



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΣΕ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ
ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ
ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ
ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**



ΧΡΥΣΑΝΘΗ ΤΑΣΙΩΛΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Εισαγωγή..... | 4 |
| Κεφάλαιο 1..... | 7 |
| 1.1 Η εποχή της εξατομικευμένης παραγωγής, της βιώσιμης παραγωγής και της ενεργειακής απόδοσης | 7 |
| 1.2 Βιώσιμη Παραγωγή | 7 |
| 1.3 Ενεργειακή απόδοση και βιώσιμη παραγωγή..... | 9 |
| 1.4 Ορισμός προβλήματος | 10 |
| 1.5 Συστήματα Λιτής Παραγωγής – Lean Production Systems (LPS) | 12 |
| 1.5.1 Συνέργειες Λιτής Παραγωγής και 4 ^{ης} Βιομηχανίας..... | 13 |
| 1.6 Ποιοτικός Έλεγχος..... | 15 |
| 1.6.1 Προτεινόμενο έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα μοντέλο πλαισίου στο CPS | 17 |
| 1.7 Πράσινη Παραγωγή..... | 20 |
| 1.7.1 Βασικές Έννοιες και Όροι..... | 21 |
| 1.7.2 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα | 25 |
| Κεφάλαιο 2. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ | 28 |
| 2.1 Ενεργειακή ταξινόμηση σε μηχανουργικές κατεργασίες..... | 28 |
| 2.1.1 Κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα..... | 28 |
| 2.1.2 Κατανάλωση ενέργειας με βάση την κατάσταση της κάθε εργαλειομηχανής..... | 34 |
| 2.1.3 Ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας | 35 |
| 2.2 Διαδικασίες μέτρησης των απαιτούμενων ποσοτήτων ενέργειας | 37 |
| 2.2.1 Εισαγωγή..... | 37 |
| 2.2.2 Ανάλυση διαδικασίας..... | 39 |
| 2.2.3 Παρατηρήσεις πάνω στην ενεργειακή κατανάλωση | 44 |
| 2.3 Συσχέτιση της κατανάλωσης ενέργειας με την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος από τη διαδικασία κατεργασίας | 45 |
| 2.3.1 Χαρακτηρισμός ποιότητας επιφανειών | 45 |
| 2.3.2 Μέτρηση χαρακτηριστικών επιφάνειας | 48 |
| 2.3.3 Τραχύτητα σε διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους | 51 |
| Κεφάλαιο 3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 53 |
| 3.1 Ενεργειακά μοντέλα μηχανουργικών κατεργασιών | 53 |
| 3.1.1 Ενεργειακά μοντέλα εργαλειομηχανών..... | 53 |
| 3.1.2 Ενεργειακά μοντέλα κοπής | 56 |
| 3.1.3 Μοντέλα με βάση την κατάσταση | 56 |
| 3.1.4 Μοντέλα βασισμένα σε εξαρτήματα | 57 |
| 3.1.5 Ενεργειακά μοντέλα με βάση το Therblig | 58 |

| | |
|--|------------|
| 3.2. Ενεργειακή μοντελοποίηση για τη διαδικασία μιας μηχανουργικής κατεργασίας..... | 58 |
| 3.2.1 Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται σε διαφορετικά στάδια επεξεργασίας..... | 59 |
| 3.2.2 Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται σε εξαρτήματα εργαλειομηχανών..... | 60 |
| 3.3 Ενεργειακή μοντελοποίηση κατά την κοπή..... | 61 |
| 3.3.1 Καθαρή κοπή ειδικής ενέργειας | 61 |
| 3.3.2 Ειδική ενέργεια ατράκτου..... | 62 |
| 3.3.3 Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών | 63 |
| 3.4 Ενεργειακή μοντελοποίηση για συστήματα μηχανουργικής κατεργασίας . | 68 |
| 3.4.1 Μοντελοποίηση ροής ενέργειας σε επίπεδο συστήματος μηχανουργικής κατεργασίας..... | 68 |
| 3.4.2 Μοντελοποίηση ενεργειακής βελτιστοποίησης σε επίπεδο λειτουργίας παραγωγής..... | 71 |
| 3.5 Στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας..... | 74 |
| 3.5.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων διαδικασίας..... | 74 |
| 3.5.2 Βελτιστοποίηση επιτάχυνσης-επιβράδυνσης | 77 |
| 3.5.3 Βελτιστοποίηση ενεργειακών εξαρτημάτων εργαλειομηχανών | 78 |
| 3.5.4 Βελτίωση της απόδοσης του περιφερειακού εξοπλισμού | 78 |
| 3.6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις | 79 |
| Κεφάλαιο 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 81 |
| 4.1 Συμπεράσματα..... | 81 |
| 4.2 Μελλοντικές Προοπτικές και Εκτιμήσεις για το Μέλλον | 85 |
| 4.2.1 Βελτίωση της βιωσιμότητας..... | 85 |
| 4.2.2 Αναλύσεις δεδομένων και εφαρμογές AI (Artificial Intelligence-Τεχνητή Νοημοσύνη) | 86 |
| 4.2.3 Ενοποίηση με εφαρμογές 4 ^{ης} βιομηχανίας | 87 |
| 4.2.4 Μια μελέτη περίπτωσης | 87 |
| Παράρτημα - Επεξήγηση χρησιμοποιούμενων όρων..... | 98 |
| Βιβλιογραφία | 103 |

Εισαγωγή

Με την 4^η Βιομηχανική Επανάσταση και τα τεχνολογικά εργαλεία στα οποία βασίζεται η ανάπτυξή της (διαδίκτυο των πραγμάτων, μεγάλα δεδομένα, προσομοίωση, αυτόνομα ρομπότ, επαυξημένη πραγματικότητα, προσθετική κατασκευή και άλλα) έχουν αλλάξει σημαντικά στα τελευταία χρόνια τόσο οι ακολουθούμενες διαδικασίες στη σχεδίαση, παραγωγή και διάθεση προϊόντων όσο και γενικότερα οι προτεραιότητες στον βιομηχανικό κλάδο.

Σε μεγάλο βαθμό οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος της παραγωγής είναι πιο σύνθετοι, η διαδικασία συλλογής δεδομένων είναι πιο μεθοδική, ο όγκος των δεδομένων που συλλέγονται έχει αυξηθεί σημαντικά ενώ και οι βασικές προτεραιότητες έχουν αλλάξει σημαντικά. Σε πολύ μεγάλο βαθμό πλέον απαιτείται η αποδοτική χρήση ενέργειας σε συνάρτηση με το βέλτιστο αποτέλεσμα από την παραγωγή, η εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και η χρήση στο μέγιστο βαθμό φιλικών προς το περιβάλλον πηγών ενέργειας.

Η ενεργειακή απόδοση ή αποδοτικότητα είναι πλέον βασικό κριτήριο για να χαρακτηριστεί μια βιομηχανική δραστηριότητα ως επιτυχημένη. Λόγοι που έχουν συμβάλει σε αυτό είναι τόσο η προσπάθεια πολλών κρατών να μειώσουν τις ανάγκες τους σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο, η προσπάθεια μείωσης του κόστους παραγωγής, η προσπάθεια μείωσης των εκπομπών CO₂ και γενικότερα η ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, γεγονός που συμβάλει στην καλή εικόνα της κάθε βιομηχανίας προς τους πελάτες της και το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο.

Στον τομέα των μηχανουργικών κατεργασιών χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι φυσικοί μηχανισμοί για να μεταποιήσουν τη μορφή ή το σχήμα ενός υλικού [1]. Η ενέργεια που απαιτείται για τέτοιες λειτουργίες θεωρείται ως εισροή της διαδικασίας, η οποία μετατρέπεται εν μέρει σε χρήσιμο έργο, ενσωματώνεται στη μορφή και τη σύνθεση των προϊόντων και των αποβλήτων ενώ η υπόλοιπη μετατρέπεται σε απόβλητα ή χαμένη θερμότητα. Οι μηχανουργικές κατεργασίες χρησιμοποιούν μόνο ένα κλάσμα της ενέργειας που καταναλώνεται για την πραγματική διαδικασία προσθήκης αξίας, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σταθερών συνθηκών διεργασίας και περιφερειακών λειτουργιών.

Η ενεργειακή απόδοση γίνεται κινητήριοις μοχλός για τη κατασκευαστική βιομηχανία, καθώς είναι ιστορικά ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας και εκπομπών άνθρακα στον κόσμο. Ο κατασκευαστικός τομέας είναι υπεύθυνος για το 33% περίπου της χρήσης πρωτογενούς ενέργειας και για το 38% των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως [2-3]. Επιπλέον, η αυξανόμενη τιμή της ενέργειας και η τρέχουσα τάση της βιωσιμότητας έχουν ασκήσει νέα πίεση στις κατασκευαστικές επιχειρήσεις που πρέπει να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας τόσο για εξοικονόμηση κόστους όσο και για φιλικότητα προς το περιβάλλον, καθώς και για πρωτοβουλίες απογραφής κύκλου ζωής [4].

Η ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιεί προηγμένα συστήματα ελέγχου μέτρησης και παρακολούθησης για να διασφαλίσει την λειτουργικότητα όσο το δυνατόν καλύτερα

χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες πρακτικές του κλάδου και τα πρότυπα πράσινης συμμόρφωσης που επηρεάζουν την ανταγωνιστικότητα, την παραγωγικότητα και την οικονομική ανάπτυξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών [5]. Περιλαμβάνει μείωση της εισροής ενέργειας μιας δεδομένης υπηρεσίας ή επιπέδου οικονομικής δραστηριότητας σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA) και το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (WEC). Τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης παρέχουν μια επιλογή πολιτικής που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι βιομηχανίες για να εξοικονομήσουν ενέργεια και χρήματα για τις τοπικές ή εθνικές τους οικονομίες. Μπορεί να βοηθήσει στην διασφάλιση των μηχανών που χρησιμοποιούν οι βιομηχανίες για παραγωγή, ότι δεν προκαλούν υπερβολικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή υψηλό κόστος λειτουργίας. Οι πληροφορίες σχετικά με το ενεργειακό κόστος και με την κατανάλωση ενέργειας θα παρέχουν τη βασική γραμμή ενεργειακής απόδοσης που μπορεί να ωφελήσει το κόστος κύκλου ζωής της συνολικής προτεινόμενης εγκατάστασης μέσω ενεργειακά αποδοτικών μέσων παραγωγής. Μπορεί ακόμα, να βελτιώνει συνεχώς την ανάλυση καθώς διατίθενται περισσότερα δεδομένα για τη σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους και να δημιουργήσει εθνικά πρότυπα οικονομικών επιπτώσεων για να βοηθήσει τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής στο σχεδιασμό και τη μεγιστοποίηση της εθνικής χρήσης της ενέργειας. Το αυξανόμενο ενεργειακό κόστος, η νέα περιβαλλοντική νομοθεσία και οι ανησυχίες για την ενεργειακή ασφάλεια οδηγούν τις προσπάθειες για την αύξηση της βιομηχανικής ενεργειακής απόδοσης [5]. Η αποτελεσματική παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας των εργαλειομηχανών είναι το πρώτο βήμα προς την εξοικονόμηση ενέργειας. Οι εκπομπές άνθρακα από τη χρήση ενέργειας προκαλούν αυξανόμενη ανησυχία καθώς τα αίτια και οι συνέπειες της υπερθέρμανσης του πλανήτη γίνονται εντονότερα.

Η παγκοσμιοποίηση της αγοράς ενέργειας και η διασύνδεση των δικτύων εφοδιασμού σημαίνει ότι επηρεάζονται όλοι. Τόσο η οικονομική πίεση όσο και η ανάγκη διαχείρισης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα απαιτούν από το προσωπικό να βελτιώσει την κατανόησή του για την τεχνολογία πρωτοβουλιών ενεργειακής απόδοσης. Η κύρια αιτία για τη λειτουργία της εταιρείας είναι η μείωση του Συνολικού Κόστους Ιδιοκτησίας (TCO- Total Cost of Ownership), αλλά ο υψηλότερος στόχος είναι η βιώσιμη παραγωγή αγαθών με ελάχιστη (ηλεκτρική) ενέργεια [6]. Η οικονομία και η ευκαιρία της διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης έχουν μεγάλη σημασία για την ενίσχυση του οικονομικά αποδοτικού τρόπου διαχείρισης του ενεργειακού κόστους που επιβαρύνει η εταιρεία. Οι αποφάσεις που έχουν αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος παραγωγής αποτελούν μέρος όλων των φάσεων του κύκλου ζωής ενός εργοστασίου από τον προγραμματισμό του συστήματος παραγωγής έως τη λειτουργία [5]. Η φιλική προς το περιβάλλον μορφή κατανάλωσης ενέργειας αντιπροσωπεύει έως και το ένα τέταρτο του συνολικού κόστους κύκλου ζωής, περίπου το ίδιο ποσό με το κεφάλαιο που δαπανάται για την αγορά των μηχανημάτων.

Η Γερμανία οδηγεί έναν μετασχηματισμό προς την τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0), η οποία έχει τα "Big Data" ως καινοτομία υπηρεσιών [7]. Ως πιο ενσωματωμένο λογισμικό με ενσωματωμένη νοημοσύνη σε βιομηχανικά προϊόντα και συστήματα, οι τεχνολογίες πρόβλεψης μπορούν να συνδυάσουν περαιτέρω ευφυείς αλγόριθμους με ηλεκτρονικά και νοημοσύνη χωρίς πρόσδεση για να προβλέψουν την απόδοση προϊόντων και υπηρεσιών, να διαχειριστούν αυτόνομα και να βελτιστοποιήσουν τις ανάγκες εξυπηρέτησης προϊόντων. Με βάση την ορολογία 4^{ης} Βιομηχανίας, η έξυπνη ανάλυση δεδομένων και τα διασυνδεδεμένα συστήματα συνδυάζονται για να

δημιουργήσουν μια ολοκαίνουργια πτυχή στον μετασχηματισμό του εργοστασίου και στη διαχείριση παραγωγής. Η εισαγωγή μεθόδων και όρων όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και τα διασυνδεδεμένα συστήματα είναι μεταξύ των προσπαθειών των ερευνητών και των βιομηχανικών εταιρειών να αντιμετωπίσουν τις εφαρμόσιμες λύσεις στο περιβάλλον «Big Data» [5].

Η παρούσα εργασία δομήθηκε σε τέσσερα μέρη. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 1, αναλύθηκαν έννοιες και όροι της κατασκευής με κεντρικό άξονα την ενεργειακή απόδοση και την βιώσιμη παραγωγή. Έγιναν ακόμα αναφορές σε μεθόδους και διαδικασίες που επισκοπούν σε μια καλύτερη και πράσινη παραγωγή με κύριο μέλημα, την βιωσιμότητα. Στην συνέχεια, δομήθηκε και ταξινομήθηκε η ενέργεια των μηχανουργικών κατεργασιών συμβάλλοντας στην καλύτερη μέτρηση των ποσοτήτων ενέργειας, με σκοπό την σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας και τελικού προϊόντος. Στο Κεφάλαιο 3, αναλύθηκαν μοντέλα εξοικονόμησης ενέργειας και αναφέρθηκαν στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Τέλος, με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν, στο Κεφάλαιο 4 δόθηκε η ανάγκη για μελλοντικές προοπτικές και εφαρμογές της Βιομηχανίας 4.0 για μια πράσινη παραγωγή για εξοικονόμηση ενέργειας, πόρων, χρόνου και κόστους.

