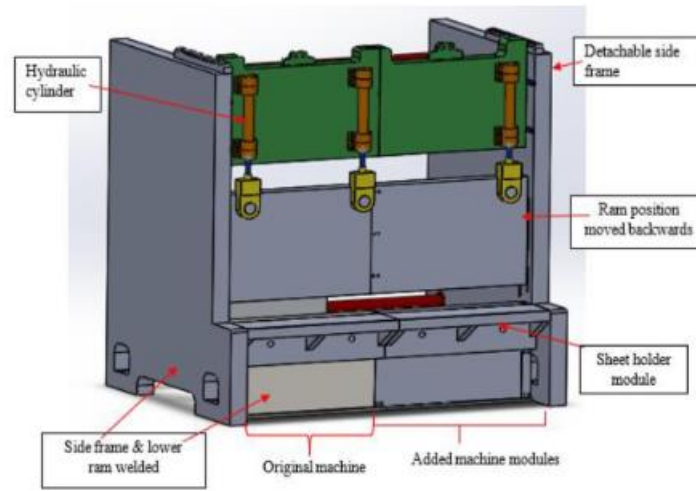
Οι Padayachee and Bright (2012) πρότειναν μία αρθρωτή αναδιαμορφώσιμη μηχανή ή *Modular Reconfigurable Machine* (MRM) η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάτρηση και τόννευση. Συμπληρωματικά πρότειναν μια συλλογή από 12 δομοστοιχεία (κοπτικά εργαλεία) τα οποία με ανακατατάξεις μπορούν να δημιουργήσουν 9 διαφορετικές διαμορφώσεις για το MRM. Αυτή η μηχανή έχει μικρό κόστος κατασκευής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή προϊόντων σε μικρές παρτίδες.

Οι Collins and Bright (2011) ανέπτυξαν ένα πρωτότυπο σύστημα αυτόματης αλλαγής κοπτικού εργαλείου το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα RMT και να πραγματοποιήσει την αλλαγή σε λιγότερο από 30 δευτερόλεπτα. Βασική προϋπόθεση για την ενσωμάτωση αυτής της τεχνολογίας σε ένα παραγωγικό σύστημα είναι η δυνατότητα αυτόματης βαθμονόμησης. Ένα πρωτότυπο φαίνεται στην **Εικόνα 4-2**.



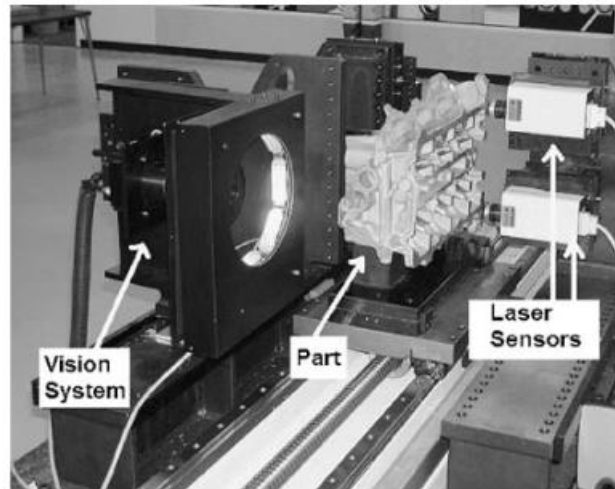
**Εικόνα 4-2 Σύστημα Αυτόματης Αλλαγής Κοπτικού Εργαλείου
(Collins and Bright 2011)**

Οι Sibanda, Mprofu, and Trimble (2021) πρότεινε ένα πρωτότυπο μηχανής για την επεξεργασία μετάλλων. Η μηχανή αυτή είναι αποτέλεσμα της ενοποίησης δύο συμβατικών μηχανών, διαμητικής μηχανής και πρέσας κάμψης (Reconfigurable Guillotine Shear & Bending Press Machine). Η μηχανή αποτελεί μια εναλλακτική λύση σε σχέση με την ύπαρξη δύο μηχανών, τα οποία θα καταλάμβαναν μεγαλύτερο χώρο και θα απαιτούσαν περισσότερη ενέργεια, εργασία και κεφάλαιο για την αρχική επένδυση. Το πρωτότυπο αυτό έχει σταθερή παραγωγική ικανότητα, αλλά μπορεί πολύ εύκολα να προστεθεί σε αυτή άλλη μία πανομοιότυπη μηχανή για να μπορεί να ανταπεξέλθει σε αύξηση των παραγωγικών αναγκών. Είναι ιδανική λύση για μικρομεσαίες επιχειρήσεις γιατί έχει δυνατότητα κλιμάκωσης χωρίς να απαιτείται μεγάλη αρχική επένδυση. Ένα ψηφιακό σχέδιο του πρωτοτύπου φαίνεται στην **Εικόνα 4-3**.



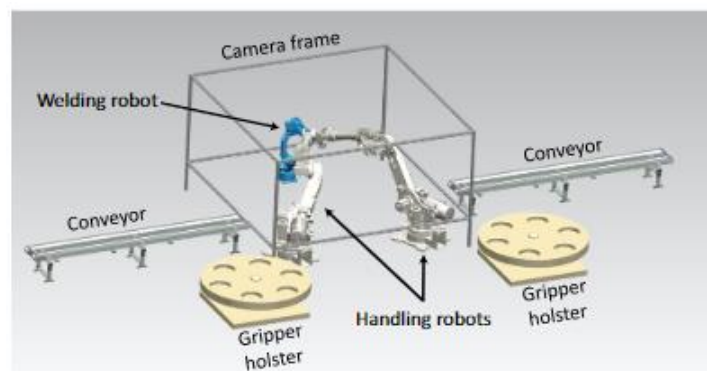
**Εικόνα 4-3 Διατμητική Μηχανή & Πρέσα Κάμψης
(Sibanda, Mprofu, and Trimble 2021)**

Επόμενος βασικός παράγοντας για την υλοποίηση των RMS είναι οι αναδιαμορφώσιμες μηχανές επιθεώρησης και ελέγχου (RIM). Ο Katz (2007) παρουσίασε ένα RIM για την επιθεώρηση, πάνω στη γραμμή παραγωγής, των χαρακτηριστικών της κατεργασίας εξαρτημάτων από κινητήρα αυτοκινήτου. Η μηχανή αυτή μετράει γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως η επιτεδότητα, η παραλληλία και το προφίλ. Με μια διαφορετική διαμόρφωση που επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός συστήματος μηχανικής όρασης, το RIM μπορεί να ανιχνεύσει πόρους και ατέλειες στην κατεργασμένη επιφάνεια. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιεί είναι συμβατικό λέιζερ και κάμερες σάρωσης υψηλής ευκρίνειας. Στην **Εικόνα 4-4** παρουσιάζεται ένα πρωτότυπο RIM. Το επιθεωρούμενο τεμάχιο κινείται κατά μήκος ενός άξονα και διέρχεται από τους αισθητήρες σε μία σερβοκίνητη διάταξη που μπορεί να το περιστρέψει με ακρίβεια 1 μ m. Η ταχύτητα της περιστροφής καθώς και η συχνότητα δειγματοληψίας του αισθητήρα μπορούν να μεταβάλλονται ώστε να αποτυπωθεί με μεγάλη ακρίβεια η μορφολογία του τεμαχίου. Ο πειραματικός χρόνος για την επιθεώρηση ενός τεμαχίου, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου μεταφοράς, υπολογίστηκε πειραματικά περίπου 40 δευτερόλεπτα.



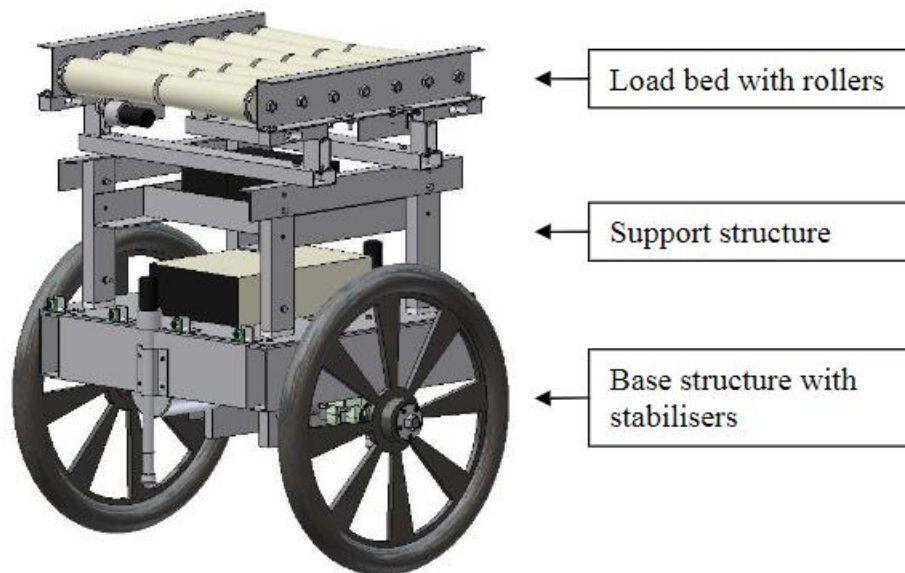
Εικόνα 4-4 Επιθεώρηση Τεμαχίου
(Katz 2007)

Ένα σύστημα που συνδυάζει δύο ρομποτικά συστήματα χειρισμού υλικών, ένα ρομποτικό σύστημα συγκόλλησης και ένα οπτικό σύστημα μέτρησης αναπτύχθηκε από τον Tuominen (2016). Τα τρία αυτά συστήματα είναι ενσωματωμένα σε ένα κέντρο εργασίας συγκόλλησης. Το σύστημα μέτρησης ελέγχει και ανατροφοδοτεί τα ρομπότ χειρισμού και συγκόλλησης. Η τεχνολογία αυτή (MAWC) επιτρέπει την άμεση εναλλαγή της παραγωγικής διαδικασίας σε ένα διαφορετικό προϊόν στην ίδια γραμμή παραγωγής. Επομένως αυξάνει τη χρησιμοποίηση της γραμμής παραγωγής και καθιστά δυνατή την παραγωγή πολλών προϊόντων σε μικρές ποσότητες. Η διάταξη του MAWC όπως προτάθηκε από τον Tuominen (2016) φαίνεται σχηματικά στην **Εικόνα 4-5**.