Κεφάλαιο 1. ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΟΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Ένα σύστημα παραγωγής είναι ένας συνδυασμός κατασκευαστικού εξοπλισμού και ανθρώπων, που δεσμεύονται από μια κοινή ροή υλικού και πληροφοριών. Ο ορισμός της κατασκευής είναι η μετατροπή υλικών και πληροφοριών σε τελικά προϊόντα με υψηλή προστιθέμενη αξία για την ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών [1]. Η κατεργασία σε έναν χώρο παραγωγής είναι μία από τις βασικές δραστηριότητες παραγωγής πλούτου για κάθε έθνος και συμβάλλει σημαντικά στην απασχόληση, δημιουργώντας θέσεις εργασίας υψηλής ποιότητας και υψηλής ειδίκευσης. Η παραγωγή είναι η «κινητήρια δύναμη» της οικονομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για πολλούς λόγους [8].

Εκτιμάται ότι για κάθε εργασία στον τομέα της παραγωγής απαιτείται μια περαιτέρω συμπληρωματική εργασία σε σχετικές επιχειρηματικές υπηρεσίες, όπως logistics, μάρκετινγκ ή νομικές συμβουλές. Η παραγωγή ήταν επίσης ο κύριος μοχλός της αύξησης της παραγωγικότητας αφού η μέση αύξηση της παραγωγικότητας ήταν περίπου 3% κατά τα έτη 2000 έως το 2007, σε σύγκριση με τον μέσο όρο για τη συνολική οικονομία στο 1%. Επιπλέον, η βιομηχανία γενικά είναι ξεκάθαρα κινητήρια δύναμη της οικονομίας που βασίζεται στη γνώση, καθώς είναι υπεύθυνη για το 80% της ιδιωτικής Έρευνας και Ανάπτυξης [9].

1.1 Η εποχή της εξατομικευμένης παραγωγής, της βιώσιμης παραγωγής και της ενεργειακής απόδοσης

Η κατασκευή χαρακτηρίζεται από αυξημένο αυτοματισμό, υψηλή ευελιξία, εστιάζοντας στην απρόσκοπτη διαλειτουργικότητα και τη φιλικότητα προς το περιβάλλον. Συνεχώς ο κλάδος προσπαθεί να ανταποκριθεί στη διαφοροποιημένη και ολοένα πιο εξατομικευμένη ζήτηση της αγοράς, εξισορροπώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς κόστους, χρόνου και ποιότητας. Πρέπει να παράγονται περισσότερα εξατομικευμένα προϊόντα και παραλλαγές, με λιγότερους πόρους και υλικά, και σε συντομότερους κύκλους.

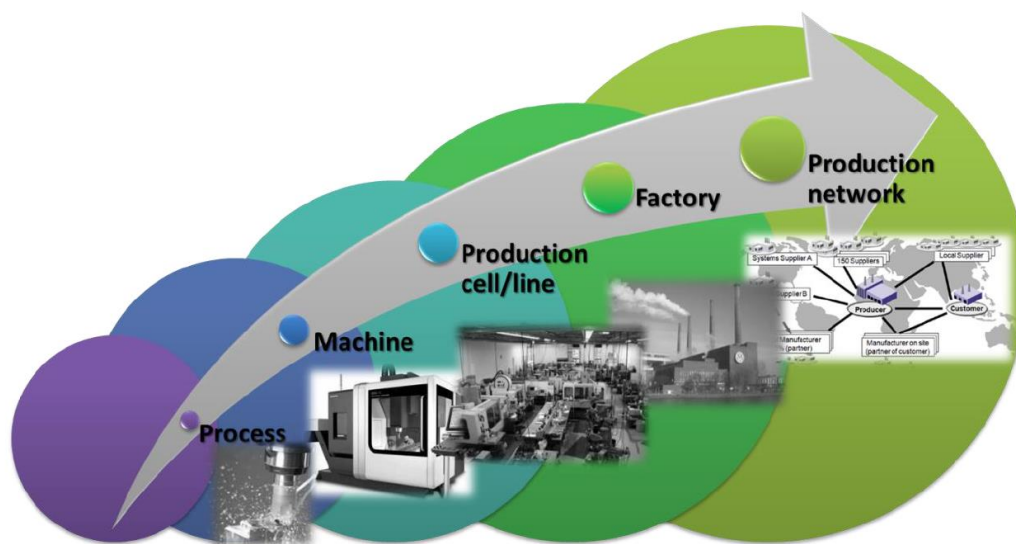
Μέσω της παραλλαγής προϊόντος μπορεί να επιτευχθεί υψηλός βαθμός εξατομίκευσης και επομένως, απαιτούνται συστήματα παραγωγής ικανά να παράγουν με ευέλικτο τρόπο όλες τις παραλλαγές προϊόντων [1]. Στις μέρες μας, ο στόχος της «εξατομικευμένης παραγωγής» είναι η διαφοροποίηση της αξίας μέσω της δέσμευσης των πελατών στη διαδικασία σχεδιασμού και η επίτευξη αποτελεσματικότητας των προϊόντων. Η εξατομίκευση ενεργοποιείται από μια αρχιτεκτονική προϊόντος, όπου η διαφοροποίηση των μονάδων μπορεί να επιτευχθεί για να δοθεί χώρος για τη συμμετοχή του πελάτη στον σχεδιασμό [9].

1.2 Βιώσιμη Παραγωγή

Εκτός από την αντιμετώπιση πολύπλοκων και διαφορετικών οικονομικών τάσεων, τον μικρότερο κύκλο ζωής προϊόντων, την ταχέως μεταβαλλόμενη επιστήμη και τεχνολογία, την αυξημένη ποικιλία στη ζήτηση των πελατών και την παγκοσμιοποίηση των παραγωγικών δραστηριοτήτων, οι βιομηχανικές επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν επίσης τεράστιες περιβαλλοντικές προκλήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα και μελλοντική ευημερία της ανθρωπότητας, το περιβάλλον έχει επηρεαστεί από την ανεύθυνη κατανάλωση φυσικών πόρων. Η παγκόσμια οικονομία, στην οποία κυριαρχεί ο βιομηχανοποιημένος κόσμος, καταναλώνει ήδη περισσότερους φυσικούς πόρους από ότι είναι οικολογικά ανεκτό [10]. Η εξίσωση του παγκόσμιου βιοτικού επιπέδου στο επίπεδο των βιομηχανικών περιοχών δεν είναι δυνατή με τα σημερινά πρότυπα ανάπτυξης [9]. Για

να ανταποκριθεί σε αυτήν την απειλή, η βιωσιμότητα γενικά έγινε παγκόσμιο μέλημα, ειδικά για τον βιομηχανικό τομέα.

Δεδομένου ότι ο κατασκευαστικός τομέας είναι ο πυρήνας των βιομηχανικών οικονομιών, η βιωσιμότητα θα πρέπει να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο, προκειμένου να διατηρηθεί το υψηλό βιοτικό επίπεδο. Η επίτευξη βιωσιμότητας στην κατασκευή απαιτεί μια ολιστική άποψη που περιλαμβάνει όλα τα επίπεδα παραγωγής (κατεργασία, μηχανή, γραμμή παραγωγής, εργοστάσιο και δίκτυο παραγωγής) [11] συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων παραγωγής σε πολλαπλούς κύκλους ζωής προϊόντων.

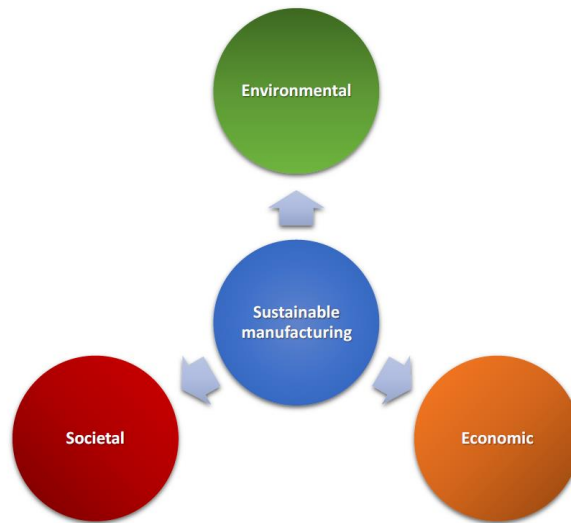


Εικόνα 1.1: Τα επίπεδα παραγωγής

Ο πιο ευρέως αποδεκτός γενικός ορισμός της αειφόρου ανάπτυξης παρέχεται από την Παγκόσμια Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη [12]: «Ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες». Δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτός ορισμός για τον όρο «αειφόρος παραγωγή».

Το Υπουργείο Εμπορίου των ΗΠΑ ορίζει τη βιώσιμη παραγωγή ως «τη δημιουργία βιομηχανικών προϊόντων που χρησιμοποιούν διαδικασίες που ελαχιστοποιούν τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εξοικονομούν ενέργεια και φυσικούς πόρους, είναι ασφαλή για τους εργαζόμενους, τις κοινότητες και τους καταναλωτές και είναι οικονομικά υγιή» [17].

Υπάρχουν τρεις βασικοί πυλώνες της βιωσιμότητας: περιβαλλοντικός, οικονομικός και κοινωνικός (Εικόνα 1.2). Σήμερα, η παραδοσιακή έννοια της πράσινης τεχνολογίας 3R (Μείωση, Επαναχρησιμοποίηση, Ανακύκλωση) (βλέπε παράρτημα) κινείται προς το 6R (Μείωση, Επαναχρησιμοποίηση, Ανάκτηση, Επανασχεδιασμός, Ανακατασκευή, Ανακύκλωση) (βλέπε παράρτημα), επιτρέποντας τη μετατροπή από ένα πρότυπο ανοιχτού βρόχου, ενιαίου κύκλου ζωής σε ένα θεωρητικά κλειστού βρόχου, παράδειγμα πολλαπλού κύκλου ζωής [12].

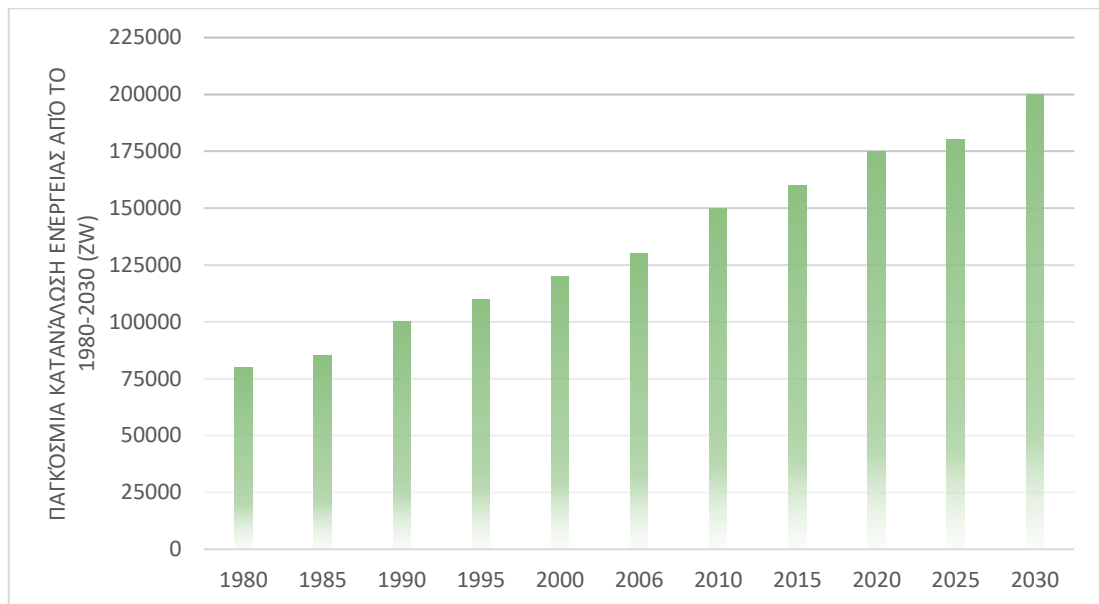


Εικόνα 1.2.: Οι τρεις βασικοί πυλώνες της βιώσιμης παραγωγής

1.3 Ενεργειακή απόδοση και βιώσιμη παραγωγή

Η ενέργεια είναι βασική ανάγκη για διάφορους σκοπούς σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο. Ειδικά για χώρες με ταχύτερη οικονομική ανάπτυξη, η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Αναμένεται ότι η κατανάλωση ενέργειας θα αυξηθεί κατά 33% από το 2010 (116.614 ZW) έως το 2030 (198.654 ZW) [15]. Οι χώρες εκτός του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD) (βλέπε παράρτημα), οι οποίες καταναλώνουν το 62% της παγκόσμιας παραδοθείσας ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα, έχουν αυξήσει την κατανάλωσή τους κατά 73% σε σύγκριση με αύξηση 15% στη χρήση ενέργειας μεταξύ των χωρών του OECD. [15].

Ο βιομηχανικός τομέας χρησιμοποιεί περισσότερη ενέργεια από οποιονδήποτε άλλο τομέα τελικής χρήσης και επί του παρόντος καταναλώνει περίπου το 37% της συνολικής παραδοθείσας ενέργειας παγκοσμίως [14]. Συγκεκριμένα, ο τομέας της παραγωγής καταναλώνει το 31% της πρωτογενούς ενέργειας [16]. Γενικά, η ενέργεια που καταναλώνεται στον βιομηχανικό τομέα αναμένεται να αυξηθεί κατά μέσο όρο 1,4% ετησίως, τα επόμενα 20 χρόνια [14]. Αυτά τα δεδομένα καθιστούν την ενεργειακή απόδοση σημαντικό Βασικό Δείκτη Απόδοσης (KPI) (βλέπε παράρτημα) για τη βιομηχανία και ιδιαίτερα τα συστήματα παραγωγής.



Εικόνα 1.3: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από το 1980 έως το 2030 [25]

Η ενεργειακή απόδοση είναι χωρίς αμφιβολία, ο πιο κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη της βιώσιμης παραγωγής, καθώς αντιμετωπίζει και τους τρεις βασικούς πυλώνες της αειφορίας. Με την εισαγωγή της ενεργειακής απόδοσης, μπορούν να αναμένονται σημαντικά κέρδη.