Εικόνα 4-5 Διάταξη MAWC
(Tuominen 2016)

Για να επιλύσει συμβάντα συμφόρησης, που είναι συχνό φαινόμενο στα αναδιαμορφώσιμα συστήματα παραγωγής, οι Butler and Bright (2008) σχεδίασαν ένα αυτόνομο ρομπότ μεταφοράς υλικών (**Εικόνα 4-6**). Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα δίκυκλο αυτοεξισορροπούμενο ρομπότ, με σύστημα πλοήγησης για το σχεδιασμό της διαδρομής και την αποφυγή εμποδίων και σύστημα επικοινωνίας για την ανταλλαγή πληροφοριών με άλλα κινητά ρομπότ στο περιβάλλον.



**Εικόνα 4-6 Αυτόνομο Ρομπότ Μεταφοράς Υλικών
(Butler and Bright 2008)**

Οι Landers, Min, and Koren (2001) ανέπτυξαν μεθοδολογίες για τον καθορισμό των μηχανικών απαιτήσεων (κινηματικές, δομικής ακαμψίας, γεωμετρικής ακρίβειας) ενός RMT. Πιο συγκεκριμένα η μεθοδολογία για τον καθορισμό των κινηματικών απαιτήσεων αφορά τη δημιουργία ενός ομογενή πίνακα μετασχηματισμού, όπου θα περιέχει όλες τις απαιτήσεις κίνησης, της γεωμετρικής ακρίβειας και της δομικής ακαμψίας της εργαλειομηχανής για κάθε κατεργασία.

Οι Montalto et al. (2020) ανέπτυξαν μια στρατηγική σχεδιασμού για τα RMT. Η πρότασή τους είναι ότι για να είναι ένα RMT ικανό να ανταποκριθεί σε μεγάλες διαφοροποιήσεις του προϊόντος, η διαδικασία σχεδιασμού του πρέπει να βασίζεται στις ίδιες παραμέτρους σχεδιασμού που καθορίζουν τη διαφοροποίηση του προϊόντος. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μια κατηγοριοποίηση των δομοστοιχείων που θεωρούνται ως βασικά και αυτών που πρέπει

να ενημερώνονται κάθε φορά που πραγματοποιείται μια αλλαγή στο προϊόν. Με αυτή τη μεθοδολογία το σύνολο των πιθανών μεταβολών που μπορεί να πραγματοποιηθούν κατά την αναδιαμόρφωση ενός συστήματος μειώνεται δραστικά.

Οι Bi et al. (2008) πραγματοποίησαν μια έρευνα για να καθορίσει τα βασικά εμπόδια στην ανάπτυξη των αναδιαμορφώσιμων μηχανών η οποία κατέληξε σε 5 συμπεράσματα.

- i. Η δυσκολία εντοπισμού και γενίκευσης των απαιτήσεων σχεδιασμού
- ii. Η έλλειψη αποτελεσματικών αυτοματοποιημένων εργαλείων προγραμματισμού ρομπότ, παρά το γεγονός ότι τα ρομποτικά συστήματα αποτελούν βασικό στοιχείο των RMT
- iii. Η έλλειψη αποτελεσματικών τεχνολογιών για την υποστήριξη στη διαδικασία αναδιαμόρφωσης
- iv. Η απουσία κάποιου διεθνή οργανισμού για την τυποποίηση των δομοστοιχείων που μπορούν να ενσωματωθούν στα RMT
- v. Η έλλειψη προσπάθειας από την επιστημονική κοινότητα για την υλοποίηση ενός ετερογενούς συστήματος που αποτελείται από διαφορετικούς τύπους RMT

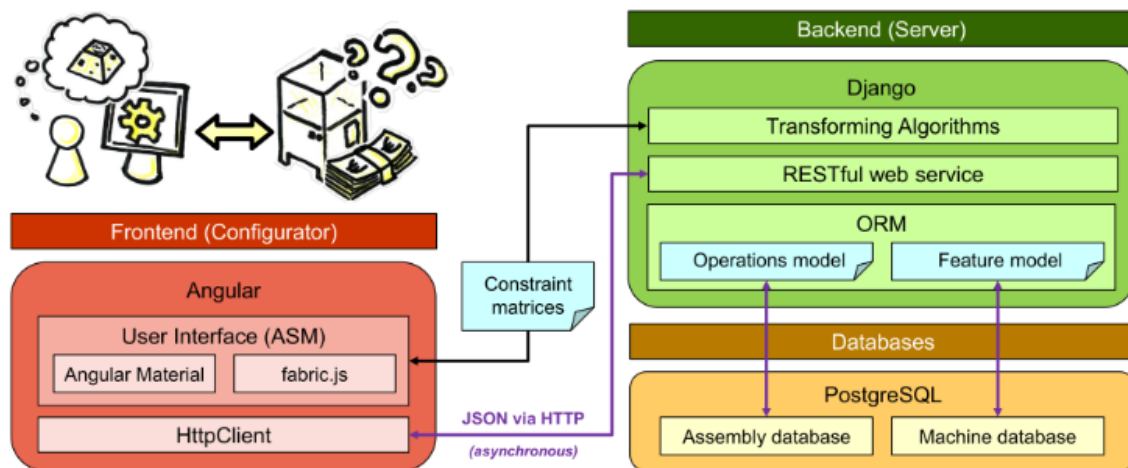
4.3.1.4 Λογισμικό

Οι Koren et al. (1999) πρότειναν τη δημιουργία μιας βιβλιοθήκης στοιχείων ελεγκτικού λογισμικού (π.χ. αλγόριθμοι σερβοελέγχου, αλγόριθμοι ελέγχου θερμοκρασίας κ.λπ.) όπου καταγράφονται και αποθηκεύονται για επαναχρησιμοποίηση. Τα στοιχεία που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή επιλέγονται και στη συνέχεια διαμορφώνονται με μια μέθοδο που ονομάζεται «Control Configurator», η οποία βοηθά στην ενσωμάτωση του λογισμικού στην επιλεγμένη μηχανή και ελέγχει αυτόματα τους περιορισμούς της σε πραγματικό χρόνο (τόσο συνεχής όσο και διακριτός έλεγχος). Επίσης όρισαν τα βασικά στοιχεία που πρέπει να περιέχει ένα λογισμικό ανοιχτού συστήματος ελέγχου. Αυτά είναι:

- Ένα λειτουργικό σύστημα για την εφαρμογή των δομοστοιχείων
- Ένα σύστημα διαμόρφωσης για το συνδυασμό των δομοστοιχείων κατά την εκκίνηση του συστήματος ελέγχου
- Ένα σύστημα επικοινωνίας για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δομοστοιχείων.

Οι Gielisch et al. (2020) ανέπτυξαν ένα σύνολο αλγορίθμων και μεθόδων για το σχεδιασμό μικροσυναρμολογημένων προϊόντων με τέτοιον τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η δυνατότητα κατασκευής τους από ένα RMS. Επίσης, για να ενισχύσουν την προσβασιμότητα και την ευκολία χρήσης πρότειναν μια διαδικτυακή εφαρμογή για τη μοντελοποίηση της ακολουθίας συναρμολόγησης. Το σύνολο των μεθόδων, της

διαδικτυακής εφαρμογής και σε συνδυασμό με δύο βάσεις δεδομένων (μία για τη συναρμολόγηση, μία για τις διαμορφώσεις μηχανών), αποτελούν ένα ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού. Με το λογισμικό αυτό, ονόματι *PlaTooMA* (Planning Tool for Micro-Assembly), οι σχεδιαστές μπορούν να μοντελοποιήσουν απλουστευμένες ακολουθίες συναρμολόγησης και να λάβουν ανατροφοδότηση για τις διαμορφώσεις που είναι ικανές να υλοποιήσουν την εν λόγω συναρμολόγηση. Η αρχιτεκτονική του λογισμικού φαίνεται στο **Σχήμα 4-24**.



Σχήμα 4-24 Αρχιτεκτονική PlaTooMA
(Gielisch et al. 2020)

Οι Taha and Rostam (2011) πρότειναν ένα εργαλείο λογισμικού για την υποστήριξη αποφάσεων στην επιλογή εναλλακτικής μηχανής. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί ένα μοντέλο ασαφούς AHP και Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου ή *Artificial Neural Network* (ANN) και χρησιμοποιείται για την εύρεση των βαρών προτεραιότητας των επιλεγμένων κριτηρίων και των εναλλακτικών λύσεων που έχουν ανατεθεί.

Οι Cachara, Harrison, and Colombo (2011) ανέπτυξε ένα λογισμικό προσομοίωσης βασισμένο στο SoA (Service oriented Architecture) το οποίο μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά τη διαδικασία αναδιάταξης και διαμόρφωσης της γραμμής παραγωγής. Οι δυνατότητες προσομοίωσης που προσφέρει αυτό το εργαλείο λογισμικού είναι απαραίτητες για τη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων και την αξιολόγηση της επίδοσής τους μέσω εικονικών δοκιμών.

Οι Choi and Cai (2014) ανέπτυξαν ένα σύστημα εικονικής προτυποποίησης με αναδιαμορφώσιμους ενεργοποιητές ή *Virtual Prototyping system with Reconfigurable Actuators* (VPRA) που μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την ευελιξία της Παραγωγής Πολλαπλών Υλικών με Στρώματα ή *Multi-Material Layered Manufacturing* (MMLM), μιας εφαρμογής του RMS. Το σύστημα VPRA προσφέρει το κατάλληλο υπόβαθρο για το σχεδιασμό, την απεικόνιση και την επικύρωση των εγκαταστάσεων και των διαδικασιών της MMLM.

Οι Padayachee and Bright (2012) μαζί με την πρωτότυπη μηχανή MRM που πρότειναν, δημιούργησαν στο λειτουργικό σύστημα LINUX και το λογισμικό του ελεγκτή υποδοχής της. Οι κύριοι στόχοι σχεδιασμού του λογισμικού είναι η δυνατότητα ψηφιακού ελέγχου των ενεργοποιητών του MRM, η παροχή παραμετροποιήσιμων ρυθμίσεων ελέγχου και η παροχή διαγνωστικών δεδομένων στο χρήστη.