1.4 Ορισμός προβλήματος

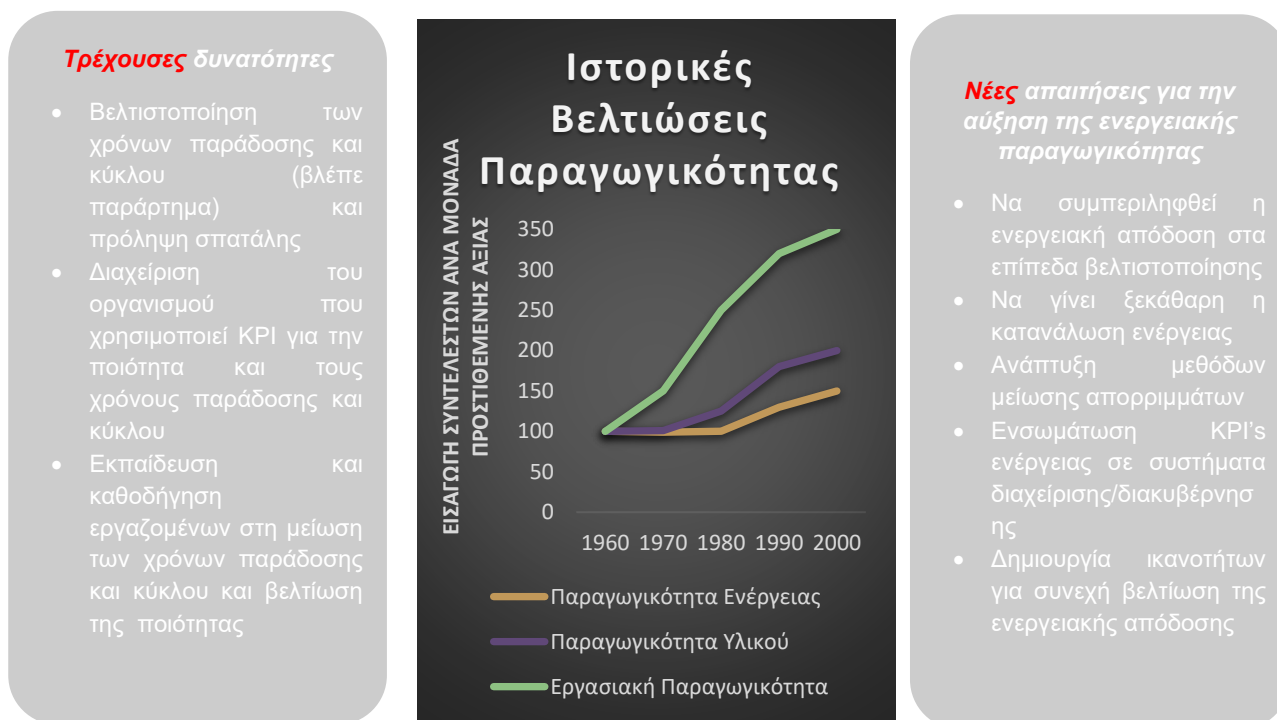
Είναι σαφές ότι η ανάγκη για βιώσιμη παραγωγή είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Οι κρατικοί κανονισμοί καθώς και οι αυξανόμενες τιμές της ενέργειας ασκούν νέες πιέσεις στις εταιρείες κατασκευής. Ως εκ τούτου, ο βιομηχανικός τομέας πρέπει να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας τόσο για εξοικονόμηση κόστους όσο και για φιλικότητα προς το περιβάλλον και να προσπαθήσει να βρει νέους ευέλικτους τρόπους για να παράγει «περισσότερα με λιγότερη προσπάθεια» και στη συνέχεια να εξελιχθεί από τη στρατηγική «μέγιστο κέρδος από το ελάχιστο κεφάλαιο» σε «μέγιστο κέρδος από ελάχιστους πόρους» [16].

Η μελέτη των διαδικασιών παραγωγής από ενεργειακή σκοπιά δείχνει ότι μόνο ένα μικρό κλάσμα της εισροής ενέργειας προσθέτει πραγματικά αξία στο τελικό προϊόν και ότι περίπου το 20-40% της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία είναι χωρίς προστιθέμενη αξία [9]. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σταθερών συνθηκών διεργασίας και περιφερειακών λειτουργιών.

Ευτυχώς, η έρευνα για την ενεργειακή απόδοση έχει αποκτήσει δυναμική την τελευταία δεκαετία. Μεταξύ 1990 και 2009, πολλές βιομηχανικές και κατασκευαστικές εταιρείες ενίσχυσαν τις επιχειρηματικές τους επιδόσεις υιοθετώντας μεθόδους λιτής παραγωγής για τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας των υλικών και της εργασίας. Από την άλλη πλευρά, λίγες κατασκευαστικές βιομηχανίες έχουν στρατηγική να λειτουργούν με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Όσοι σκέφτονται πραγματικά την ενεργειακή απόδοση εφαρμόζουν συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε δραστηριότητες όπως η ενεργειακή επιθεώρηση, η παρακολούθηση και ο έλεγχος. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα προσδιορισμένα μέτρα ενεργειακής απόδοσης συχνά δεν εφαρμόζονται.

Οι περισσότερες εταιρείες δεν έχουν δώσει ιδιαίτερη προσοχή στη μείωση του ενεργειακού κόστους για τους ακόλουθους λόγους:

- Παλαιότερα οι τιμές της ενέργειας ήταν χαμηλές.
- Το επίκεντρο των περισσότερων εταιρειών ήταν η ανάπτυξη και η αυξημένη δυναμικότητα.
- Εξακολουθεί να είναι πολύ δύσκολο για τις εταιρείες να κατανοήσουν και να παρακολουθήσουν με επιτυχία την ενεργειακή τους απόδοση λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας στην παραγωγή λόγω των διαφορετικών ρυθμών παραγωγής και μειγμάτων.
- Ακόμη και αυτά που ενσωματώνουν μέτρα ενεργειακής απόδοσης, δεν τα εφαρμόζουν κυρίως λόγω αβεβαιοτήτων σχετικά με τα ενεργειακά μοντέλα.



Εικόνα 1.4: Μια ανάλυση της εξέλιξης της ενεργειακής παραγωγικότητας με την πάροδο του χρόνου.

Η Εικόνα 1.4 δείχνει ότι, ιστορικά, τα τμήματα Ε&Α (Έρευνας & Ανάπτυξης) έδωσαν λίγη προσοχή στην εξοικονόμηση ενεργειακής παραγωγικότητας. Ειδικά σε τομείς που δεν είναι εντάσεως ενέργειας, τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης έχουν λάβει ελάχιστη προσοχή, υπογραμμίζοντας την τεράστια ζήτηση για έρευνα σε αυτόν τον τομέα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις (ΜΜΕ) αντιπροσωπεύουν περίπου το 99% του συνόλου των επιχειρήσεων, περίπου το 58% της συνολικής προστιθέμενης αξίας και δημιουργούν περίπου 3,25 εκατομμύρια θέσεις εργασίας στην ΕΕ [17], διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της ενεργειακής απόδοσης κατασκευής. Επομένως, η έρευνα θα πρέπει επίσης να στοχεύει στην υποστήριξη των ΜΜΕ προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση στις διαδικασίες παραγωγής τους.

Μια λευκή βίβλος [18], η οποία βασίζεται σε μια διαδικτυακή έρευνα 317 ανώτατων στελεχών και 16 εις βάθος συνεντεύξεις με στελέχη επιχειρήσεων και άλλους ειδικούς, καθώς και σε εκτενή έρευνα γραφείου, παρουσίασε μερικά πολύ ενδιαφέροντα ευρήματα. Τα περισσότερα στελέχη του κλάδου γνωρίζουν ότι η ενεργειακή απόδοση πρέπει να

ληφθεί σοβαρά υπόψη, καθώς αποτελεί βασικό μέρος της βιώσιμης παραγωγής και εκτιμούν ότι η κρισιμότητα του προβλήματος θα γίνει εντονότερη τις επόμενες δύο δεκαετίες. Οι εταιρείες επενδύουν στον αποδοτικό φωτισμό και τη θέρμανση, αλλά πολύ λίγες στη βελτίωση της απόδοσης των γραμμών παραγωγής και των μηχανημάτων. Ένα ενθαρρυντικό σημείο είναι ότι τα εμπόδια στις επενδύσεις στην ενεργειακή απόδοση φαίνεται να έχουν αρθεί και η ρυθμιστική πίεση στον κλάδο θα επιδεινώσει περαιτέρω αυτό το φαινόμενο. Η καινοτομία στον σχεδιασμό και τα μηχανήματα φαίνεται ότι θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, ωστόσο, το κλειδί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης θα βρίσκεται όλο και περισσότερο στο λογισμικό και όχι στο υλικό [9].

1.5 Συστήματα Λιτής Παραγωγής – Lean Production Systems (LPS)

Λόγω της ασταθούς και παγκοσμιοποιούμενης αγοράς καθώς και του εντεινόμενου ανταγωνισμού που τη συνοδεύει, οι γερμανικές κατασκευαστικές εταιρείες αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις όσον αφορά το κόστος, την ποιότητα και τον χρόνο. Ο αυξανόμενος αριθμός ανταγωνιστών και η μετάβαση από την αγορά του πωλητή στην αγορά του αγοραστή, δίνει στους πελάτες υψηλό βαθμό ελευθερίας να επιλέξουν μια ποικιλία διαφορετικών προϊόντων. Αυτό αυξάνει την ανάγκη για μεμονωμένα προϊόντα, απαιτώντας σταθερά επίπεδα κόστους και ποιότητας. Ως εκ τούτου, η σημασία της οικονομικής παραγωγής παρτίδας μεγέθους 1 για τις κατασκευαστικές εταιρείες θα αυξηθεί στο μέλλον. Αυτή η τάση μπορεί να συνοψιστεί στον όρο «μαζική προσαρμογή». Για να παραμείνει ανταγωνιστική ως κατασκευαστική εταιρεία σε χώρες με υψηλούς μισθούς όπως η Γερμανία, οι διαδικασίες και οι μέθοδοι σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας πρέπει να σχεδιάζονται με παραγωγικό, αποτελεσματικό και ευέλικτο τρόπο [19].

Στο παρελθόν, οι εταιρείες έχουν εισαγάγει Συστήματα Λιτής Παραγωγής για τη δημιουργία αποτελεσματικών και στοχευμένων διαδικασιών για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προκλήσεων. Ως αποτέλεσμα, οι κατεργασίες και οι διαδικασίες των κατασκευαστικών εταιρειών σχεδιάζονται επί του παρόντος σύμφωνα με τις αρχές Lean. Ένα σύστημα λιτής παραγωγής μπορεί να περιγραφεί ως «ένα εξειδικευμένο για την επιχείρηση μεθοδικό σύστημα κανόνων για τον συνεχή προσανατολισμό όλων των εταιρικών διαδικασιών προς τον πελάτη προκειμένου να επιτευχθεί το μεγαλύτερο από τη διοίκηση της επιχείρησης» [20] και επιδιώκει τον στόχο μιας συστηματικής και συνεχούς μείωσης των δραστηριοτήτων που δεν προσθέτουν αξία και ευθυγράμμιση όλων των διαδικασιών με την οπτική γωνία του πελάτη [19]. Τα LPS στοχεύουν στην επίτευξη μιας Διαδικασίας Συνεχούς Βελτίωσης (CIP) (βλέπε παράρτημα) σε ολόκληρη την επιχείρηση [20].

Εν τω μεταξύ, τα LPS έχουν καθιερωθεί σχεδόν σε όλους τους κλάδους και έχουν γίνει βιομηχανικό πρότυπο με τη δημοσίευση του VDI 2870 το 2013. Σήμερα, το 90% των κατασκευαστικών εταιρειών έχουν ήδη εφαρμόσει τις αρχές και τις μεθόδους ενός LPS στο περιβάλλον παραγωγής [21,22]. Οι διαδικασίες και οι κατεργασίες αυτών των εταιρειών είναι συνήθως δομημένες και οργανωμένες σύμφωνα με τις αρχές LPS, χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαμορφώσεις μεθοδολογιών και εργαλείων LPS για συγκεκριμένες εταιρείες. Οι δραστηριότητες συνεχούς βελτίωσης πραγματοποιούνται από τους εργαζόμενους στην επιχείρηση λαμβάνοντας υπόψη τους συνολικούς επιχειρηματικούς στόχους. Μια σημαντική πτυχή της βιώσιμης επιτυχίας του LPS είναι η συνέπεια των στόχων, των διαδικασιών, των αρχών σχεδιασμού, των μεθόδων και των εργαλείων που εφαρμόζονται σε όλη την επιχείρηση.

1.5.1 Συνέργειες Λιτής Παραγωγής και 4^{ης} Βιομηχανίας

Η Λιτή Παραγωγή ως βοηθητικό εργαλείο για την 4^η Βιομηχανία

Ακόμη και σε μελλοντικά συστήματα παραγωγής που λαμβάνουν υπόψη την 4^η Βιομηχανική Επανάσταση και τις σύγχρονες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών, οι κατεργασίες πρέπει να ορίζονται με αποτελεσματικό τρόπο προτού οι επιχειρήσεις αρχίσουν να αυτοματοποιούν αυτές τις διεργασίες παραγωγής. Επομένως, η Βιομηχανία 4.0 απαιτεί έναν ορισμένο βαθμό προσανατολισμού στην κατεργασία με καθορισμένες διαδικασίες, προμηθευτές και πελάτες, εργασίες και χρόνους. Μια σημαντική πτυχή και ένας επιθυμητός στόχος των Συστημάτων Λιτής Παραγωγής είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή αποτελεσματικών κατεργασιών χωρίς απόβλητα και σπατάλες με σαφή πρότυπα και υψηλή εστίαση στον πελάτη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κάθετη και οριζόντια ολοκλήρωση έχουν σημαντικό αντίκτυπο σε αυτές τις διαδικασίες. Η εφαρμογή οριζόντιας και κάθετης δικτύωσης από την 4^η Βιομηχανία επιτρέπει την καλύτερη ενσωμάτωση πελατών και προμηθευτών στη διαδικασία (προστιθέμενη αξία).

Η 4^η Βιομηχανία προωθεί τα Συστήματα Λιτής Παραγωγής

Η προσέγγιση Lean είναι ήδη ευρέως στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής και έχουν εφαρμοστεί σύμφωνα με το μοντέλο φάσης που περιγράφεται στο VDI 2870 [27]. Αντιπροσωπεύει ένα μοντέλο τεσσάρων φάσεων - σχεδιασμός, υλοποίηση, μετάβαση και λειτουργία. Στο στάδιο του **σχεδιασμού**, θα σχεδιαστούν οι γενικές συνθήκες, οι στόχοι και η δομή γενικής επiskeυής του LPS και θα επιλεγούν οι επιμέρους μέθοδοι. Στη δεύτερη φάση (**υλοποίηση**), θα αναπτυχθεί και θα εφαρμοστεί η έννοια της πιστοποίησης και θα εφαρμοστεί η πρώτη μέθοδος LPS. Στο επόμενο στάδιο (**μεταβατική φάση**), πραγματοποιείται ανασκόπηση των στόχων καθώς και ανασκόπηση επιλεγμένων μεθόδων και εργαλείων. Επιπλέον, το LPS θα περάσει στην επιχειρησιακή φάση ή αλλιώς το στάδιο **λειτουργίας** (φάση 4), όπου οι στόχοι θα αξιολογούνται τακτικά με βάση τους βασικούς δείκτες απόδοσης. Μετά από αυτό το στάδιο, το LPS θα συνεχίσει να βελτιώνεται, αλλά τα κύρια πλεονεκτήματα του LPS έχουν ήδη πραγματοποιηθεί [19].

Μια λεπτομερής βιβλιογραφική ανάλυση δείχνει ότι η εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών (ICT) (βλέπε παράρτημα) σε συστήματα λιτής παραγωγής μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των Συστημάτων Λιτής Παραγωγής αποκτώντας πιο αποτελεσματικές διαδικασίες παραγωγής και logistics. Η ανάλυση αποκάλυψε ότι αρκετοί συγγραφείς δήλωσαν διαφορετικές αλληλεξαρτήσεις, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες. Η Λιτή Παραγωγή ως βάση για τη Βιομηχανία 4.0, η 4^η Βιομηχανία ολοκληρώνει τη Λιτή Παραγωγή, η Βιομηχανία 4.0 αυξάνει την Λιτή αποδοτικότητα, η Βιομηχανία 4.0 αλλάζει τις αρχές της Λιτής Παραγωγής. Για παράδειγμα, τα 2/3 των άρθρων αναφέρουν ξεκάθαρα ότι η Lean θέτει τα θεμέλια για τη Βιομηχανία 4.0. Επιπλέον, η Βιομηχανία 4.0 είναι σε θέση να ολοκληρώσει την Λιτή Παραγωγή λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές εξελίξεις. Άλλοι συγγραφείς δηλώνουν ότι οι Lean δραστηριότητες μπορεί να βελτιωθούν και να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα των Lean δραστηριοτήτων. Ακόμα, αναφέρεται ότι οι αρχές Lean αλλάζουν με την ενσωμάτωση συγκεκριμένων εργαλείων και μεθόδων 4^{ης} Βιομηχανίας. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1.

| Κατάσταση | Η Λιτή Παραγωγή ως βάση της Βιομηχανίας 4.0 | Η Βιομηχανία 4.0 ολοκληρώνει την Λιτή Παραγωγή | Η Βιομηχανία 4.0 αυξάνει την αποδοτικότητα της Λιτής Παραγωγής | Οι αρχές της Λιτής Παραγωγής αλλάζουν |
|--|---|--|--|---------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> Το Σύστημα Παραγωγής της Toyota (βλέπε παράρτημα) και η Βιομηχανία 4.0 δεν αποτελούν αντίφαση Το GPS ως βάση έξυπνου εργοστασίου (smart factory) με διάσταση δικτύου | ✓ | ✓ | | ✓ |
| <ul style="list-style-type: none"> Τα Κυβερνοφυσικά συστήματα (βλέπε παράρτημα) αυξάνουν την αποτελεσματικότητα της Λιτής Παραγωγής Το GPS ως προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή της Βιομηχανίας 4.0 | ✓ | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Δύο κομμάτια μέχρι το ίδιο τελείωμα Η Βιομηχανία 4.0 χρησιμοποιεί τη Λιτή Παραγωγή ως βάση και προσαρτά στα σύνορά του | ✓ | | ✓ | |
| <ul style="list-style-type: none"> Η Λιτή Παραγωγή και η Βιομηχανία 4.0 είναι προσαρμοστικά και συμβατά Η Βιομηχανία 4.0 ως τεχνική προσέγγιση είναι βιώσιμη μόνο με βάση τη Λιτή Παραγωγή | ✓ | ✓ | | ✓ |
| <ul style="list-style-type: none"> Η επιτυχία της Βιομηχανίας 4.0 εξαρτάται από την εμπειρία των εργαζομένων με το Lean Χρησιμοποιεί τον όρο "Lean 4.0" | ✓ | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Εάν το Lean δεν είναι η βάση της Βιομηχανίας 4.0, είναι μια νέα έκδοση του CIM Ονομάζει «SMART LEAN» ως προσπάθεια της εταιρείας | ✓ | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Η Βιομηχανία 4.0 επεκτείνει τα εργαλεία του Lean "Η Βιομηχανία 4.0 επιταχύνει το Lean" | | ✓ | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Διαφορετικές προσεγγίσεις με τα ίδια αποτελέσματα Οι κακές διαδικασίες δεν μπορούν να αυτοματοποιηθούν με επιτυχία | ✓ | ✓ | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Η Βιομηχανία 4.0 δεν είναι σε αντίφαση με το Lean Το CPS (βλέπε παράρτημα) επιταχύνει τη φιλοσοφία του Lean | | ✓ | ✓ | |

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
| • Η Βιομηχανία 4.0 οδηγεί σε μια συνολική αλλαγή των αρχών Lean | | | | ✓ |
| • Η Βιομηχανία 4.0 είναι η μετενσάρκωση του Lean αυτοματισμού • Ακόμη και ο Όηνο σκέφτηκε την αυτοματοποίηση | | ✓ | | |
| • Η Βιομηχανία 4.0 υποστηρίζει και αυξάνει τον στόχο του Lean • Κάποιες αρχές του Lean ίσως γίνουν λιγότερο σημαντικές | ✓ | | | ✓ |
| • Το τέλειο Lean θα πρέπει να συνδυαστεί με την 4 ^η Βιομηχανία | ✓ | | | |
| • Δεν υπάρχει σοβαρή σύγκρουση μεταξύ Βιομηχανίας 4.0 και Λιτής Παραγωγής, μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται αλλά δεν μοιάζουν | | ✓ | | ✓ |
| • «Μην κάνεις περιττά πράγματα, σκέψου λιτά!» Δημιουργήστε και χρησιμοποιήστε λιτές τεχνολογίες τώρα, καθώς τότε δημιουργήσατε έναν λιτό οργανισμό!» • Η Βιομηχανία 4.0 ακολουθεί επίσης την αρχή της αποφυγής της σπατάλης. | ✓ | | | |

Πίνακας 1.1: Αλληλεξαρτήσεις Lean και Industry 4.0 [26]

1.6 Ποιοτικός Έλεγχος

Με τον αυξανόμενο παγκόσμιο ανταγωνισμό, όλο και περισσότερες κατασκευαστικές εταιρείες αντιμετωπίζουν αυξανόμενες ανάγκες προσαρμογής και μικρότερο χρόνο διάθεσης στην αγορά. Καθώς ο ανταγωνισμός στην αγορά εντείνεται, οι άνθρωποι είναι πιο πρόθυμοι να πληρώσουν περισσότερα χρήματα για προϊόντα υψηλής ποιότητας. Ως εκ τούτου, ο προγνωστικός έλεγχος ποιότητας προϊόντων γίνεται μια σημαντική τεχνολογία στη διαδικασία κατασκευής του προϊόντος. Η κύρια πρόκληση επί του παρόντος είναι πώς να διασφαλιστεί η σταθερότητα της διαδικασίας παραγωγής και να βελτιωθεί το επίπεδο ποιότητας του προϊόντος με τη χρήση έξυπνης τεχνολογίας ελέγχου. Ακόμα, ένα έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα σύστημα ελέγχου είναι μια σημαντική προσέγγιση για την παρακολούθηση της διαδικασίας και τον ποιοτικό έλεγχο. Επομένως, η ακριβής πρόβλεψη της ποιότητας του προϊόντος κατά την κατασκευή βιομηχανικών βαλβίδων είναι πολύ σημαντική για τη βελτίωση της ικανοποίησης των πελατών.

Από την άλλη πλευρά, τα Κυβερνοφυσικά Συστήματα (CPS) είναι σαν μια γέφυρα που συνδέει τη βιομηχανία παραγωγής και τις τεχνολογικές υπηρεσίες, η οποία χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική βιομηχανία, τα συστήματα μεταφορών, το εμπόριο και άλλους τομείς [22]. Τα CPS είναι επίσης μια σημαντική απλούστευση του πραγματικού φυσικού συστήματος σε μεγάλο βαθμό και καταγράφει αρκετή φυσική για να παρέχει χρήσιμη εικόνα για τους διαχειριστές και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για τη διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος. Η έξυπνη λήψη αποφάσεων βελτιώνει την

ακρίβεια και την ασφάλεια των CPS σε κάποιο βαθμό και μειώνει τη χρονική καθυστέρηση στη διαδικασία μετάδοσης δεδομένων [23]. Επιπλέον, μια έξυπνη προσέγγιση βάσει δεδομένων στη λήψη αποφάσεων είναι ένα σημαντικό μέρος του CPS. Επειδή τα δεδομένα περιέχουν πολλές χρήσιμες πληροφορίες, τα CPS καταγράφουν αρκετή έξυπνη υποστήριξη αποφάσεων για το άτομο διαχείρισης ποιότητας προϊόντων. Ωστόσο, πολλά δεδομένα αποθηκεύονται αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία παραγωγής, επομένως οι διαδικασίες πληροφοριών ελέγχου ποιότητας του προϊόντος είναι δύσκολο να εφαρμοστούν στα πρακτικά συστήματα. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός συστήματος ποιοτικού ελέγχου προϊόντων για διαδικασίες βιομηχανικής κατασκευής βαλβίδων σε CPS με βάση δεδομένα και ευφυείς αλγόριθμους θα έχει μεγάλη αξία. Ως εκ τούτου, αυτή η παράγραφος προτείνει μια έξυπνη μεθοδολογία, μαθηματική ανάλυση και προσέγγιση αναλογικής προσομοίωσης για το σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων στο CPS [24].

Επιπλέον, η δυναμική προσομοίωση και ανάλυση που βασίζεται σε δεδομένα έχει γίνει ένα hot spot προσομοίωσης έξυπνου συστήματος για το CPS στο ρεύμα. Με μια λύση αναφοράς εξαιρέσεων που βασίζονται σε δεδομένα ή παρακολούθηση τάσεων σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να προκύψει μια αποδοτική λύση για τον έλεγχο πολλών αναφορών επιχειρησιακής ανάλυσης για να βρίσκονται σημαντικά δεδομένα των τάσεων ανάπτυξης. Ο έξυπνος έλεγχος βάσει δεδομένων μέσω δοκιμών και εντοπισμού σφαλμάτων μπορεί πράγματι να βελτιώσει αποτελεσματικά την ποιότητα του προϊόντος. Τα έξυπνα συστήματα διαθέτουν αυτοματοποίηση δραστηριοτήτων που βασίζονται σε δεδομένα, όπως οι διαδικασίες δοκιμών και βαθμολόγησης. Ενώ οι πληροφορίες αποφάσεων παρτίδας βασίζονται σε δεδομένα και παράγονται δυναμικά, οι περισσότερες από τις πληροφορίες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό στατικές κατά την κατασκευή των CPS. Επομένως, ένα έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων θα πρέπει να περιλαμβάνει επεξεργασία δεδομένων, μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση. Έχουν δημιουργηθεί πολλές δοκιμές με βάση δεδομένα από τη διαδικασία κατασκευής βιομηχανικών βαλβίδων σε CPS για αυξημένη εγκυρότητα και ακρίβεια της δυναμικής ταξινόμησης των σφαλμάτων ποιότητας [24]. Αυτή η έξυπνη προσέγγιση είναι μια προσέγγιση χωρίς επίβλεψη, στατιστική, βασισμένη σε δεδομένα και χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο νευρωνικών δικτύων BP και άλλες τεχνολογίες δικτύου. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα ελέγχου ποιότητας προϊόντων που βασίζονται σε δεδομένα διαθέτουν αναγνώριση σφαλμάτων, δυνατότητες αναφοράς, μοντέλα λήψης αποφάσεων, βιβλιοθήκες εγγράφων, κ.λπ. [25]. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση συμβάντων που βασίζονται σε δεδομένα για διαδικασίες παραγωγής στο CPS.

Επιπρόσθετα, ένα έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα σύστημα ελέγχου είναι πολύ σημαντικό στη διαδικασία παραγωγής καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του προϊόντος. Ένα αυστηρό σύστημα ποιοτικού ελέγχου βασίζεται σε ένα έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα μοντέλο της διαδικασίας κατασκευής του εργαστηρίου για τη διασφάλιση της καλής ποιότητας προϊόντων. Αρχικά, προτείνεται η εισαγωγή ενός νέου μοντέλου ελέγχου αξιολόγησης ποιότητας της διαδικασίας κατασκευής βιομηχανικών βαλβίδων σε CPS για τον ποιοτικό έλεγχο των προϊόντων της μηχανουργικής κατεργασίας και της διαδικασίας συναρμολόγησης CPS. Θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα αυστηρό σύστημα ελέγχου ποιότητας προϊόντων σε πραγματικό φυσικό σύστημα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που ανακτώνται από το τελικό προϊόν μέσω δεδομένων ποιοτικού ελέγχου και αρχείων παρτίδας, το σύστημα ποιότητας του προϊόντος είναι συμβατό και αποτελεσματικό. Οι κατασκευαστικές επιχειρήσεις θα πρέπει να εφαρμόσουν ένα αποτελεσματικό σύστημα ποιότητας για την παρακολούθηση της απόδοσης της διαδικασίας για να διασφαλίσουν την επιτυχή λειτουργία των CPS. Κατόπιν, η ποιότητα συντήρησης του προϊόντος και το λειτουργικό σύστημα θα επηρεάσουν άμεσα την

ακρίβεια του ποιοτικού ελέγχου της διαδικασίας παραγωγής στο CPS. Μόλις χρησιμοποιηθεί το σύστημα ποιοτικού ελέγχου του προϊόντος, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησής της πραγματικής κατάστασης της διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου του προϊόντος και να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα ελέγχου για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής και της ποιότητας του προϊόντος. Τέλος, χρησιμοποιείται ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου για τη διασφάλιση εξαιρετικά εγγυημένων διεθνών προτύπων ποιότητας προϊόντων. Το σύστημα ποιοτικού ελέγχου μπορεί να επιτύχει πολλαπλά ποιοτικά χαρακτηριστικά (QC) (βλέπε παράρτημα) για λειτουργίες συλλογής, αποθήκευσης, ανάλυσης και ελέγχου και να μεταβιβάσει τους παράγοντες που επηρεάζουν τον άνθρωπο, τη μηχανή, το υλικό, τη μέθοδο, τη μέτρηση και το περιβάλλον στις προβλέψεις και τον έλεγχο ποιότητας προϊόντων προσομοίωσης CPS [24].

Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα, ένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου έχει ως στόχο να διασφαλίζει τα πρότυπα προϊόντων σε όλη τη διαδικασία του κύκλου ζωής του προϊόντος στα CPS. Συνδυάζοντας τον έξυπνο αλγόριθμο του νευρωνικού δικτύου BP, οι αυτόματες μέθοδοι πρόβλεψης ελέγχου μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα του προϊόντος και να αναβαθμίσουν την ακρίβεια και τη σταθερότητα του συστήματος ποιοτικού ελέγχου και διαχείρισης.

Βάσει αποτελεσματικών έξυπνων μεθόδων λήψης αποφάσεων, κατασκευάστηκε ένα νέο σύστημα ποιοτικού ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας στο CPS και προσομοιώθηκε με επιτυχία η μελλοντική αναπτυξιακή τάση.