Οι Davrajh, Bright, and Stopforth (2012) δημιούργησαν ένα πακέτο λογισμικού που επιτυγχάνει τον έλεγχο της διαδικασίας επιθεώρησης από ένα RIM, την οργάνωση των λειτουργιών του μηχανικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού και τη λήψη απόφασης σχετικά με την ποιότητα ενός εξαρτήματος.

4.3.2 Βιομηχανικός Κλάδος

Ο πιο διαδεδομένος βιομηχανικός κλάδος εφαρμογής του RMS είναι αυτός της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ο κλάδος αυτός έχει πολύ μεγάλο αγοραστικό κοινό και περιορισμένο αριθμό παραγωγών. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν την απαιτούμενη παραγωγικότητα των αυτοκινητοβιομηχανιών πολύ μεγάλη. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί προσπάθεια χρησιμοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας και συμμόρφωση σε αυστηρότερες προδιαγραφές σε σχέση με την ασφάλεια και τους ρύπους. Επίσης παρατηρείται ότι να νέα μοντέλα διαθέτουν όλο και πιο περίπλοκο σχεδιασμό εξωτερικής και εσωτερικής εμφάνισης, νέες τεχνολογίες πλοήγησης κ.λπ. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συνιστούν μία αγορά έως ένα βαθμό απρόβλεπτη.

Είναι αναγκαίο λοιπόν, οι επιχειρήσεις στον κλάδο να επιδιώκουν την ενσωμάτωση ολοκληρωμένων ή τυπικών RMS στις εγκαταστάσεις τους. Με αυτού του είδους παραγωγικού συστήματος θα μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απρόβλεπτες ανάγκες τις αγοράς διαμορφώνοντας οικονομικά το παραγωγικό τους σύστημα ώστε να ικανοποιήσουν τη ζήτηση και να τηρούν τις προδιαγραφές.

Το Κυψελοειδές Αναδιαμορφώσιμο Σύστημα Παραγωγής (CRMS) αποτελεί ένα μια εξέλιξη του Κυψελοειδούς Συστήματος Παραγωγής (CMS) με ενσωμάτωση χαρακτηριστικών και

βασικών αρχών του RMS. Αποτελείται από κυψελίδες (κέντρα εργασίας), η καθεμία από τις οποίες αποτελείται από ομογενείς αναδιαμορφώσιμες εργαλειομηχανές και είναι υπεύθυνη για την παραγωγή προϊόντων από μια συγκεκριμένη οικογένεια. Δηλαδή ένα CRMS έχει τη δυνατότητα να παράγει πολλά είδη προϊόντων ταυτόχρονα, ανάλογα με το πλήθος των κυψελίδων που διαθέτει. Όταν δημιουργηθεί η ανάγκη για παραγωγή ενός προϊόντος με διαφορετικές προδιαγραφές ή από άλλη οικογένεια προϊόντων, η κυψελίδα στην οποία θα παραχθεί αυτό αναδιαμορφώνεται κατάλληλα ενώ παράλληλα συνεχίζεται η παραγωγή στις υπόλοιπες κυψελίδες. Αυτό το είδος παραγωγικού συστήματος αναπτύχθηκε λόγω των αναγκών της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου σε ένα εργοστάσιο πρέπει να γίνεται η παραγωγή διαφόρων ειδών ενδιάμεσων προϊόντων ταυτόχρονα (κινητήρες, πλαίσιο, ηλεκτρονικά, τελική συναρμολόγηση) και πρέπει να είναι ενσωματωμένο το χαρακτηριστικό της αναδιαμορφωσιμότητας ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στην απρόβλεπτη ζήτηση (Bortolini et al. 2019; Eguia et al. 2013; Yu et al. 2012).

Το Αναδιαμορφώσιμο Σύστημα Συναρμολόγησης (RAS) είναι μια παραλλαγή του RMS που χρησιμοποιεί ειδικές μηχανές για τη συναρμολόγηση του τελικού προϊόντος ή κάποιου ενδιάμεσου από μια οικογένεια προϊόντων. Ένα τέτοιο σύστημα έχει προσαρμόσιμη παραγωγική ικανότητα και μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να είναι συμβατό με τις απαιτήσεις των νέων τεχνολογιών παραγωγής (Dashchenko, Elchov, and Dashchenko 2006). Η κύρια εφαρμογή ενός RAS είναι στην αυτοκινητοβιομηχανία (συναρμολόγηση κινητήρων). Μια παραλλαγή των RAS είναι η μικροσυναρμολόγηση, στόχος της οποίας είναι η επιλογή, η τοποθέτηση και η ένωση μικρών εξαρτημάτων σε υποστρώματα με ανοχή τάξης μικρομέτρων (μm). Η κύρια εφαρμογή της στη βιομηχανία είναι η συναρμολόγηση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε επίπεδα υποστρώματα, συνήθως σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) με τη χρήση γρήγορων μηχανών *pick-and-place* μεγάλης ακριβείας (Gielisch et al. 2020).

4.3.3 Είδος Έρευνας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μεγαλύτερη ισχύ έχουν οι μεθοδολογίες και τεχνολογίες που έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες και έχει έτσι αξιολογηθεί πρακτικά η αποτελεσματικότητά τους. Από την εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες συλλέγονται πολύτιμες πληροφορίες για τη διαδικασία εφαρμογής της εκάστοτε μεθοδολογίας, πιθανά εμπόδια που εμφανίστηκαν στην πορεία και τους τρόπους που αυτά προσπεράστηκαν. Σε αντίθεση μια θεωρητική έρευνα μπορεί να εισάγει καινοτόμες ιδέες και τεχνικές, αλλά αναμένεται επιπλέον ανάλυση ώστε αυτές να είναι υλοποιήσιμες.

Οι πειραματικές έρευνες ανατροφοδοτούν πολύ χρήσιμες πληροφορίες ως προς την αποτελεσματικότητα, αλλά δεν λαμβάνουν υπόψη παράγοντες αβεβαιότητας που

υπάρχουν σε πραγματικές συνθήκες. Οι βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις συνοψίζουν αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών και συνήθως καταλήγουν σε κενά της βιβλιογραφίας που χρειάζονται περαιτέρω ανάπτυξη.

Από τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης φαίνεται ότι η πλειοψηφία των ερευνών είναι σε θεωρητικό βαθμό, γεγονός που παρατηρείται συχνά στην επιστημονική κοινότητα για ένα νεοεισαχθέν αντικείμενο. Εφόσον το RMS είναι η βέλτιστη λύση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της σύγχρονης βιομηχανίας, αναμένεται αύξηση στη δοκιμή των μεθόδων και των τεχνολογιών και παράλληλη αύξηση των εμπειρικών δεδομένων από τη λειτουργία ενός RMS.

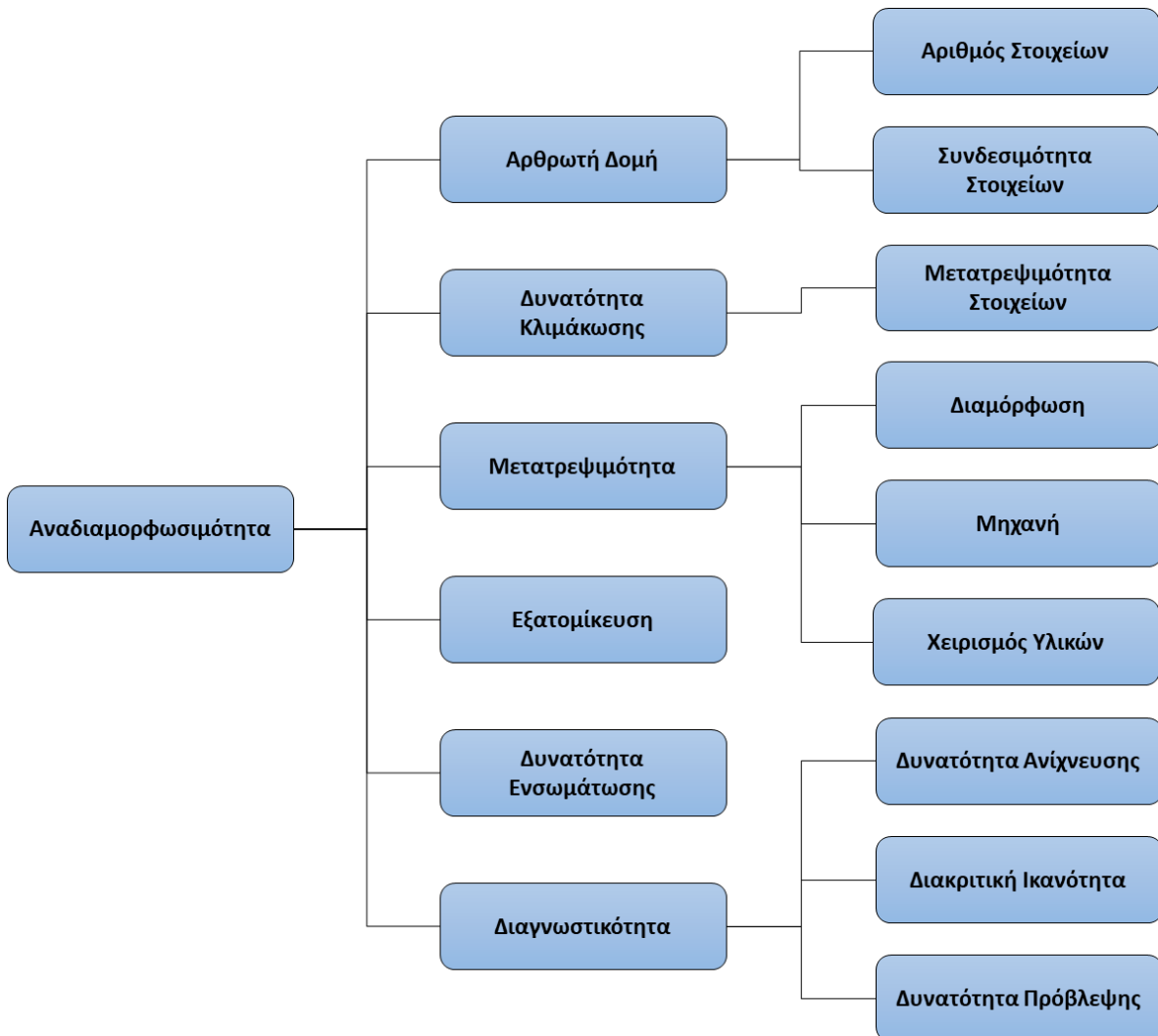
Το πρόβλημα έλλειψης πρακτικών εφαρμογών του RMS έχει σημειωθεί και από τις έρευνες των Andersen et al. (2017; Davrajh et al. (2012); Elmaraghy (2006); Malhotra, Raj, and Arora (2012); Prasad and Jayswal (2019); Rösiö and Säfsten (2013).

4.3.4 Χαρακτηριστικά του RMS που χρησιμοποιούνται

Τα RMS πρέπει να κατέχουν 6 χαρακτηριστικά: αρθρωτή δομή, δυνατότητα κλιμάκωσης, μετατρεψιμότητα, εξατομίκευση, δυνατότητα ενσωμάτωσης, διαγνωστικότητα. Τα βασικά χαρακτηριστικά συνιστούν τη βάση για την επίτευξη της αναδιαμορφωσιμότητας του συστήματος. Σκοπός αυτής της ερευνητικής κατεύθυνσης είναι να προσδιοριστεί η σημαντικότητα των χαρακτηριστικών που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας ή τεχνολογίας και να αναλυθούν οι μέθοδοι για την μέτρηση της αναδιαμορφωσιμότητας.

Οι Gumasta et al. (2011) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για την μέτρηση του δείκτη αναδιαμορφωσιμότητας. Αρχικά γίνεται η μέτρηση του καθενός ξεχωριστού χαρακτηριστικού και στη συνέχεια συνδυάζονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τη θεωρία χρησιμότητας πολλαπλών χαρακτηριστικών (multi-attribute utility theory). Η τιμή της αρθρωτή δομής εξαρτάται από τις συσχετίσεις μεταξύ των μηχανών του συστήματος. Η αποδοτικότητα του συστήματος δίνει τη τιμή της κλιμάκωσης. Η μετατρεψιμότητα εξαρτάται από τις εισροές των μηχανών, της διάταξής τους και της διαμόρφωσής τους, όπως επίσης από το σύστημα χειρισμού υλικών. Η διαγνωστικότητα είναι η ικανότητα αυτόματης ανάγνωσης της τρέχουσας κατάστασης ενός συστήματος για τον εντοπισμό και τη διάγνωση της αιτίας των ελαττωματικών προϊόντων και τη γρήγορη διόρθωση της παραγωγικής διεργασίας. Όλοι οι παράγοντες που έχουν ληφθεί υπόψη στη μέτρηση των χαρακτηριστικών φαίνονται και στο **Σχήμα 4-25**. Ύστερα από την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών, η βαρύτητα τους μπορεί να καθοριστεί από τον παραγωγό βάσει του τύπου προϊόντος που παράγεται στο σύστημα. Για παράδειγμα αν η ζήτηση ενός προϊόντος αλλάζει συχνά, τότε πρέπει να προστεθεί βαρύτητα στη δυνατότητα κλιμάκωσης και αν η

εξερχόμενη ποιότητα είναι η ύψιστη προτεραιότητα, πρέπει να προστεθεί βαρύτητα στη διαγνωστικότητα.

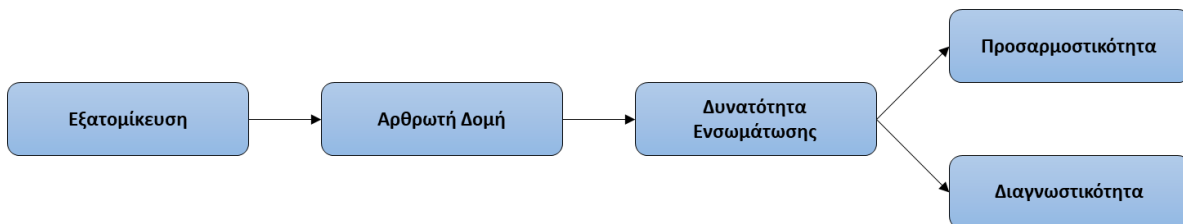


Σχήμα 4-25 Βασικά Χαρακτηριστικά της Αναδιαμορφωσιμότητας
(Gumasta et al. 2011)

Βάσει εμπειρικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από ερωτηματολόγια, οι Maganha, Silva, and Ferreira (2020) ανέλυσαν τα χαρακτηριστικά της αναδιαμορφωσιμότητας και τον αντίκτυπο που επιφέρουν στην απόδοση του παραγωγικού συστήματος. Το συμπέρασμα που κατέληξαν είναι:

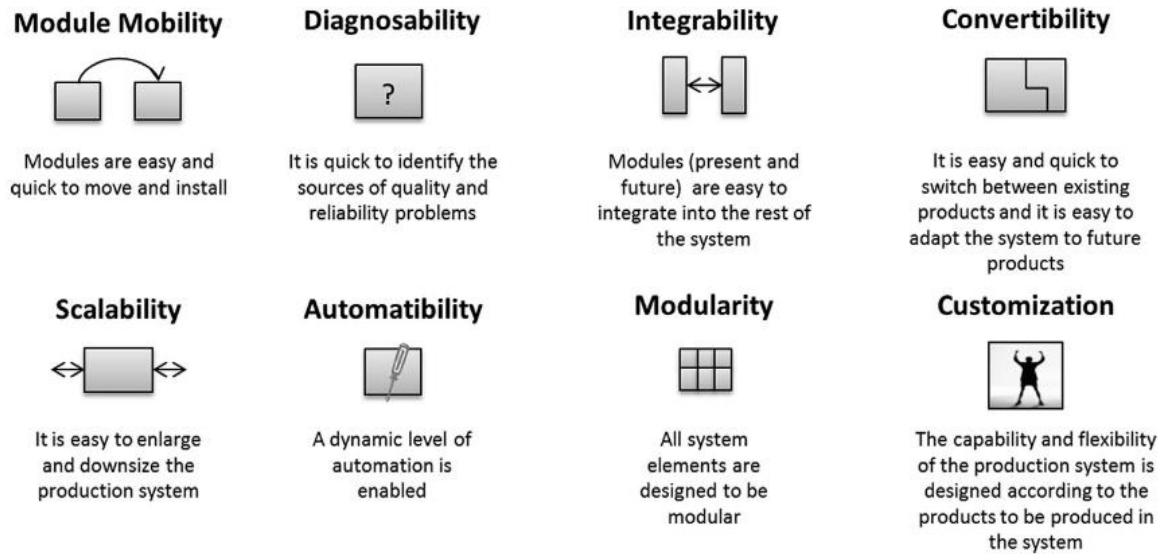
- Η *εξατομίκευση* σε συνδυασμό με τη *δυνατότητα ενσωμάτωσης* και την *αρθρωτή δομή* μπορεί να συντελέσουν στην ταχεία παράδοση.
- Η *προσαρμοστικότητα* (*μετατρεψιμότητα* και *δυνατότητα κλιμάκωσης*), σε συνδυασμό με τη *δυνατότητα ενσωμάτωσης* και την *αρθρωτή δομή* μπορεί να συντελέσουν στην αύξηση της ευελιξίας του συστήματος.
- Η *διαγνωστικότητα* είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διασφάλιση της εξερχόμενης ποιότητας.
- Η *δυνατότητα ενσωμάτωσης* και η *αρθρωτή δομή* έχουν αντίκτυπο στο βαθμό προσαρμοστικότητας του συστήματος.

Σε συνέχεια αυτής της έρευνας ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για το σταδιακό σχεδιασμό ενός RMS και τα χαρακτηριστικά της αναδιαμορφωσιμότητας που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο κάθε στάδιο Maganha et al. (2021). Από αυτή τη μεθοδολογία έχει προκύψει μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ενσωμάτωσης των χαρακτηριστικών και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση (**Σχήμα 4-26**). Όπως φαίνεται έχουν θεωρήσει το χαρακτηριστικό της εξατομίκευσης ως βάση για την επίτευξη της αναδιαμορφωσιμότητας.



Σχήμα 4-26 Διαδικασία Ενσωμάτωσης των Χαρακτηριστικών του RMS
(Maganha et al. 2021)

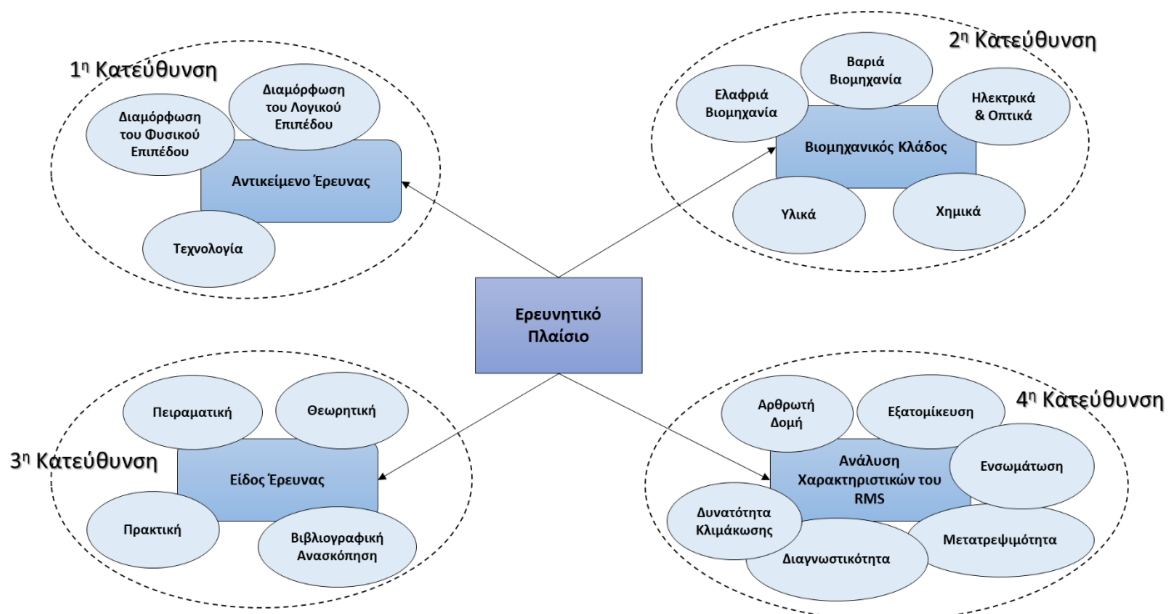
Να σημειωθεί ότι έχει παρατηρηθεί σε πολλές έρευνες γίνεται η αναφορά 5 βασικών χαρακτηριστικών του RMS. Σε αυτές τις έρευνες το χαρακτηριστικό της δυνατότητα κλιμάκωσης και της μετατρεψιμότητα ορίζονται ως ένα χαρακτηριστικό με τα ίδια γνωρίσματα που έχει ονομαστεί προσαρμοστικότητα (adaptability). Επίσης, οι Rösjö and Säfsten (2013) προτείνουν τη σύσταση της αναδιαμορφωσιμότητας από 8 χαρακτηριστικά, δηλαδή με την προσθήκη της κινητικότητας των δομοστοιχείων και της δυνατότητας αυτοματισμού **Εικόνα 4-7**. Στην παρούσα έρευνα έχει διατηρηθεί ο διαχωρισμός σε 6 βασικά χαρακτηριστικά όπως και προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Koren et al. (1999).