1.6.1 Προτεινόμενο έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα μοντέλο πλαισίου στο CPS

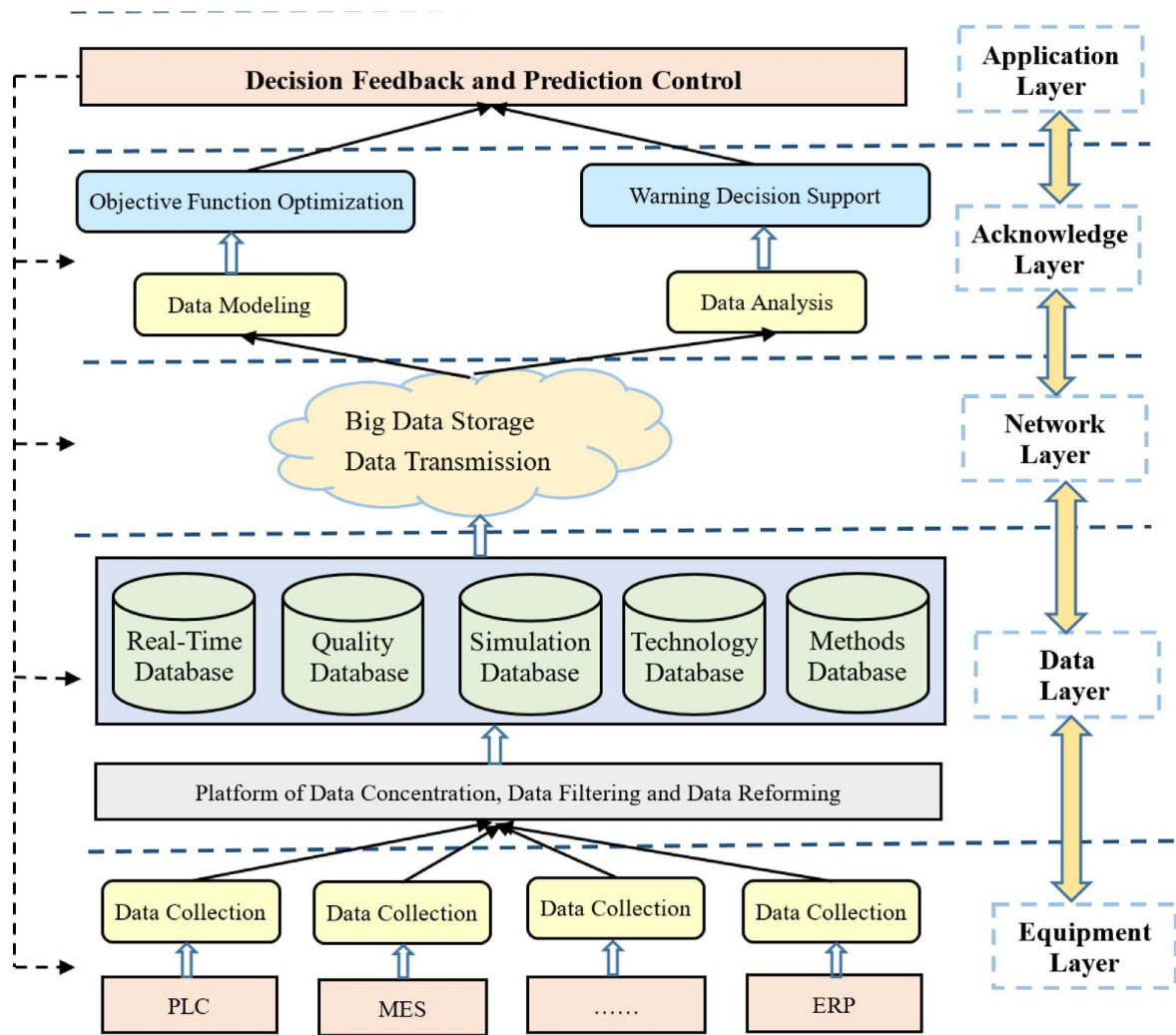
1.6.1.1 Πλαίσιο συστήματος ποιοτικού ελέγχου προϊόντων στο CPS

Το CPS είναι ένα έξυπνο σύστημα ασύρματου δικτύου που ενσωματώνει υπολογιστή, δίκτυο και φυσικό κόσμο. Το CPS έχει μια καλή προοπτική εφαρμογής και μπορεί να πραγματοποιήσει δυναμικό έλεγχο, υπηρεσίες πληροφοριών και ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο μεγάλων συστημάτων μηχανικής. Η αναπτυσσόμενη τάση του CPS είναι η ενοποίηση της ψηφιοποίησης, της ολοκλήρωσης, της δικτύωσης και της ευφυΐας. Προς το παρόν, οι περισσότερες έρευνες CPS επικεντρώνονται στον τρόπο δημιουργίας έξυπνης κατασκευής, όπως έξυπνος εξοπλισμός και έξυπνα εργοστάσια. Εισάγεται πρώτα ένα νέο έξυπνο και βασισμένο σε δεδομένα σύστημα ελέγχου ποιότητας προϊόντων σε επαγγελματίες με πολλά χρόνια πρακτικής ευθύνης προϊόντων σε πολλές κατασκευαστικές επιχειρήσεις. Το μοντέλο ελέγχου ποιότητας προϊόντος είναι ένα σύστημα ανίχνευσης για τη διαχείριση της διαδικασίας παραγωγής στο εργαστήριο. Ελέγχει την ποιότητα του προϊόντος ανιχνεύοντας μη φυσιολογικές πληροφορίες στην πραγματική διαδικασία παραγωγής, βελτιώνοντας έτσι τα οικονομικά οφέλη και μειώνοντας τις οικονομικές απώλειες. Ταυτόχρονα, αυτή η ενότητα περιγράφει το νέο μοντέλο πλαισίου, το οποίο αποτελεί βασικό στοιχείο του σχεδιασμού και της μεθόδου επαλήθευσης του συστήματος ποιοτικού ελέγχου προϊόντων βάσει δεδομένων για τη διαδικασία κατασκευής βιομηχανικών βαλβίδων στο CPS. Η ανάλυση του μοντέλου πλαισίου έχει επεκταθεί και η εφαρμογή της στο νέο σύστημα έχει βελτιωθεί.

Το προτεινόμενο μοντέλο αντιπροσωπεύει το CPS ως ένα σύνολο επιπέδων με ιδιότητες και συνδέσεις του επιπέδου εξοπλισμού, του επιπέδου δεδομένων, του επιπέδου δικτύου, του επιπέδου αναγνώρισης και του επιπέδου εφαρμογής, καθένα από τα οποία είναι μια άποψη του μοντέλου του πλαισίου. Οι τρεις τύποι πλαισίου που καλύπτονται σε αυτό το CPS είναι οι αρθρωτοί (modularity), οι βασισμένοι σε δεδομένα (data-driven) και το

μοντέλο (model). Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η ποιότητα του προϊόντος μπορεί να διασφαλιστεί απολύτως με τη χρήση δυναμικών πληροφοριών λειτουργίας του συστήματος ολικού ποιοτικού ελέγχου σε ευφυείς εγκαταστάσεις. Το σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων έχει λειτουργίες όπως διαχείριση βάσεων δεδομένων, στατιστικών δεδομένων και ερωτημάτων σε δίκτυο πραγματικού χρόνου και ποιοτικού ελέγχου της διαδικασίας παραγωγής. Το πλαίσιο του ευφυούς και βασισμένου σε δεδομένα συστήματος ελέγχου ποιότητας προϊόντων της διαδικασίας παραγωγής στο CPS φαίνεται στην Εικόνα 1.5.

Το πλαίσιο αυτό, θα εντοπίζει και θα εκτελέσει αυτόματα την επεξεργασία δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων για το σύστημα ελέγχου ποιότητας των προϊόντων, χωρίς να απαιτείται υπερβολική ανθρώπινη παρέμβαση. Το επίπεδο δεδομένων του πλαισίου περιλαμβάνει την απόκτηση δεδομένων εταιρικής ευφυΐας, την ανάλυση και την αποθήκευση δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δεδομένα πρέπει να κανονικοποιηθούν σε διαφορετικά επίπεδα δεδομένων της εφαρμογής. Επιπλέον, με την ευρεία εφαρμογή της κατασκευής νοημοσύνης, όλο και περισσότεροι μελετητές δίνουν προσοχή στην έρευνα για το δομικό σύστημα του επιπέδου δεδομένων στο CPS χρησιμοποιώντας έξυπνες μεθόδους λήψης αποφάσεων και τεχνικές βάση δεδομένων [24].



Εικόνα 1.5: Πλαίσιο έξυπνου και βασισμένου σε δεδομένα συστήματος ποιοτικού ελέγχου προϊόντων της διαδικασίας παραγωγής στο CPS.

1.6.1.2 Μοντέλο απόφασης βάση δεδομένων για έξυπνο έλεγχο ποιότητας προϊόντος στο CPS

Με την ανάπτυξη της σύγχρονης κατασκευαστικής τεχνολογίας, η τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της Βιομηχανίας 4.0 χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Λόγω των διαφοροποιημένων και εξατομικευμένων απαιτήσεων των πελατών, νέες μέθοδοι ελέγχου πρέπει να διασφαλίζουν σταθερά υψηλή ποιότητα προϊόντος. Εάν ένα προϊόν αποτύχει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής, ο στόχος του μηχανικού ποιότητας είναι να εντοπίσει τη βασική αιτία και να λάβει μέτρα για να το σταματήσει. Εκτός από αυτό, περιλαμβάνονται επίσης λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής, καθώς ορισμένες αλλαγές διαχείρισης σε εξαιρετικές καταστάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφική αποτυχία της διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου. Τα σφάλματα που προκύπτουν από αστοχίες στο στάδιο σχεδιασμού και κατασκευής είναι τα πιο επικίνδυνα, καθώς η εφαρμογή ενός συστήματος ποιοτικού ελέγχου για ένα προϊόν μπορεί να είναι μια πρόκληση. Η συχνή εμφάνιση τέτοιων βλαβών που σχετίζεται με κάποιο γεγονός προκύπτει από τη χρήση ελλιπών ή ανακριβών δεδομένων.

Για να αντιμετωπιστεί αυτή η άνευ προηγουμένου κατάσταση, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων βάση δεδομένων με έξυπνο αλγόριθμο. Εκτός από την παρακολούθηση της ποιότητας των προϊόντων και τον προγνωστικό έλεγχο, η ικανότητα ανάλυσης δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής είναι πολύ απαραίτητη σε πολλές παραδοσιακές εταιρείες παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, με την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου ποιότητας των προϊόντων, η διασφάλιση προϊόντων υψηλής ποιότητας έχει γίνει μια σημαντική πρόκληση για τους διαχειριστές ποιότητας των επιχειρήσεων. Επομένως, παρά τη μεγάλη προσπάθεια εντοπισμού πιθανών προβλημάτων στη διαδικασία κατασκευής προϊόντων σε CPS, η αστοχία του προϊόντος δεν μπορεί να αποφευχθεί πλήρως λόγω τεχνικών περιορισμών.

Ωστόσο, ο μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών του κάθε προϊόντος απαιτεί χρονοβόρα ανάλυση και βασίζεται στην εμπειρία των μηχανικών ποιότητας. Ως εκ τούτου, μια εφαρμογή μοντέλου λήψης αποφάσεων βάση δεδομένων που βασίζεται στο ψηφιακό δίδυμο (DT) (βλέπε παράρτημα) ως εργαλείο υποστήριξης αποτελεσμάτων γνώσης έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί για τα CPS. Για το λόγο αυτό, προτείνονται στοιχεία του DT για σκοπούς παρακολούθησης και ποιοτικού ελέγχου στο CPS [24]. Ο κύριος σκοπός του DT είναι να ενοποιήσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους δεδομένων για τη δομή του προϊόντος, την επεξεργασία, τη συναρμολόγηση, την κατασκευή και τη διαδικασία εξυπηρέτησης δικτύου [26]. Επιπλέον, τα μη τυπικά περιστατικά αποτυχίας διεργασιών και βάσεων δεδομένων πρέπει να αρχειοθετούνται στο DT. Ακόμα, παρά την περίπλοκη διαδικασία παραγωγής, η αναπαράσταση του DT είναι απαραίτητη για να επιτραπεί η ανάλυση δεδομένων. Εισάγονται στοιχεία DT για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων και προτείνεται ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων βάση δεδομένων που υποστηρίζει την ανάλυση αυτών. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε, για παράδειγμα, ένα ψηφιακό δίδυμο φρούτων με βάση τη μηχανιστική μοντελοποίηση [24]. Στη συνέχεια εισάγονται διάφορες ευφυείς τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, όπως ο ευφυής έλεγχος νευρωνικών δικτύων, ο συνεργατικός υπολογισμός και ο ειδικός στην λήψη αποφάσεων. Περιλαμβάνει συστήματα, δίκτυα και βάσεις δεδομένων.

Το DT έχει τα χαρακτηριστικά του συγχρονισμού σε πραγματικό χρόνο και της υψηλής πιστότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος σύντηξης του φυσικού κόσμου και του κόσμου της πληροφορίας. Η ψηφιακή τεχνολογία αξιοποιεί τη νοημοσύνη ενός μοντέλου ψηφιακής παραγωγής για να δημιουργήσει ένα δίδυμο μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, χρησιμοποιώντας μεθόδους DT για ποιοτικό

έλεγχο και διαχείριση καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος. Με βάση μεγάλο αριθμό δίδυμων δεδομένων που έχουν χαρτογραφηθεί σε φυσικό χώρο και σε ψηφιακό χώρο, η τιμή κατάστασης σε πραγματικό χρόνο και η πραγματική τιμή των ποιοτικών χαρακτηριστικών αντιστοιχίζονται σε ψηφιακό δίδυμο μοντέλο και δημιουργείται ένα μοντέλο πολυδιάστατης αξιολόγησης για να αντικατοπτρίζει την κατάσταση ποιότητας του χρόνου προϊόντος στη διαδικασία παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, προτείνονται ψηφιακά δίδυμα μοντέλα και δίδυμα δεδομένα που αντιστοιχούν τέλεια σε πραγματικά προϊόντα για την αξιολόγηση της κατάστασης ποιότητας της διαδικασίας παραγωγής σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, μέσω της συσσώρευσης μεγάλων δεδομένων και της εφαρμογής της τεχνολογίας DT σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, πολλά σφάλματα στη διαδικασία κατασκευής μπορούν να προσαρμοστούν και να επαληθευτούν έγκαιρα σε ένα δίδυμο εικονικό σώμα και το επίπεδο προγνωστικού ελέγχου ποιότητας των προϊόντων μπορεί να βελτιωθεί, λαμβάνοντας αποτελεσματική αξιολόγηση. Η τεχνολογία DT σε συνδυασμό με ευφυείς αλγόριθμους μπορεί να παρουσιάσει την πραγματική κατάσταση των φυσικών οντοτήτων στον ψηφιακό κόσμο σε πραγματικό χρόνο, να προβλέψει και να επαναλάβει επερχόμενα γεγονότα. Ακόμα, σε συνδυασμό με την τεχνολογία μεγάλων δεδομένων και τις μεθόδους στατιστικής ανάλυσης, η τεχνολογία DT μπορεί να βρει το βέλτιστο σχήμα βελτιστοποίησης ποιότητας προσομοιώνοντας διαφορετικές στρατηγικές κατασκευής. Η τεχνολογία DT μπορεί επίσης να ανακαλύψει γρήγορα ελαττώματα ποιότητας και προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στη διαδικασία παραγωγής, έτσι ώστε να ελέγχει αποτελεσματικά την ποιότητα της διαδικασίας και να βελτιώσει το συνολικό επίπεδο ποιότητας των προϊόντων [24].

1.7 Πράσινη Παραγωγή

Μια συστηματική λογοτεχνική ανασκόπηση που συζητά τα αποτελέσματα βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών σε σχέση με την 4^η Βιομηχανική Επανάσταση στην κατεργασία δεν έχει πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής. Το πλησιέστερο σε αυτόν τον στόχο είναι μια μελέτη που είχε ως στόχο να αναλύσει διάφορες ερευνητικές προσεγγίσεις του Industry 4.0 σε σχέση με τη βιωσιμότητα [27]. Ωστόσο, η μελέτη δεν ασχολείται με τη διάκριση των πράσινων διαδικασιών και των αποτελεσμάτων βιωσιμότητάς τους. Από την άλλη πλευρά, ο Ghobakhloo [28] ανέπτυξε τις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών βιωσιμότητας του Industry 4.0 για να κατανοήσει τις ευκαιρίες της ψηφιακής επανάστασης για βιωσιμότητα.

Οι Couckuyt και Van Looy [29] πραγματοποίησαν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των τομέων εφαρμογών και των ερευνητικών θεμάτων της διαχείρισης πράσινων επιχειρηματικών διαδικασιών. Επιπλέον, οι Couckuyt και Van Looy [30] διεξήγαγαν επίσης μια συστηματική επεξεργασία μελετών διαχείρισης πράσινων επιχειρηματικών διαδικασιών σε σχέση με τις ικανότητες, τους κλάδους και τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Ωστόσο, λείπει μια ολοκληρωμένη αναθεώρηση που να καλύπτει τη διασύνδεση των πράσινων διαδικασιών, την Βιομηχανία 4.0 και τη βιωσιμότητα στην κατασκευή. Στη βιβλιογραφία, οι συγγραφείς έχουν ασχοληθεί με το θέμα των πράσινων διαδικασιών κυρίως με έμφαση σε διάφορες τεχνολογίες, διαδικασίες, πεδία και τομείς. Αυτά είναι κυρίως έγγραφα ανασκόπησης που αφορούν πράσινες διαδικασίες για την ανακύκλωση ηλεκτρονικών απορριμμάτων, τεχνικές επεξεργασίας πράσινων τροφίμων, διαδικασίες πράσινης αλυσίδας εφοδιασμού, διαδικασίες logistics, διεργασίες που χρησιμοποιούν υπερκρίσιμο ρευστό διοξείδιο του άνθρακα, επεξεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης και πράσινη χημική διεργασία και σύνθεση [27]. Η πράσινη χημεία έχει ιδιαίτερη θέση σε

αυτόν τον τομέα. Εφαρμόζονται επτά αρχές σε αυτόν τον τομέα: πρόληψη αποβλήτων, οικονομία ατόμων, ασφαλέστερες συνθέσεις, ασφαλέστερα προϊόντα, ασφαλέστερα βοηθητικά μέσα, ενεργειακή απόδοση, ανανεώσιμη πρώτη ύλη, μείωση παραγώγων, κατάλυση, δυνατότητα αποδόμησης, πρόληψη ρύπανσης, πρόληψη ατυχημάτων [31].

Τα αποτελέσματα βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών δομήθηκαν από τους Mendoza-Fong et al. [32] σε τρεις κατηγορίες: λειτουργικά, εμπορικά και οικονομικά οφέλη.

Μια περιεκτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας από το 1994 έως το 2010 που σχετίζεται με την έρευνα καινοτομίας στην πράσινη τεχνολογία και την τεχνολογία χαμηλών εκπομπών άνθρακα παρέχεται από τους Shi and Lai [33]. Ομοίως, οι συγγραφείς Schiederig et al. [34] ασχολούνται με το ζήτημα της πράσινης καινοτομίας στην τεχνολογία και εκτός από τη βιωσιμότητα, εξετάζουν και τον κοινωνικό τομέα. Μερικοί συγγραφείς συζητούν διαφορετικές πράσινες τεχνολογίες, όπως η τεχνολογία παραγωγής σιδήρου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, η υιοθέτηση τεχνολογίας πράσινων λιπασμάτων, η τεχνολογία πράσινου τσιμέντου, η συγκομιδή πράσινης ενέργειας, οι αναστολές αλάτων για το χειρισμό της κλίμακας πετρελαιοπηγών, φυσικές ίνες στην αυτοκινητοβιομηχανία, διεργασίες κατασκευής πρόσθετων μετάλλων, πράσινο βιοντήζελ, ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες CO₂ για την κατασκευή σιδήρου και χάλυβα, εξόρυξη λαδιού με τεχνολογία υποκρίσιμου νερού και παραγωγή βιοντήζελ [27].

Ομοίως, υπάρχουν αναθεωρήσεις που επικεντρώνονται στην 4^η Βιομηχανική Επανάσταση. Η κύρια εστίαση τέτοιων εγγράφων ανασκόπησης είναι σε διαφορετικές τεχνολογίες, τάσεις και προοπτικές, σε τομείς όπως η 4^η Βιομηχανία στα οικονομικά, η διαχείριση και η κατασκευαστική βιομηχανία.

1.7.1 Βασικές Έννοιες και Όροι

Οι πράσινες τεχνολογίες ορίζονται ως τεχνολογίες που δεν είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον και επιτυγχάνουν οικονομική και κοινωνική βιωσιμότητα. Ο Shaikh [35] στην ανασκόπηση του ταξινομεί τις πράσινες τεχνολογίες εκτελώντας πράσινες διαδικασίες, όπως επεξεργασία νερού, επεξεργασία λυμάτων (αποχέτευσης), επεξεργασία στερεών αποβλήτων, καθαρισμό αέρα, περιβαλλοντική αποκατάσταση, εξοικονόμηση ενέργειας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης, πρακτικές πράσινων κτιρίων, βιώσιμες μεταφορές, καθαρή βιομηχανία, υδρογόνο και κυψέλες υδάτων, γεωργική τεχνολογία (οικολογική γεωργία, εγκαταστάσεις βιομάζας, ρύπανση των υδάτων, μετριασμός της διάβρωσης του εδάφους, λιπάσματα, κ.λπ.). Οι πράσινες διαδικασίες ορίζονται ως νέες ή τροποποιημένες διαδικασίες, συστήματα και προϊόντα που μειώνουν τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ο στόχος των σύγχρονων πράσινων διαδικασιών είναι ο σχεδιασμός και η εμπορευματοποίηση βιώσιμων και οικονομικά εφικτών βιομηχανικών διαδικασιών [27]. Ο Xie [36] πρόσθεσε ότι ο στόχος των πράσινων διαδικασιών είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την παραγωγή ή κατά τη μετατροπή των αποβλήτων σε χρηστική αξία. Οι καινοτομίες πράσινων διαδικασιών βελτιώνουν τις υπάρχουσες επιχειρηματικές διαδικασίες και φέρνουν νέες - μειώνοντας τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Αυτές οι νέες διαδικασίες έχουν θετικό αντίκτυπο στην οικονομική απόδοση της εταιρείας και βελτιώνουν την εταιρική εικόνα.

Οι Singh και Kumar [37] περιγράφουν διάφορες πράσινες τεχνολογίες και τον αντίκτυπό τους στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Για παράδειγμα, ηλιακά φωτοβολταϊκά, μεταφορές (βιοντήζελ, βιοκαύσιμα), συνθετικά κροκιδωτικά, ανίχνευση ρύπων, διαχείριση αποβλήτων, ναυοκυτταρικές ίνες, διανομή φαρμάκων, φυτοτεχνολογίες, βιοαποκατάσταση αρσενικού, κ.λπ.. Οι Purohit και Malvi [38] περιγράφουν τη χρήση των τεχνολογιών για την

αντιμετώπιση ζητημάτων βιωσιμότητας. Στη βιομηχανία, εξετάζουν τη χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας, εφαρμόζοντας τους κανόνες 3R, ελαχιστοποίηση χρήσης νερού και άλλων πόρων, χρήση εναλλακτικών διαδικασιών παραγωγής, χρήση τηλεπικοινωνιών, ψηφιοποίηση και υβριδικά οχήματα. Στη Νότια Κορέα, όσον αφορά την ανάπτυξη, αναφέρουν μια τάση από μεμονωμένες τεχνολογίες όπως ηλιακές κυψέλες και κυψέλες καυσίμου, LED (δίοδος εκπομπής φωτός), Internet of Things (IoT) για την αντιμετώπιση του συνολικού ζητήματος της κλιματικής αλλαγής [27]. Η καινοτομία και η τεχνολογία θεωρούνται ως οδηγοί της μετάβασης σε μια πράσινη οικονομία. Η εμπορευματοποίηση της ακαδημαϊκής γνώσης, συμπεριλαμβανομένης της κατοχύρωσης με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και αδειοδότησης εφευρέσεων, δηλαδή των πράσινων τεχνολογιών, είναι ταυτόχρονα κινητήρια δύναμη οικονομικής ανάπτυξης και απαραίτητο στοιχείο της παγκόσμιας βιώσιμης ανάπτυξης. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των πληροφοριών, αναδύεται ένα επίπεδο πληροφοριών για τη συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων. Ο όρος "μεγάλα δεδομένα" νοείται ως ένα σύνολο μεθόδων και μέσων για την επεξεργασία δομημένων και μη δομημένων δεδομένων. Καθώς τα δεδομένα αυξάνονται, τα τρέχοντα συστήματα πληροφοριών βρίσκονται υπό τεράστια πίεση όσον αφορά την ακεραιότητα, την ταχύτητα και την αποθήκευση. Ο Xie [52] πρόσθεσε ότι οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν αναλυτικά στοιχεία μεγάλων δεδομένων για να κατανοήσουν καλύτερα τις ανάγκες των πελατών και να αντιμετωπίζουν τα δεδομένα τους ως το κύριο επιχειρηματικό τους περιουσιακό στοιχείο [27]. Από την άποψη των πληροφοριακών συστημάτων είναι η στατιστική μοντελοποίηση διαφόρων συνόλων δεδομένων χρησιμοποιώντας μεγάλους όγκους δεδομένων, παρακολούθηση της κατανάλωσης, της ζήτησης, κ.λπ..

Στη μελέτη τους, οι Chu et al. [39] παρουσιάζουν πέντε έννοιες που αντιπροσωπεύουν τα κύρια ζητήματα του 21^{ου} αιώνα σε σχέση με τις πράσινες τεχνολογίες και συγκεκριμένα: εξοικονόμηση ενέργειας, κατανάλωση ενέργειας, πράσινη παραγωγή, πράσινα προϊόντα και βιώσιμη παραγωγή. Η εξοικονόμηση και η κατανάλωση ενέργειας θεωρούνται ως μία από τις προκλήσεις της βιομηχανίας 4.0, όπως ορίζεται από τους Zhong et al. [40] ως συνδυασμός ενσωματωμένων διαδικασιών κατασκευής και έξυπνης διαδικασίας παραγωγής, έχει αλλάξει ριζικά τις αλυσίδες αξίας του κλάδου και τα επιχειρηματικά μοντέλα. Αυτή η παράγραφος κατανοεί την βιομηχανία 4.0 ως μια επαναστατική βιομηχανική έννοια των παραγωγικών διαδικασιών στην κατασκευή, εστιάζοντας σε νέες τεχνολογίες που διασυνδέουν μηχανές και εξοπλισμό με ψηφιακά δεδομένα σε αυτοματοποιημένα, έξυπνα συστήματα. Αυτός ο ορισμός δημιουργήθηκε με βάση την ανάλυση πολλών απόψεων και μελετών, τους οποίους μπορούμε να κατατάξουμε ως έναν από τους σημαντικότερους συγγραφείς, όπως ο Ghafoorpoor που εστιάζει κυρίως στην παραγωγή ή ο Zambon [41] που αναφέρει την κύρια συμβολή στον συντονισμό. Ο Mehrpouya [42] βλέπει οφέλη για την βιομηχανία 4.0 στη διατήρηση της μακροπρόθεσμης ανταγωνιστικότητας ή στον αυτοματισμό όπως αναφέρεται από τον Lie [43]. Οι Vrchota και Pech [44] δήλωσαν ότι οι κύριες τεχνολογίες του Industry 4.0 περιλαμβάνουν τη χρήση αισθητήρων, συλλογή και ανάλυση δεδομένων, τεχνολογία πληροφοριών (IT) και κινητά τερματικά, αποθήκευση cloud, πληροφοριακά συστήματα και λογισμικό εκμάθησης, αυτόνομα ρομπότ, μηχανή σε μηχανή (M2M), επικοινωνία, κοινή χρήση και χρήση δεδομένων με προμηθευτές και πελάτες, χρήση εικονικής (και εκτεταμένης) πραγματικότητας, προσομοίωση και ψηφιακά δίδυμα και κατασκευή πρόσθετων.

Οι πράσινες τεχνολογίες θεωρούνται γενικά ως βιώσιμες τεχνικές που χρησιμοποιούν φυσικούς πόρους. Η βιομηχανία 4.0 στοχεύει στη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, επομένως οι πράσινες τεχνολογίες θεωρούνται βασικό συστατικό της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης. Οι τεχνολογίες Industry 4.0, όπως

η τρισδιάστατη εκτύπωση, η ρομποτική, το διαδίκτυο των πραγμάτων και τα μεγάλα δεδομένα μειώνουν την ποσότητα των απαιτούμενων επιχειρηματικών πόρων. Χάρη σε αυτές τις τεχνολογίες, είναι δυνατόν να αναμένεται συντόμευση των κύκλων καινοτομίας, αλλά όσον αφορά τους γενικούς περιβαλλοντικούς στόχους [27], ο συνδυασμός των όρων Βιομηχανία 4.0 και πράσινη διαδικασία μπορεί επίσης να φανεί στην αντίστροφη εφοδιαστική, π.χ., διαχείριση προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής του προϊόντος ή λιτή κατασκευή [27].

Ένα από τα δομικά στοιχεία της βιομηχανίας 4.0 σχετίζεται με την αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID) (βλέπε παράρτημα). Είναι μια τεχνολογία αυτόματης αναγνώρισης και συλλογής δεδομένων. Η ίδια η ετικέτα αποτελείται από τρία μέρη, δηλαδή ένα τσιπ με μια κεραία, έναν αναγνώστη που επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία και το ενδιάμεσο λογισμικό που συνδέει το υλικό RFID με το περιβάλλον χρήστη. Οι Arshad et al. [45] επέστησαν την προσοχή στο ενεργό RFID όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, καθώς το ενεργό RFID απαιτεί μπαταρίες ως πηγή ενέργειας. Ως εκ τούτου, όσον αφορά την πράσινη παραγωγή, προτείνουν, για παράδειγμα, τη μείωση του δικτύου RFID χρησιμοποιώντας κόμβους και εξελιγμένους μηχανισμούς δρομολόγησης ή τη χρήση επιλεκτικής σάρωσης, συλλέγοντας μόνο τα δεδομένα που απαιτούνται για την αξιολόγηση μιας συγκεκριμένης κατάστασης. Οι Xu et al. [46] έκαναν την εξοικονόμηση ενέργειας βασικό στόχο για τις εφαρμογές IoT.