Εικόνα 4-7 Χαρακτηριστικά της Αναδιαμορφωσιμότητας
(Rösiö and Säfsten 2013)

5. Συμπεράσματα

Το Αναδιαμορφώσιμο Σύστημα Παραγωγής έχει αναγνωριστεί ευρέως ως το πρότυπο σύστημα παραγωγής του μέλλοντος, λόγω της ικανότητάς του να μεταβάλλει γρήγορα και αποτελεσματικά την παραγωγικότητα και την λειτουργικότητά του προκειμένου να ανταποκρίνεται στις αλλαγές της ζήτησης και στα προϊόντα. Στην παρούσα έρευνα διερευνήθηκε το αντικείμενο του RMS ώστε να το εντάξει σε ένα πλαίσιο (Σχήμα 5-1) και να εντοπίσει τις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Από την ανάλυση των πτυχών του αντικειμένου προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.



Σχήμα 5-1 Ερευνητικό Πλαίσιο

Τα πλαίσια και οι μέθοδοι σχεδιασμού που εξετάστηκαν ασχολούνται με τα RMS, αλλά οι προσεγγίσεις και η ορολογία που χρησιμοποιούν ποικίλλουν. Παρατηρείται ότι στις μεθοδολογίες σχεδιασμού διαμόρφωσης του φυσικού επιπέδου, τα σημεία εκκίνησης και κατάληξης μπορεί να διαφέρουν. Κάποιες μεθοδολογίες σταματάνε στο σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής/διαμόρφωσης του συστήματος, άλλες συνεχίζουν και προτείνουν βήματα για την υλοποίηση της διαμόρφωσης και άλλες σταματάνε στην αξιολόγηση της επένδυσης του προτεινόμενου σχεδιασμού, με την υπόθεση ότι ακολουθεί μία άλλη μεθοδολογία για τον λεπτομερή σχεδιασμό.

Πολλές έρευνες ασχολούνται μόνο με τον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος και δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαδικασία αναδιαμόρφωσης που θα χρειαστεί το σύστημα σε

περίπτωση αλλαγής στην αγορά. Κάποιες μεθοδολογίες λαμβάνουν υπόψη μόνο το επίπεδο του συστήματος παραγωγής, ενώ δεν ασχολούνται με το σχεδιασμό των χαμηλότερων επιπέδων, όπως είναι το επίπεδο μηχανής, εργαλείων και επίπεδο προϊόντος. Με αυτόν τον τρόπο παραλείπονται αποφάσεις σχετικά με άλλα επίπεδα του συστήματος, τον τύπο και το βαθμό αναδιαμορφωσιμότητας, οι οποίες είναι κρίσιμες στο στάδιο του λεπτομερούς σχεδιασμού.

Παρατηρείται, όπως αναφέρθηκε, ότι δεν υπάρχει συμφωνία σχετικά με τη δομή της διαδικασίας σχεδιασμού που οφείλεται στην έλλειψη γνώσης ως προς το τι είναι το RMS και πώς μπορεί να αναπτυχθεί. Πρόβλημα αποτελεί επίσης το ότι δεν υπάρχουν οδηγίες για την υποβοήθηση επιλογής κατάλληλης μεθοδολογίας. Έρευνες έχουν προσπαθήσει να εντάξουν και άλλες πτυχές του RMS κατά το σχεδιασμό, δηλαδή ταυτόχρονη ανάπτυξη οικογένειας προϊόντων με το σχεδιασμό του συστήματος, πράγμα το οποίο δεν είναι εφαρμόσιμο εφόσον δεν λαμβάνουν υπόψη όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για την υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας.

Από την ποσοτική ανάλυση στην κατεύθυνση 3: *Είδος Έρευνας*, παρατηρείται ότι υπάρχει έλλειψη πειραματικών και πρακτικών εφαρμογών, γεγονός που εντύνει την έλλειψη γνώσης των εμποδίων που παρουσιάζονται κατά την υλοποίηση και λειτουργία του RMS. Το πρόβλημα αυτό εντείνουν κατασκευαστικές εταιρείες που ίσως έχουν ενσωματώσει το RMS στη γραμμή παραγωγής τους, αλλά δεν δημοσιεύουν ευρήματα/προβλήματα που αντιμετώπισαν κατά την εφαρμογή ή τη λειτουργία του, ώστε να διατηρήσουν το πλεονέκτημα απέναντι στις ανταγωνιστικές εταιρείες.

Επιπλέον παρατηρείται ότι δεν υπάρχει συμφωνία περί των χαρακτηριστικών της *αναδιαμορφωσιμότητας*. Καθώς υπάρχουν έρευνες οι οποίες έχουν ενοποιήσει το χαρακτηριστικό της *δυνατότητας κλιμάκωσης* και της *μετατρεψιμότητας* ως ένα νέο χαρακτηριστικό που ονομάστηκε *προσαρμοστικότητα* (αναφορές), του οποίου όμως η χρησιμότητα είναι ακόμα απροσδιόριστη. Αντιθέτως, άλλες έρευνες αναφέρουν 8 χαρακτηριστικά, δηλαδή προσθήκη της *κινητικότητα* και της *δυνατότητας αυτοματισμού* στα 6 βασικά χαρακτηριστικά, παράλληλα οι Rösiö and Säfsten (2013) υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών της *αναδιαμορφωσιμότητας* και των τύπων *ευελιξίας*. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες, όπως είναι φυσικό, δημιουργούν σύγχυση όσον αφορά τον προσδιορισμό της *αναδιαμορφωσιμότητας* και γίνεται δυσκολότερη η μέτρησή της, αφού δεν υπάρχει ένας κοινός γνώμονας για τα χαρακτηριστικά της. Τέλος, άλλες μεθοδολογίες δεν λαμβάνουν υπόψη τόσο το επίπεδο *αναδιαμορφωσιμότητας* που απαιτείται για την υλοποίηση της εκάστοτε μεθοδολογίας, όσο και τις πραγματικές οικονομικές δυνατότητες για την αιτιολόγηση της εισαγωγής του RMS.

Σε πολλές έρευνες αναφέρεται ότι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας, είναι η *εξατομίκευση* (85 αναφορές), το οποίο αναφέρεται και ως η κινητήρια δύναμη της αναδιαμορφωσιμότητας (Maganha et al. 2021). Όμως, από την ποσοτικοποίηση των δημοσιεύσεων φαίνεται ότι το χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των ερευνών είναι η *αρθρωτή δομή* (138 αναφορές) και στη 2^η θέση βρίσκεται η *ενσωμάτωση* (92 αναφορές).

Η αξιολόγηση των διαθέσιμων υποστηρικτικών προσεγγίσεων και μεθοδολογιών για το σχεδιασμό θεωρείται σημαντική, προκειμένου να υποστηριχθεί η μετάβαση προς τα Αναδιαμορφώσιμα Συστήματα Παραγωγής στη βιομηχανία. Ωστόσο η ανάλυση αποκαλύπτει πολυάριθμες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, όσον αφορά τους περιορισμούς των μεθοδολογιών που εφαρμόζονται σε όλα τα στάδια της διαμόρφωσης του φυσικού ή λογικού επιπέδου, όσο και της έλλειψης υποστηρικτικών εργαλείων για τον τρόπο επιλογής της κατάλληλης μεθοδολογίας.

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα είναι:

- Διαμόρφωση μιας γενικευμένης μεθοδολογίας σχεδιασμού του φυσικού και λογικού επιπέδου ενός συστήματος, πλήρως παραμετροποιήσιμη ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί στις ειδικές ανάγκες των χρηστών.
- Περαιτέρω έρευνα ώστε να βελτιστοποιηθούν οι μέθοδοι μοντελοποίησης ενός RMS, με στόχο την επίτευξη ενός ακριβούς Ψηφιακού Διδύμου (Digital-Twin) που όπως φαίνεται από την τάση της επιστημονικής κοινότητας, είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση και τον έλεγχο πολύπλοκων συστημάτων.
- Προσδιορισμός τρόπων με τους οποίους ένα σύστημα μπορεί να εκφράσει την ανάγκη του για αναδιαμόρφωση, ώστε να ανταπεξέλθει σε αλλαγές της αγοράς και ανάγκες παραγωγικότητας.
- Αύξηση των πρακτικών και πειραματικών εφαρμογών ώστε να αποκτηθεί γνώση σχετικά με τα εμπόδια στην υλοποίηση και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός RMS σε πραγματικές συνθήκες.
- Εμβάθυνση στον ορισμό της αναδιαμορφωσιμότητας και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της, με σκοπό αυτή η έννοια να γίνει κατανοητή και να μπορεί εν δυνάμει να μετρηθεί με σαφή και ακριβή τρόπο.

Σαν αποτέλεσμα της παρούσας έρευνας, συντάσσεται ένα άρθρο όπου έχουν συνοψιστεί τα αποτελέσματα για δημοσίευση σε μία ερευνητική βάση δεδομένων.

Συμπληρωματικό Υλικό

Υποστηρικτικές πληροφορίες σχετικά με την βιβλιογραφική ανασκόπηση μπορούν να ληφθούν από: [Scopus Results](#).