Η αρχή της πράσινης παραγωγής είναι να παράγει το ίδιο προϊόν με λιγότερους πόρους και ενέργεια. Και στις δύο περιπτώσεις, εξοικονομούνται πόροι, επομένως η πρόληψη της σπατάλης είναι τόσο οικολογικά όσο και οικονομικά αποδοτική. Είναι η ταχεία εξάντληση των πόρων, η αύξηση της ενεργειακής έντασης, η αύξηση της ευαισθητοποίησης των πελατών και η συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που οδήγησαν σε αλλαγές και έκρηξη στην πράσινη παραγωγή [27]. Οι Paul et al. [47] ορίζουν την πράσινη κατασκευή ως όρο για τις βιώσιμες τεχνολογίες παραγωγής όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, βιοαντιδραστήρες, βιοδιήθηση ή αφαλάτωση. Οι Maruthi και Rashmi [48] κατανοούν την πράσινη παραγωγή ως φιλοσοφία και όχι ως τρόπο ή διαδικασία, μια μέθοδο παραγωγής που ελαχιστοποιεί τα απόβλητα και τη ρύπανση μέσω του σχεδιασμού προϊόντων και διεργασιών ενώ η βιωσιμότητα είναι αυτό που στοχεύει η πράσινη κατασκευή. Σύμφωνα με τους Govindan et al. [49], οι πιο συνηθισμένοι λόγοι για τη μετάβαση της παραγωγής προς μια πράσινη οικονομία περιλαμβάνουν την εξοικονόμηση χρημάτων, την εταιρική εικόνα, το περιβάλλον και τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία.

Την τελευταία δεκαετία, η έννοια της πράσινης οικονομίας γίνεται όλο και πιο ελκυστική για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Η πράσινη οικονομία περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές έννοιες και οι δεσμοί της με τη βιώσιμη ανάπτυξη δεν είναι πάντα σαφείς. Τα προσφερόμενα προϊόντα επηρεάζονται όχι μόνο από την ποιότητα και την τιμή, αλλά και από περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της βιωσιμότητας των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών. Σε αυτό το πλαίσιο, σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα της παγκόσμιας οικονομικής ανάκαμψης, πολλοί οργανισμοί εστιάζουν στην πράσινη οικονομία και την πράσινη ανάπτυξη [27].

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει αναπτύξει ένα σχέδιο βιώσιμης ανάπτυξης για τη στήριξη μιας ανταγωνιστικής πράσινης οικονομίας. Θεωρεί τη μείωση της χρήσης των πόρων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των πόρων ως βασικούς μηχανισμούς για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών θεμάτων και την ενίσχυση της ευρωπαϊκής ανταγωνιστικότητας. Το σχέδιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής είναι σε μεγάλο βαθμό σύμφωνο με τη διαμόρφωση της Στρατηγικής Πράσινης Ανάπτυξης του ΟΟΣΑ

(Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης), δίνοντας έμφαση στην καινοτομία ως μέσο αποσύνδεσης της ανάπτυξης από την εξάντληση του φυσικού κεφαλαίου [50,51].

Η ερμηνεία του όρου «πράσινη οικονομία» δεν είναι εύκολη, καθώς οι βιομηχανίες που σήμερα ταξινομούνται ως πράσινες χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για τις οικονομίες που φιλοδοξούν σε μια τέτοια ταξινόμηση. Οι Gasparator et al. [52] ορίζουν την πράσινη οικονομία ως ένα οικονομικό σύστημα που βελτιώνει την ανθρώπινη ευημερία, την κοινωνική δικαιοσύνη και μειώνει σημαντικά τους περιβαλλοντικούς κινδύνους και τις ελλείψεις. Ο Willis [53] αναφέρει ότι η διατήρηση της βιοποικιλότητας και οι υπηρεσίες οικοσυστήματος είναι οι πιο σημαντικοί πυλώνες της μετάβασης σε μια πράσινη οικονομία. Πράσινη ανάπτυξη - πράσινη οικονομία θεωρείται ως μια οδός προς τη βιώσιμη ανάπτυξη, δηλαδή την πορεία προς την οικονομική ευημερία, τη μείωση της φτώχειας και την περιβαλλοντική πρόοδο [27]. Οι Cudlinova et al. [54] προτιμούν να χρησιμοποιούν τον όρο «βιοοικονομία» για να συνδυάσουν την οικονομία και την οικολογία για τη βιωσιμότητα.

Οι επιχειρήσεις που επιδιώκουν να βελτιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές τους ευθύνες πρέπει να επικεντρωθούν στις τεχνολογίες μείωσης των απορριμμάτων κατά την παραγωγή. Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι η μείωση των πηγών αποβλήτων είναι επίσης μια μεγάλη κοινωνική πρόκληση που απαιτεί κοινωνική κινητοποίηση και περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των πολιτών. Η παράταση της διάρκειας ζωής των υλικών, η προώθηση της ανακύκλωσης και η μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη μείωση των απορριμμάτων είναι οι κύριοι στόχοι της έννοιας της κυκλικής οικονομίας. Η κυκλική οικονομία (CE) (βλέπε παράρτημα) νοείται ως μια αναγεννητική οικονομία στην οποία οι εισροές, τα απόβλητα και οι εκπομπές ελαχιστοποιούνται και η επισκευή, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακαίνιση και η ανακύκλωση αποτελούν την ουσία [27]. Σύμφωνα με τους Kirchherr et al. [55], ο κύριος στόχος της κυκλικής οικονομίας είναι να διαχωρίσει την οικονομική ανάπτυξη από την κατανάλωση πόρων. Οι Korhonen et al. [56] πρόσθεσαν ότι η κυκλική οικονομία περιορίζει την οικονομική ανάπτυξη στον βαθμό που την ανέχεται η φύση. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρνητικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τις επενδύσεις σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και το πρόσθετο κόστος των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας - το συνολικό κόστος για τη βιομηχανία.

Οι παραπάνω όροι ορίζονται ως «βιώσιμη ανάπτυξη». Αυτή είναι η κυρίαρχη αρχή της οικονομικής, περιβαλλοντικής και κοινωνικής ανάπτυξης, η οποία επιδιώκει να καλύψει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες [27]. Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης έχει τρεις πυλώνες - περιβαλλοντικό, κοινωνικό και οικονομικό. Στην περίπτωση αυτή, ενσωματώνονται οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές της βιωσιμότητας. Το σημείο εκκίνησης είναι η εξάπλωση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης στον κοινωνικό πυλώνα. Οι οικονομικές πτυχές μπορεί να είναι αυτοσκοπός ή μέσο για την επίτευξη κοινωνικών στόχων. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή προϊόντων που αξιολογούνται ως προς τον αντίκτυπο στη βιωσιμότητα μπορεί πάντα να είναι κινητήριος δύναμη της οικονομικής ανάπτυξης. Ωστόσο, ο ρόλος της διοίκησης είναι να ανταποκριθεί σε αυτές τις προκλήσεις των τριών πυλώνων, δηλαδή τα εργαλεία διαχείρισης βιωσιμότητας, όπως η διαφάνεια, η λογοδοσία προς τους ενδιαφερόμενους ή η επίτευξη μακροπρόθεσμης ευημερίας.

Σύμφωνα με τον Searcy [57], τα κίνητρα των εταιρειών για συμμετοχή στη βιώσιμη ανάπτυξη είναι η καλύτερη φήμη και η οργανωτική εικόνα, η εξοικονόμηση κόστους, τα κίνητρα των εργαζομένων, η μείωση του κινδύνου και η αυξημένη ανταγωνιστικότητα. Οι

Dyllick και Hockerts [58] συζητούν την τάση των επιχειρήσεων να επικεντρώνονται στα βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα. Η εμμονή με τα βραχυπρόθεσμα κέρδη έρχεται σε αντίθεση με τη μακροπρόθεσμη φύση της βιωσιμότητας. Με την πρώτη ματιά, η υιοθέτηση των αρχών εταιρικής βιωσιμότητας αντικατοπτρίζεται στα εσωτερικά έγγραφα του οργανισμού και η ενσωμάτωση μέτρων βιωσιμότητας αντικατοπτρίζεται στις αξιολογήσεις απόδοσης και στην εκπαίδευση των εργαζομένων. Σε επίπεδο αξίας του οργανισμού, διαδίδονται οι αρχές της εταιρικής βιώσιμης ανάπτυξης και οι εργαζόμενοι πιστεύουν σε πιο υπεύθυνες και ηθικές αξίες. Το βασικό επίπεδο εταιρικής βιωσιμότητας χαρακτηρίζεται από την αλληλεξάρτηση ανθρώπων και οικοσυστημάτων. Το επίπεδο ωριμότητας της στρατηγικής βιώσιμης ανάπτυξης μιας επιχείρησης σχετίζεται με την εταιρική στρατηγική της επιχείρησης στη διαδικασία σχεδιασμού και στη διαδικασία υλοποίησης. Εάν αυτές οι στρατηγικές ληφθούν ταυτόχρονα υπόψη, είναι πιθανό μια στρατηγική βιωσιμότητας να αποτελέσει ένα μονοπάτι προς μια συνολική επιχειρηματική στρατηγική [27].

1.7.2 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα

Στο πλαίσιο της έρευνας, οι συγγραφείς έχουν διατυπώσει σημαντικά ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία έχουν συζητηθεί μέσω της ανάλυσης των πόρων της βάσης δεδομένων με σκοπό να εξεταστούν οι τρόποι με τους οποίους οι συμβατικές πράσινες τεχνολογίες ως μέρος της Βιομηχανίας 4.0, παρέχουν αποτελέσματα βιωσιμότητας στην κατασκευή. Ο δευτερεύων στόχος τους είναι να αναπτύξουν ένα εννοιολογικό πλαίσιο για την ταξινόμηση της σχέσης των Industry 4.0, πράσινων διαδικασιών και βιωσιμότητας. Υπάρχουν τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Πώς να ταξινομηθούν οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 που παρέχουν αποτελέσματα βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών στην κατασκευή;
2. Ποιες συμβατικές πράσινες διαδικασίες παράγουν αποτελέσματα βιωσιμότητας ως μέρος της Βιομηχανίας 4.0 στην κατεργασία;
3. Ποια είναι τα αποτελέσματα βιωσιμότητας των συμβατικών πράσινων διαδικασιών στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 στην κατασκευή;

1.7.2.1 Ταξινόμηση τεχνολογιών βιομηχανίας 4.0

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα επιδιώκει να ταξινομήσει τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 που παρέχουν αποτελέσματα βιωσιμότητας για πράσινες διαδικασίες στην κατασκευή. Διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες από τις εργασίες που επικεντρώνονται στο Industry 4.0 περιέχουν λέξεις-κλειδιά: "big data", "IIoT", "cyber-physical systems" και "sensors". Η ταξινόμηση των διαφορετικών τεχνολογιών δημιουργεί τέσσερις τομείς εστιάζοντας στις επί του παρόντος αποδεκτές εργασίες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει εργασίες που ασχολούνται γενικά με τις έννοιες του Industry 4.0 και των έξυπνων συστημάτων και των εφαρμογών τους. Οι εργασίες με θέμα τα πληροφοριακά συστήματα μεγάλων δεδομένων και έξυπνων εργοστασίων εισάγουν την εφαρμογή μεγάλων δεδομένων, cloud, ERP και άλλων τεχνολογιών στην κατασκευή και έξυπνα εργοστάσια. Ένας άλλος τομέας περιλαμβάνει εργασίες που επικεντρώνονται σε κυβερνοφυσικά συστήματα και τη σύνδεσή τους με τον πραγματικό και τον ψηφιακό κόσμο μέσω ψηφιακών διδύμων, RFID και άλλες τεχνολογίες. Το τελευταίο πεδίο δημιουργήθηκε από έγγραφα για το IIoT και αισθητήρες για την κατασκευή, τη ρομποτική ή την τεχνολογία blockchain.

Οι Asiimwe και de Kock [59] δείχνουν ότι σημαντικές έννοιες, συμπεριλαμβανομένης της Βιομηχανίας 4.0 και της βιωσιμότητας, τονίζουν το IIoT, τα κυβερνοφυσικά συστήματα και την αυτοματοποίηση σε εφαρμογές παραγωγής και κατασκευής. Οι Bonilla et al. [60] παρουσίασαν πειραματικά συμπεράσματα σχετικά με την επιτυχή εφαρμογή τεχνολογιών Βιομηχανίας 4.0 για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προκλήσεων. Τα σενάρια του

σταδίου ανάπτυξης δείχνουν τάσεις αρνητικού αντίκτυπου με βάση τις αυξημένες ροές πρώτων υλών, προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ροές ενέργειας, καύσιμα μεταφορών, κ.λπ.. Η προσαρμογή αναμένεται να έχει θετικό αντίκτυπο στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα λόγω της μειωμένης μετακίνησης υλικών ή απορριμμάτων. Ο συνδυασμός και η εφαρμογή αυτών των στοιχείων Βιομηχανίας 4.0 έχει επίσης, θετικό αντίκτυπο στη μείωση των ροών και των εκπομπών.

Οι Beier et al. [61] περιγράφουν τα πιο σχετικά βασικά χαρακτηριστικά της Βιομηχανίας 4.0 και τη σχέση τους με τη βιωσιμότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά χωρίζονται σε σχετικά με τα άτομα, τεχνολογικά και οργανωτικά. Από τεχνολογική άποψη, είναι σαφές ότι οι πιο χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες είναι αυτές που βασίζονται στον αυτοματισμό και τα μεγάλα δεδομένα. Ωστόσο, το CPS, το IoT και το Cloud είναι επίσης σημαντικά. Οι Sartal et al. [62] επισημαίνουν το Industrial Internet of Things (IIoT), τα αυτόνομα και συνεργατικά ρομπότ, τα συστήματα προσομοίωσης, την ολοκλήρωση συστημάτων (επικοινωνία, κάθετα και οριζόντια συστήματα, διαδικασίες παραγωγής), την εικονική πραγματικότητα, το cloud computing και την κατασκευή προσθέτων (τρισεδιάστατη εκτύπωση) να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη βιωσιμότητα της κατασκευής. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης είναι συνεπή με αυτά που λαμβάνονται στο πλαίσιο SGI 4.0 (βλέπε παράρτημα).