Παράρτημα

Η έρευνα περιέχει πολλούς τεχνικούς όρους ελεύθερα μεταφρασμένους στην ελληνική γλώσσα. Κρίνεται χρήσιμο να επεξηγηθούν αυτοί οι όροι και η διαδικασία επιλογής του ελληνικού όρου αναλυτικότερα σε ξεχωριστή ενότητα όπου θα ώστε να μην διαταραχθεί η ροή του κειμένου.

Πίνακας 2 Λεξικό Όρων

<i>Αγγλικός όρος</i>	<i>Ελληνικός όρος</i>	<i>Επεξήγηση</i>
Reconfigurable	Αναδιαμορφώσιμο	Το πρόθεμα <i>re-</i> έχει μεταφραστεί ως <i>ανα-</i> και το ουσιαστικό <i>configuration</i> ως <i>διαμόρφωση</i>
Module	Δομοστοιχείο	Η δομική μονάδα ενός ευρύτερου συνόλου. Εναλλακτικές μεταφράσεις που βρέθηκαν είναι <i>μονάδα, ενότητα, τμήμα</i> . Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος όρος γιατί κρίθηκε ότι περιγράφει καλύτερα τη έννοια της λέξης.
Modular	Αρθρωτός	Το στοιχείο υλικού ή λογισμικού που αποτελείται από επιμέρους στοιχεία. Εναλλακτικές μεταφράσεις που βρέθηκαν είναι <i>σπονδυλωτός, δομοστοιχειωτός</i> .
Modularity	Αρθρωτή δομή	Η ιδιότητα ενός αρθρωτού στοιχείου.
Convertibility	Μετατρεψιμότητα	Η ιδιότητα ενός στοιχείου να μετατρέπεται.
Integrability	Δυνατότητα ενσωμάτωσης	Το ρήμα <i>integrate</i> μεταφράζεται ως <i>ενσωμάτωση</i> .

Scalability	Δυνατότητα κλιμάκωσης	Το ουσιαστικό <i>scalable</i> μεταφράζεται ως κλιμακώσιμος. Εναλλακτικές μεταφράσεις που βρέθηκαν είναι <i>επεκτάσιμος, επιδεκτικός διεύρυνσης</i> . Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος όρος γιατί κρίθηκε ότι περιγράφει καλύτερα τη έννοια της λέξης.
Customisation	Εξατομίκευση	Η προσαρμογή στις απαιτήσεις. Εναλλακτική μετάφραση που βρέθηκε είναι <i>προσαρμογή</i> .
Dedicated	Εξειδικευμένος	Εναλλακτικές μεταφράσεις που βρέθηκαν είναι <i>αφιερωμένος, αφοσιωμένος, ειδικός</i> . Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος όρος γιατί είναι πιο κατάλληλος για την περιγραφή ιδιότητας ενός συστήματος παραγωγής.

6. Κατάλογος Αναφορών

- Abbasi, Morteza, and Mahmoud Houshmand. 2009. "Production Planning of Reconfigurable Manufacturing Systems with Stochastic Demands Using Tabu Search." *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 17(1–2):125–48. doi: 10.1504/ijmtm.2009.023782.
- Abbasi, Morteza, and Mahmoud Houshmand. 2011. "Production Planning and Performance Optimization of Reconfigurable Manufacturing Systems Using Genetic Algorithm." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54(1–4):373–92. doi: 10.1007/s00170-010-2914-x.
- Abdi, M. Reza, and Ashraf Labib. 2017. "RMS Capacity Utilisation: Product Family and Supply Chain." *International Journal of Production Research* 55(7):1930–56. doi: 10.1080/00207543.2016.1229066.
- Abdi, M. Reza, Ashraf Labib, Farideh Delavari Edalat, and Alireza Abdi. 2018. "Integrated Reconfigurable Manufacturing Systems and Smart Value Chain: Sustainable Infrastructure for the Factory of the Future." *Integrated Reconfigurable Manufacturing Systems and Smart Value Chain: Sustainable Infrastructure for the Factory of the Future* 1–279. doi: 10.1007/978-3-319-76846-5.
- Al-Zaher, A., W. Elmaraghy, and Z. J. Pasek. 2013. "RMS Design Methodology for Automotive Framing Systems BIW." *Journal of Manufacturing Systems* 32(3):436–48. doi: 10.1016/j.jmsy.2013.04.010.
- Andersen, Ann Louise, Thomas Ditlev Brunoe, Kjeld Nielsen, and Mads Bejlegaard. 2018. "Evaluating the Investment Feasibility and Industrial Implementation of Changeable and Reconfigurable Manufacturing Concepts." *Journal of Manufacturing Technology Management* 29(3):449–77. doi: 10.1108/JMTM-03-2017-0039.
- Andersen, Ann Louise, Thomas Ditlev Brunoe, Kjeld Nielsen, and Carin Rösiö. 2017. "Towards a Generic Design Method for Reconfigurable Manufacturing Systems: Analysis and Synthesis of Current Design Methods and Evaluation of Supportive Tools." *Journal of Manufacturing Systems* 42:179–95. doi: 10.1016/j.jmsy.2016.11.006.
- An, Kyoungho, Adam Trewyn, Aniruddha Gokhale, and Shivakumar Sastry. 2011. "Model-Driven Performance Analysis of Reconfigurable Conveyor Systems Used in Material Handling Applications." doi: 10.1109/ICCPS.2011.12.

- Barhak, Jacob, Dragan Djurdjanovic, Patrick Spicer, and Reuven Katz. 2005. "Integration of Reconfigurable Inspection with Stream of Variations Methodology." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45(4-5):407-19. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.011.
- Battaïa, Olga, Alexandre Dolgui, and Nikolai Guschinsky. 2017. "Decision Support for Design of Reconfigurable Rotary Machining Systems for Family Part Production." *International Journal of Production Research* 55(5):1368-85. doi: 10.1080/00207543.2016.1213451.
- Beauville dit Eynaud, Amélie, Nathalie Klement, Lionel Roucoules, Olivier Gibaru, and Laurent Durville. 2022. "Framework for the Design and Evaluation of a Reconfigurable Production System Based on Movable Robot Integration." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118(7-8):2373-89. doi: 10.1007/s00170-021-08030-1.
- Bensmaine, Abderrahmane, Mohammed Dahane, and Lyes Benyoucef. 2013. "A Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Based Approach for Optimal Machines Selection in Reconfigurable Manufacturing Environment." *Computers and Industrial Engineering* 66(3):519-24. doi: 10.1016/j.cie.2012.09.008.
- Bensmaine, A., M. Dahane, and L. Benyoucef. 2014. "A New Heuristic for Integrated Process Planning and Scheduling in Reconfigurable Manufacturing Systems." *International Journal of Production Research* 52(12):3583-94. doi: 10.1080/00207543.2013.878056.
- Bi, Z. M., Sherman Y. T. Lang, M. Verner, and P. Orban. 2008. "Development of Reconfigurable Machines." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 39(11-12):1227-51. doi: 10.1007/s00170-007-1288-1.
- Bortolini, Marco, Lucia Botti, Francesco Gabriele Galizia, and Alberto Regattieri. 2021. "Bi-objective Design and Management of Reconfigurable Manufacturing Systems to Optimize Technical and Ergonomic Performances." *Applied Sciences (Switzerland)* 11(1):1-14. doi: 10.3390/app11010263.
- Bortolini, Marco, Francesco Gabriele Galizia, Cristina Mora, and Francesco Pilati. 2019. "Reconfigurability in Cellular Manufacturing Systems: A Design Model and Multi-Scenario Analysis." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104(9-12):4387-97. doi: 10.1007/s00170-019-04179-y.
- Bruccoleri, Manfredi, Zbigniew J. Pasek, and Yoram Koren. 2006. "Operation Management in Reconfigurable Manufacturing Systems: Reconfiguration for Error

- Handling.” *International Journal of Production Economics* 100(1):87–100. doi: 10.1016/j.ijpe.2004.10.009.
- Butler, Louwrens Johannes, and Glen Bright. 2008. “Autonomous Materials Handling Robot for Advanced Manufacturing Applications.” *Journal of Konbin* 8(1):17–26. doi: 10.2478/v10040-008-0096-5.
- Cachapa, Daniel, Robert Harrison, and Armando Colombo. 2011. “Configuration of SoA-Based Devices in Virtual Production Cells.” *International Journal of Production Research* 49(24):7397–7423. doi: 10.1080/00207543.2010.495954.
- Choi, S. H., and Y. Cai. 2014. “A Virtual Prototyping System with Reconfigurable Actuators for Multi-Material Layered Manufacturing.” *Computers in Industry* 65(1):37–49. doi: 10.1016/j.compind.2013.08.001.
- Collins, J. E. T., and G. Bright. 2011. “Automatic Tool-Changing within the Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigm.” *South African Journal of Industrial Engineering* 22(2):68–79. doi: 10.7166/22-2-16.
- Copani, Giacomo, and Marcello Urgo. 2015. “Innovative Flexibility-Oriented Business Models and System Configuration Approaches: An Industrial Application.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 11:10–17. doi: 10.1016/j.cirpj.2015.05.008.
- Dashchenko, Anatoli I. 2006. “Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories.” *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories* 1–759. doi: 10.1007/3-540-29397-3/COVER.
- Dashchenko, O. A., P. E. Elchov, and Anatoli I. Dashchenko. 2006. “Application of Non-Traditional Assembly Methods in Reconfigurable Manufacturing.” *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories* 569–81. doi: 10.1007/3-540-29397-3_28.
- Davrajh, S., G. Bright, and R. Stopforth. 2012. “Modular Research Equipment for On-Line Inspection in Advanced Manufacturing Systems.” *South African Journal of Industrial Engineering* 23(3):103–18. doi: 10.7166/23-3-514.
- Davrajh, Shaniel, and Glen Bright. 2013. “Advanced Quality Management System for Product Families in Mass Customization and Reconfigurable Manufacturing.” *Assembly Automation* 33(2):127–38. doi: 10.1108/01445151311306636.
- Eguia, Ignacio, Sebastian Lozano, Jesus Racero, and Fernando Guerrero. 2011. “A Methodological Approach for Designing and Sequencing Product Families in

- Reconfigurable Disassembly Systems.” *Journal of Industrial Engineering and Management* 4(3):418–35. doi: 10.3926/jiem.2011.v4n3.p418-435.
- Eguia, Ignacio, Jesus Racero, Fernando Guerrero, and Sebastian Lozano. 2013. “Cell Formation and Scheduling of Part Families for Reconfigurable Cellular Manufacturing Systems Using Tabu Search.” *SIMULATION* 89(9):1056–72. doi: 10.1177/0037549713491590.
- Elmaraghy, Hoda A. 2006. “Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms.” *Int J Flex Manuf Syst* 17:261–76. doi: 10.1007/s10696-006-9028-7.
- ElMaraghy, Hoda A. 2009. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer.
- Elmaraghy, W. H., O. A. Nada, and H. A. Elmaraghy. 2008. “Quality Prediction for Reconfigurable Manufacturing Systems via Human Error Modelling.” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21(5):584–98. doi: 10.1080/09511920701233464.
- Falagas, ME, El Pitsouni, ... GA Malietzis-The FASEB, and undefined 2008. n.d. “Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and Weaknesses.” *Wiley Online Library*.
- Farid, Amro M., and Luis Ribeiro. 2015. “An Axiomatic Design of a Multiagent Reconfigurable Mechatronic System Architecture.” *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11(5):1142–55. doi: 10.1109/TII.2015.2470528.
- Galán, Ricardo. 2008. “Hybrid Heuristic Approaches for Scheduling in Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Studies in Computational Intelligence* 128:211–53. doi: 10.1007/978-3-540-78985-7_9.
- Galan, R., J. Racero, I. Eguia, and J. M. Garcia. 2007. “A Systematic Approach for Product Families Formation in Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23(5):489–502. doi: 10.1016/j.rcim.2006.06.001.
- Garbie, Ibrahim. 2014. “Performance Analysis and Measurement of Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Journal of Manufacturing Technology Management* 25(7):934–57. doi: 10.1108/JMTM-07-2011-0070.
- Garbie, Ibrahim H. 2014. “A Methodology for the Reconfiguration Process in Manufacturing Systems.” *Journal of Manufacturing Technology Management* 25(6):891–915. doi: 10.1108/JMTM-06-2011-0064.

- Gielisch, Christoph, Karl Peter Fritz, Anika Noack, and André Zimmermann. 2019. "A Product Development Approach in the Field of Micro-Assembly with Emphasis on Conceptual Design." *Applied Sciences (Switzerland)* 9(9). doi: 10.3390/app9091920.
- Gielisch, Christoph, Karl Peter Fritz, Benedikt Wigger, and André Zimmermann. 2020. "Conceptual Planning of Micro-Assembly for a Better Utilization of Reconfigurable Manufacturing Systems." *Applied Sciences (Switzerland)* 10(8). doi: 10.3390/APP10082806.
- Goyal, Kapil Kumar, Pramod Kumar Jain, and Madhu Jain. 2013. "A Novel Methodology to Measure the Responsiveness of RMTs in Reconfigurable Manufacturing System." *Journal of Manufacturing Systems* 32(4):724–30. doi: 10.1016/j.jmsy.2013.05.002.
- Gumasta, Kapil, Santosh Kumar Gupta, Lyes Benyoucef, and M. K. Tiwari. 2011. "Developing a Reconfigurability Index Using Multi-Attribute Utility Theory." *International Journal of Production Research* 49(6):1669–83. doi: 10.1080/00207540903555536.
- Gu, P., M. Hashemian, and A. Y. C. Nee. 2004. "Adaptable Design." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53(2):539–57. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60028-6.
- Gupta, Ashutosh, P. K. Jain, and Dinesh Kumar. 2013. "A Novel Approach for Part Family Formation Using K-Means Algorithm." *Advances in Manufacturing* 1(3):241–50. doi: 10.1007/s40436-013-0032-3.
- Gupta, Ashutosh, Pramod K. Jain, and Dinesh Kumar. 2014. "Part Family Formation for Reconfigurable Manufacturing System Using K-Means Algorithm." *International Journal of Internet Manufacturing and Services* 3(3):244–62. doi: 10.1504/IJIMS.2014.062442.
- Gu, Xi. 2022. "Modeling of Reconfigurable Manufacturing System Architecture with Geometric Machines and In-Stage Gantries." *Journal of Manufacturing Systems* 62:102–13. doi: 10.1016/j.jmsy.2021.11.005.
- Hasan, Faisal, and P. K. Jain. 2016. "A Neural Network-Based Approach for Part Family Classification for a Reconfigurable Manufacturing System." *International Journal of Operational Research* 25(2):143–68. doi: 10.1504/IJOR.2016.073954.
- Hees, Andreas, Corné S. L. Schutte, and Gunther Reinhart. 2017. "A Production Planning System to Continuously Integrate the Characteristics of Reconfigurable Manufacturing Systems." *Production Engineering* 11(4–5):511–21. doi: 10.1007/s11740-017-0744-5.

- Henry, Sébastien, Eric Zamaï, and Mireille Jacomino. 2012. "Logic Control Law Design for Automated Manufacturing Systems." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25(4):824–36. doi: 10.1016/j.engappai.2012.01.005.
- Hsieh, Fu Shiung. 2018. "Design of Scalable Agent-Based Reconfigurable Manufacturing Systems with Petri Nets." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31(8):748–59. doi: 10.1080/0951192X.2018.1429665.
- Huang, Sihan, Guoxin Wang, Xiwen Shang, and Yan Yan. 2018. "Reconfiguration Point Decision Method Based on Dynamic Complexity for Reconfigurable Manufacturing System (RMS)." *Journal of Intelligent Manufacturing* 29(5):1031–43. doi: 10.1007/s10845-017-1318-2.
- Huang, Sihan, Guoxin Wang, and Yan Yan. 2022. "Building Blocks for Digital Twin of Reconfigurable Machine Tools from Design Perspective." *International Journal of Production Research* 60(3):942–56. doi: 10.1080/00207543.2020.1847340.
- Hu, Fuwen. 2022. "Digital Twin-Driven Reconfigurable Fixturing Optimization for Trimming Operation of Aircraft Skins." *Aerospace* 9(3). doi: 10.3390/aerospace9030154.
- Jiang, Zengqiang, E. Mingcheng, Yu Liu, Jianxin Liu, and Yu Li. 2017. "Study of Manufacturing Resource Perception and Process Control of a Radio-Frequency-Identification-Enabled Decentralized Flexible Manufacturing System." *Advances in Mechanical Engineering* 9(1). doi: 10.1177/1687814016687449.
- Kaid, Husam, Abdulrahman Al-Ahmari, Zhiwu Li, and Wadea Ameen. 2021. "Deadlock Control and Fault Detection and Treatment in Reconfigurable Manufacturing Systems Using Colored Resource-Oriented Petri Nets Based on Neural Network." *IEEE Access* 9:84932–47. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084995.
- Kaid, Husam, Abdulrahman Al-Ahmari, Zhiwu Li, and Reggie Davidrajuh. 2020. "Intelligent Colored Token Petri Nets for Modeling, Control, and Validation of Dynamic Changes in Reconfigurable Manufacturing Systems." *Processes* 8(3). doi: 10.3390/PR8030358.
- Katz, Reuven. 2007. "Design Principles of Reconfigurable Machines." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 34(5–6):430–39. doi: 10.1007/s00170-006-0615-2.
- Khanna, Kamal, and Rakesh Kumar. 2019. "Reconfigurable Manufacturing System: A State-of-the-Art Review." *Benchmarking* 26(8):2608–35. doi: 10.1108/BIJ-05-2018-0140/FULL/HTML.

- Koren, Y., U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, and H. van Brussel. 1999. "Reconfigurable Manufacturing Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48(2):527–40. doi: 10.1016/S0007-8506(07)63232-6.
- Koren Yoram, Arbor Ann, Ulsoy A. Galip, and Dexter. 2002. "RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEM HAVING A PRODUCTION CAPACITY METHOD FOR DESIGNING SAME AND METHOD FOR CHANGING ITS PRODUCTION CAPACITY." *Scientific American* 45(1):24.
- Koren, Yoram, Xi Gu, and Weihong Guo. 2018. "Reconfigurable Manufacturing Systems: Principles, Design, and Future Trends." doi: 10.1007/s11465-018-0483-0.
- Koren Yoram, and Katz Reuven. 2003. "Reconfigurable Apparatus and Method for Inspection during a Manufacturing Process."
- Koren Yoram, and Kota Sridhar. 1999. "Reconfigurable Machine Tool." 943.
- Kurniadi, Kezia Amanda, and Kwangyeol Ryu. 2020. "Maintaining Sustainability in Reconfigurable Manufacturing Systems Featuring Green-BOM." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 7(3):755–67. doi: 10.1007/s40684-020-00215-5.
- Kurniadi, Kezia Amanda, and Kwangyeol Ryu. 2021. "Development of Multi-Disciplinary Green-Bom to Maintain Sustainability in Reconfigurable Manufacturing Systems." *Sustainability (Switzerland)* 13(17). doi: 10.3390/su13179533.
- Lahrichi, Youssef, Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, and Sylvie Norre. 2021. "A Balance-First Sequence-Last Algorithm to Design RMS: A Matheuristic with Performance Guaranty to Balance Reconfigurable Manufacturing Systems." *Journal of Heuristics* 27(1–2):107–32. doi: 10.1007/s10732-021-09473-1.
- Landers, R. G., B. K. Min, and Y. Koren. 2001. "Reconfigurable Machine Tools." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50(1):269–74. doi: 10.1016/S0007-8506(07)62120-9.
- Leng, Jiewu, Qiang Liu, Shide Ye, Jianbo Jing, Yan Wang, Chaoyang Zhang, Ding Zhang, and Xin Chen. 2020. "Digital Twin-Driven Rapid Reconfiguration of the Automated Manufacturing System via an Open Architecture Model." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 63. doi: 10.1016/j.rcim.2019.101895.
- Lozano, Sebastián, Gabriel Villa, and Ignacio Eguía. 2017. "Data Envelopment Analysis with Multiple Modes of Functioning. Application to Reconfigurable Manufacturing Systems." *International Journal of Production Research* 55(24):7566–83. doi: 10.1080/00207543.2017.1391418.

- Maganha, Isabela, Cristovao Silva, and Luis Miguel D. F. Ferreira. 2020. "The Impact of Reconfigurability on the Operational Performance of Manufacturing Systems." *Journal of Manufacturing Technology Management* 31(1):145–68. doi: 10.1108/JMTM-12-2018-0450.
- Maganha, Isabela, Cristovao Silva, and Luis Miguel D. F. Ferreira. 2021. "The Sequence of Implementation of Reconfigurability Core Characteristics in Manufacturing Systems." *Journal of Manufacturing Technology Management* 32(2):356–75. doi: 10.1108/JMTM-09-2019-0342.
- Malhotra, Vasdev, Tilak Raj, and Ashok Arora. 2012. "Evaluation of Barriers Affecting Reconfigurable Manufacturing Systems with Graph Theory and Matrix Approach Evaluation of Barriers Affecting Reconfigurable Manufacturing Systems with Graph Theory and Matrix Approach." 27(1):88–94. doi: 10.1080/10426914.2011.551963.
- Mehrabi M. G., Ulsoy A. G., and Koren Y. 2000. "Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing." *Journal of Intelligent Manufacturing* 11:403–19.
- Mehrabi, M. G., A. G. Ulsoy, Y. Koren, and P. Heytler. 2002. "Trends and Perspectives in Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems." *Journal of Intelligent Manufacturing* 13(2):135–46. doi: 10.1023/A:1014536330551.
- Mittal, Kamal Kumar, Pramod Kumar Jain, and Dinesh Kumar. 2018. "Optimal Selection of Modular Products in Reconfigurable Manufacturing Systems Using Analytic Hierarchy Process." *International Journal of Logistics Systems and Management* 30(4):521–37. doi: 10.1504/IJLSM.2018.093586.
- Mittal, Kamal Kumar, Dinesh Kumar, and Pramod Kumar Jain. 2018. "A Systematic Approach for Optimum Configuration Selection in Reconfigurable Manufacturing System." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 99(6):629–35. doi: 10.1007/s40032-017-0369-7.
- Moghaddam, Shokraneh K., Mahmoud Houshmand, Kazuhiro Saitou, and Omid Fatahi Valilai. 2020. "Configuration Design of Scalable Reconfigurable Manufacturing Systems for Part Family." *International Journal of Production Research* 58(10):2974–96. doi: 10.1080/00207543.2019.1620365.
- Montalto, Aurelio, Serena Graziosi, Monica Bordegoni, Luca di Landro, and Michael Johannes Leonardus van Tooren. 2020. "An Approach to Design Reconfigurable Manufacturing Tools to Manage Product Variability: The Mass Customisation of Eyewear." *Journal of Intelligent Manufacturing* 31(1):87–102. doi: 10.1007/s10845-018-1436-5.

- Mpofu, Khumbulani, and Nkgatho Tlale. 2014. "A Morphology Proposal in Commercial-off-the-Shelf Reconfigurable Machine Tools." *International Journal of Production Research* 52(15):4440–55. doi: 10.1080/00207543.2013.851423.
- Mubarok Khamdi. 2010. "The Issues For The Implementation Of Reconfigurable Manufacturing Systems In Small And Medium Manufacturing Enterprises." Retrieved September 28, 2022 (https://core.ac.uk/display/230618494?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1).
- Napoleone, Alessia, Alessandro Bruzzone, Ann Louise Andersen, and Thomas Ditlev Brunoe. 2022. "Fostering the Reuse of Manufacturing Resources for Resilient and Sustainable Supply Chains." *Sustainability (Switzerland)* 14(10). doi: 10.3390/su14105890.
- Padayachee, J., and G. Bright. 2012. "Modular Machine Tools: Design and Barriers to Industrial Implementation." *Journal of Manufacturing Systems* 31(2):92–102. doi: 10.1016/j.jmsy.2011.10.003.
- Pal Singh, Prince, Jatinder Madan, and Harwinder Singh. 2021. "Composite Performance Metric for Product Flow Configuration Selection of Reconfigurable Manufacturing System (RMS)." *International Journal of Production Research* 59(13):3996–4016. doi: 10.1080/00207543.2020.1756511.
- Pattanaik, Laxmi Narayan, and Vikas Kumar. 2011. "Product Family Formation for Reconfigurable Manufacturing Using A Bi-Criterion Evolutionary Algorithm." *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice* 18(9):493–505.
- Prasad, Durga, and S. C. Jayswal. 2019a. "Assessment of a Reconfigurable Manufacturing System." *Benchmarking* 28(5):1558–75. doi: 10.1108/BIJ-06-2018-0147.
- Prasad, Durga, and S. C. Jayswal. 2019b. "Reconfigurable Manufacturing System - A New Class of Manufacturing System." *Management and Production Engineering Review* 10(4):37–47. doi: 10.24425/mper.2019.131443.
- Renna, P., and M. Ambrico. 2015. "Design and Reconfiguration Models for Dynamic Cellular Manufacturing to Handle Market Changes." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 28(2):170–86. doi: 10.1080/0951192X.2013.874590.
- Renzi, C., F. Leali, M. Cavazzuti, and A. O. Andrisano. 2014. "A Review on Artificial Intelligence Applications to the Optimal Design of Dedicated and Reconfigurable

- Manufacturing Systems.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72(1–4):403–18. doi: 10.1007/s00170-014-5674-1.
- Rösiö, Carin, and Kristina Säfsten. 2013. “Reconfigurable Production System Design - Theoretical and Practical Challenges.” *Journal of Manufacturing Technology Management* 24(7):998–1018. doi: 10.1108/JMTM-02-2012-0021.
- Sallez, Yves, Thierry Berger, and Thérèse Bonte. 2020. “The Concept of ‘Safety Bubble’ for Reconfigurable Assembly Systems.” *Manufacturing Letters* 24:77–81. doi: 10.1016/j.mfglet.2020.03.015.
- Saxena, Lokesh Kumar, and Promod Kumar Jain. 2012. “A Model and Optimisation Approach for Reconfigurable Manufacturing System Configuration Design.” *International Journal of Production Research* 50(12):3359–81. doi: 10.1080/00207543.2011.578161.
- Schou, Casper, Daniel Grud Hellerup Sørensen, Chen Li, Thomas Ditlev Brunø, and Ole Madsen. 2020. “Determining Manufacturing System Changes Based on New Product Specifications.” *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing* 14(4):590–607. doi: 10.1108/JGOSS-10-2019-0060.
- Shabaka, A. I., and H. A. Elmaraghy. 2007. “Generation of Machine Configurations Based on Product Features.” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 20(4):355–69. doi: 10.1080/09511920600740627.
- Shukalov, A. v, D. A. Zakoldaev, I. O. Zharinov, and O. O. Zharinov. 2020. “Distribution of Software between Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Journal of Physics: Conference Series* 1515. doi: 10.1088/1742-6596/1515/2/022031.
- Sibanda, Vennan, Khumbulani Mpofo, and John Trimble. 2021. “Methodology for the Design of a Reconfigurable Guillotine Shear and Bending Press Machine (RGS&BPM).” *Journal of Engineering, Design and Technology* 19(6):1317–43. doi: 10.1108/JEDT-06-2020-0254.
- Taha, Zahari, and Sarkawt Rostam. 2011. “A Fuzzy AHP-ANN-Based Decision Support System for Machine Tool Selection in a Flexible Manufacturing Cell.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57(5–8):719–33. doi: 10.1007/s00170-011-3323-5.
- Tuominen, Valtteri. 2016. “The Measurement-Aided Welding Cell—Giving Sight to the Blind.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86(1–4):371–86. doi: 10.1007/s00170-015-8193-9.

- Urbanic, R. J., and R. W. Hedrick. 2015. "A Matrix-Based Framework for Assessing Machine Tool Reconfiguration Alternatives." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81(9–12):1893–1919. doi: 10.1007/s00170-015-7287-8.
- Wang, Q., S. Lassalle, A. R. Mileham, and G. W. Owen. 2009. "Analysis of a Linear Walking Worker Line Using a Combination of Computer Simulation and Mathematical Modeling Approaches." *Journal of Manufacturing Systems* 28(2–3):64–70. doi: 10.1016/j.jmsy.2009.12.001.
- Wiendahl, H. P., H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H. H. Wiendahl, N. Duffie, and M. Brieke. 2007. "Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation." *CIRP Annals* 56(2):783–809. doi: 10.1016/J.CIRP.2007.10.003.
- Wu, Naiqi, and Meng Chu Zhou. 2009. "System Modeling and Control with Resource-Oriented Petri Nets." *System Modeling and Control with Resource-Oriented Petri Nets* 1–284.
- Xiaowen, Xie, Zheng Beirong, and Xue Wei. 2013. "Configuration Optimization Method of Reconfigurable Manufacturing Systems." *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6(8):1389–93. doi: 10.19026/rjaset.6.3961.
- Xia, Tangbin, Lifeng Xi, Ershun Pan, and Jun Ni. 2017. "Reconfiguration-Oriented Opportunistic Maintenance Policy for Reconfigurable Manufacturing Systems." *Reliability Engineering and System Safety* 166:87–98. doi: 10.1016/j.res.2016.09.001.
- Yang, Jinho, Yoo Ho Son, Donggun Lee, and Sang do Noh. 2022. "Digital Twin-Based Integrated Assessment of Flexible and Reconfigurable Automotive Part Production Lines." *Machines* 10(2). doi: 10.3390/machines10020075.
- Yigit, Ahmet S., A. Galip Ulsoy, and Ali Allahverdi. 2002. "Optimizing Modular Product Design for Reconfigurable Manufacturing." *Journal of Intelligent Manufacturing* 13(4):309–16. doi: 10.1023/A:1016032714680.
- Yin, Yue H., Jin Y. Xie, Li da Xu, and Hao Chen. 2012. "Imaginal Thinking-Based Human-Machine Design Methodology for the Configuration of Reconfigurable Machine Tools." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 8(3):659–68. doi: 10.1109/TII.2012.2188900.
- Yu, J. M., H. H. Doh, H. W. Kim, J. S. Kim, D. H. Lee, and S. H. Nam. 2012. "Iterative Algorithms for Part Grouping and Loading in Cellular Reconfigurable Manufacturing Systems." *Journal of the Operational Research Society* 63(12):1635–44. doi: 10.1057/jors.2012.9.

Zhang, Lianfeng, and Brian Rodrigues. 2009. "Modelling Reconfigurable Manufacturing Systems with Coloured Timed Petri Nets." *International Journal of Production Research* 47(16):4569–91. doi: 10.1080/00207540801946662.