Οι Tirabeni et al. [63] ανέλυσαν τη βιβλιογραφία από τεχνολογικές, οργανωτικές, κοινωνικές και οικονομικές προοπτικές για να βρουν αναδυόμενα θέματα στην 4^η Βιομηχανία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι εντοπίστηκαν τέσσερις τομείς: νέες εικόνες εργασίας και εργαζομένων (νέοι τύποι εργασίας, δεξιότητες και ικανότητες), μετασχηματιστικά επιχειρηματικά μοντέλα (προσανατολισμός προς τον πελάτη και τις υπηρεσίες, ολοκληρωμένα και δικτυωμένα, βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα), οργανωτικός μετασχηματισμός (νέα οργανωτική δομή, οργανωσιακή κουλτούρα, νέες εσωτερικές και εξωτερικές δραστηριότητες εταιρείας), πρότυπα κατάρτισης και εκπαίδευσης. Ωστόσο, αυτές οι διαστάσεις και τα θέματα δεν εξηγούν ποιες τεχνολογίες 4^{ης} Βιομηχανίας χρησιμοποιούνται και ποια αποτελέσματα βιωσιμότητας είναι σημαντικά.

1.7.2.2 Ταξινόμηση πράσινων διεργασιών και τεχνολογιών

Ο στόχος του δεύτερου ερευνητικού ερωτήματος είναι να ανακαλύψει ποιες συμβατικές πράσινες διεργασίες ως μέρος της Βιομηχανίας 4.0 στην κατασκευή, παράγουν βιώσιμα αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε ότι οι πράσινες διαδικασίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριους τομείς: πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα, πράσινη κατασκευή και πράσινος σχεδιασμός και ανάπτυξη. Στη συνέχεια, οι υποδιεργασίες δομήθηκαν σε αυτές τις τρεις ομάδες. Αυτές οι διαδικασίες δημιουργούν την εσωτερική αλυσίδα αξίας της εταιρείας, επομένως πρέπει να δοθεί προσοχή σε αυτές εάν η επιχείρηση θέλει να επιτύχει βιωσιμότητα. Αυτά είναι επίσης τα κύρια πεδία εφαρμογής των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0. Οι πράσινες τεχνολογίες εμπίπτουν σε τέσσερις κατηγορίες: τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας, τεχνολογίες πόρων/υλικών, τεχνολογίες μείωσης του κλίματος/εκπομπών και τεχνολογίες καθαρότερης παραγωγής. Οι Asiimwe και de Kock [59] αναφέρουν ότι οι βασικές εφαρμογές της Βιομηχανίας 4.0 περιλαμβάνουν την κατασκευή, τα έξυπνα εργοστάσια, την παραγωγή, τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, τα logistics, κ.λπ..

Ομοίως, αν συγκρίνει κανείς τις πράσινες διαδικασίες που λαμβάνονται με τις κύριες δραστηριότητες της αλυσίδας αξίας του Porter [64], διαπιστώνεται ότι υπάρχει συμφωνία. Οι κύριες δραστηριότητες είναι τα εισερχόμενα logistics, οι λειτουργίες, τα outbound logistics, το μάρκετινγκ, οι πωλήσεις και οι υπηρεσίες. Τα αποτελέσματα της βιωσιμότητας επηρεάζονται κυρίως από τη διαδικασία και τις υλικοτεχνικές λειτουργίες αυτών των δραστηριοτήτων (κυρίως κατεργασίες). Προς το παρόν, δεν δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο

πράσινο μάρκετινγκ, στις πράσινες πωλήσεις και στις πράσινες υπηρεσίες. Αυτό σημαίνει ευαισθητοποίηση των καταναλωτών και των εταίρων σχετικά με την εφαρμογή πράσινων διαδικασιών και πρακτικών στην επιχείρηση. Σύμφωνα με τον Porter [64], το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα προκύπτει από τις πολλές διαφορετικές δραστηριότητες που εκτελούν οι εταιρείες στο σχεδιασμό, την παραγωγή, το μάρκετινγκ, την παράδοση και την παροχή υποστήριξης των προϊόντων τους. Από αυτήν την άποψη, είναι επομένως σημαντική η έννοια του «πράσινου» να ενσωματωθεί σε όλες τις κύριες διαδικασίες και πρωταρχικές δραστηριότητες της επιχείρησης.

Οι Mendoza-Fong et al. [32] προσδιόρισαν 24 χαρακτηριστικά των πράσινων διεργασιών που καθορίζουν το επίπεδο της εφαρμογής της πράσινης παραγωγής. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τις ίδιες τις διαδικασίες, οι οποίες υποστηρίζουν τα οφέλη βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών. Αυτά είναι, για παράδειγμα, οι πράσινες αγορές, ο σχεδιασμός πράσινων προϊόντων και διαδικασιών, η περιβαλλοντική συνεργασία με προμηθευτές, οι πράσινες πρακτικές (στην προμήθεια, παραγωγικές διεργασίες, διανομή), η μείωση των εκπομπών, η λιτή παραγωγή, η εφαρμογή πράσινων τεχνολογιών, η ανακατασκευή προϊόντων κ.λπ.

1.7.2.3 Ταξινόμηση βιωσιμότητας

Μέσα από το τρίτο ερευνητικό ερώτημα, οι συγγραφείς προσπάθησαν να προσδιορίσουν τα κύρια αποτελέσματα βιωσιμότητας των παραδοσιακών πράσινων διαδικασιών στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 στην κατασκευή. Με βάση την ανάλυση περιεχομένου, τα αποτελέσματα της βιώσιμης ανάπτυξης ομαδοποιούνται σε τρεις τομείς: περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό. Όσον αφορά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, τα αποτελέσματα εστιάζονται κυρίως στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη βελτιστοποίηση των πόρων. Τα πιο κοινά αποτελέσματα οικονομικής βιωσιμότητας είναι οι μειώσεις κόστους, η παραγωγικότητα και η αποδοτικότητα και η υψηλότερη οικονομική απόδοση. Ένα από τα πιο σημαντικά αποτελέσματα κοινωνικής βιωσιμότητας είναι η ανάπτυξη του ανθρώπινου δυναμικού, η βελτίωση της κοινωνικής ευημερίας και η διαχείριση της ασφάλειας στο χώρο εργασίας. Στη συνέχεια, οι διαφορετικοί τύποι βιωσιμότητας ταξινομούνται σε ομάδες για καλύτερη σαφήνεια και συνολική περίληψη (περιβαλλοντική, οικονομική, κοινωνική βιωσιμότητα, τριπλή κατώτατη γραμμή και κυκλική οικονομία).

Οι πιο σημαντικοί μετρήσιμοι δείκτες βιωσιμότητας των γερμανικών και ιταλικών μικρομεσαίων επιχειρήσεων, σύμφωνα με τους Trianni et al [65] ταξινομούνται ως οικονομικοί (επιχειρηματικά μοντέλα, οικονομική ανάπτυξη, μέγεθος επιχείρησης, κόστος προϊόντος, χρόνος παράδοσης, ποιότητα), κοινωνικοί (απασχόληση, συνθήκες εργασίας, ανάπτυξη εργαζομένων, κοινωνικές επενδύσεις) και περιβαλλοντικοί (προϋπολογισμός και πιστοποίηση, ανακυκλώσιμα απόβλητα, ρύπανση του αέρα, των υδάτων και της γης, επικίνδυνες εισροές, εκροές και απόβλητα) της τριπλής κατώτατης γραμμής. Σύμφωνα με τους Beier et al. [61], οι οικονομικές και κοινωνικές πτυχές της βιωσιμότητας στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 κυριαρχούν στη βιβλιογραφία. Οι περιβαλλοντικές πτυχές διαδραματίζουν μικρό μόνο ρόλο σε δημοσιεύσεις που εστιάζουν στην τεχνολογία, τους ανθρώπους και τους οργανισμούς. Σύμφωνα με τους Kamble et al. [66], οι κύριες συνεισφορές και επιτεύγματα των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0 αποδίδονται στις οικονομικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις της βιωσιμότητας. Ωστόσο, η κοινωνική διάσταση της βιωσιμότητας έχει υψηλές δυνατότητες για την πραγματοποίηση βιώσιμης δημιουργίας βιομηχανικής αξίας.

Τα αποτελέσματα βιωσιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαφοροποίηση ή τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών όρων για την παραγωγή. Οι Raut et al. [67] συνοψίζουν τις

διαφορές μεταξύ των όρων "πράσινη παραγωγή", "λιτή κατασκευή", "μαζική παραγωγή" και "αιεφόρος παραγωγή" σύμφωνα με τους τομείς της οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Υπό αυτήν την έννοια, ο στόχος της πράσινης παραγωγής βασίζεται στην κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Στη λιτή κατασκευή, προτιμάται η οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η μαζική παραγωγή στοχεύει στην κλασική κοινωνικοοικονομική βιωσιμότητα. Ωστόσο, η βιώσιμη κατασκευή περιλαμβάνει όλες τις πτυχές της αειφορίας, δηλαδή την οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα. Οι Sangwan και Bhatia [68] συζήτησαν τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η αειφόρος ανάπτυξη της 4^{ης} Βιομηχανίας σε τρεις διαστάσεις. Η οικονομική διάσταση της βιωσιμότητας επικεντρώνεται στις οικονομικές επιδόσεις, την παρουσία στην αγορά, τον έμμεσο οικονομικό αντίκτυπο και τις πρακτικές προμηθειών. Η κοινωνική διάσταση περιέχει πυλώνες για την ικανότητα να εγγυάται την ευημερία όσον αφορά την ασφάλεια, την ισότητα (δικαιοσύνη), τις οικολογικές και αστικές μορφές. Η οικολογική διάσταση της βιωσιμότητας έχει περισσότερους πυλώνες, όπως υγιή οικοσυστήματα, πρόληψη της ρύπανσης, προτιμήσεις ευημερίας, μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δέκτη αποβλήτων και παροχή πόρων, μεταξύ άλλων. Οι Varela et al. [69] εξετάζουν τη σχέση μεταξύ της Βιομηχανίας 4.0 και της διάστασης της βιωσιμότητας, συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων τους. Όσον αφορά τη οικονομική βιωσιμότητα, αναφέρονται τα αυξημένα κέρδη, η δημιουργία αξίας, η αποδοτικότητα, η ευελιξία και ανταγωνιστικότητα, ο αυξημένος κύκλος εργασιών και τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα, το μερίδιο αγοράς, η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας και το μειωμένο λειτουργικό κόστος. Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των βιομηχανικών αποβλήτων, την κατανάλωση ενέργειας και την αυξημένη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και τη συνεργασία με εταίρους για καλές περιβαλλοντικές πρακτικές. Η κοινωνική διάσταση επικεντρώνεται στη βελτίωση της ποιότητας των συνθηκών εργασίας, στη μείωση των εργατικών ατυχημάτων (ασφάλεια εργασίας) και στην αύξηση της συμμετοχής των εργαζομένων κ.λπ. [27].

Κεφάλαιο 2. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

2.1 Ενεργειακή ταξινόμηση σε μηχανουργικές κατεργασίες

Υπάρχουν πολλά εξαρτήματα που καταναλώνουν πολλή ενέργεια σε εργαλειομηχανές, όπως κινητήρες και υδραυλικές αντλίες. Οι εργαλειομηχανές όχι μόνο επεξεργάζονται υλικά αλλά παράγουν απόβλητα και θερμότητα. Μόνο σε μια σωστά διαμορφωμένη διαδικασία κατεργασίας, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μετρηθεί, να προβλεφθεί και να μειωθεί. Ωστόσο, δεν υπάρχει ενιαία ταξινόμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε μηχανουργικές κατεργασίες. Στη συνέχεια περιγράφονται τρεις από τις κορυφαίες μεθόδους ταξινόμησης για την κατανάλωση ενέργειας σε μηχανικές κατεργασίες.

2.1.1 Κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα

Η κατανόηση και η ταξινόμηση διαφορετικών τύπων ροών ενέργειας είναι απαραίτητη για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών. Η μέτρηση και η παρακολούθηση της απαιτούμενης ενέργειας είναι το πρώτο βήμα για την ανάλυση και την εξοικονόμησή της. Ως εκ τούτου, απαιτούνται καινοτόμες και αποτελεσματικές προσεγγίσεις παρακολούθησης και διαχείρισης ενέργειας για τη διαμόρφωση ενεργειακά αποδοτικών μηχανικών κατεργασιών. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες για την

απόκτηση, παρακολούθηση και αποθήκευση των ενεργειακών πληροφοριών των εργαλειομηχανών σε τυπικές μορφές για να εξηγηθεί η ροή ενέργειας εντός των συστημάτων μηχανουργικής κατεργασίας [70].

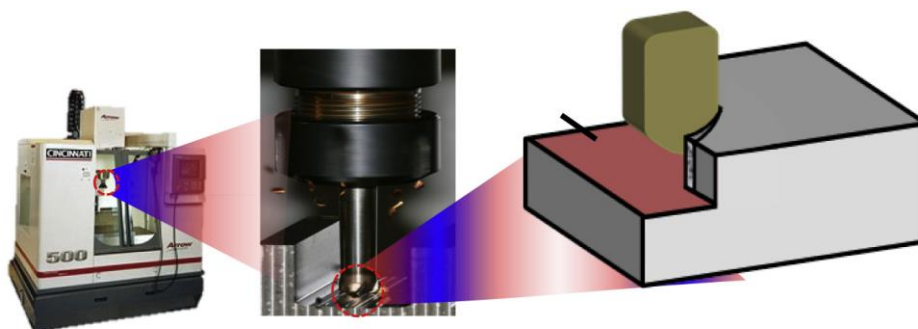
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία προσδιορίζονται έξι κριτήρια ταξινόμησης με βάση την ενεργειακή αξιολόγηση και τα οποία είναι τα εξής [71]:

Κριτήρια ταξινόμησης με βάση την ενεργειακή αξιολόγηση

| | |
|----|--|
| 1. | Εργαλειομηχανή Άτρακτος Κατεργασία |
| 2. | Εξέλιξη άμεσου και έμμεσου ενεργειακού κόστους |
| 3. | Διαχωρισμός άμεσης κατανάλωσης ενέργειας |
| 4. | Καταστάσεις λειτουργίας εργαλειομηχανών |
| 5. | Υποσυστήματα εργαλειομηχανών – λειτουργικές μονάδες – συστήματα σύνθεσης |
| 6. | Εξαρτήματα εργαλειομηχανών |

Πιο αναλυτικά:

Το **πρώτο κριτήριο ταξινόμησης** βασίζεται στα τρία επίπεδα: εργαλειομηχανή, άτρακτος και κατεργασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Κατανάλωση ενέργειας σε διάφορα στάδια

Σε επίπεδο κατεργασίας, μελετάται η ενέργεια που απαιτείται για την πραγματική αφαίρεση υλικού ή την ενέργεια από το άκρο του εργαλείου και είναι ανεξάρτητη από την εργαλειομηχανή. Η κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο κατεργασίας αφορά το σχηματισμό τσιπ και την παραγωγή επιφάνειας. Η απαιτούμενη ενέργεια θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή παραμέτρων κατεργασίας, όπου ο στόχος είναι να εξισορροπηθεί η κατανάλωση ενέργειας με τη βέλτιστη μορφή της τελικής επιφάνειας.

Στο επίπεδο της ατράκτου, εξετάζεται η κατανάλωση ενέργειας του συγκροτήματος της ατράκτου, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που απαιτείται για την περιστροφή του άξονα χωρίς φορτίο, των πρόσθετων απωλειών φορτίου μαζί με την ενέργεια από το άκρο του εργαλείου [71]. Η ανάλυση ενέργειας σε αυτό το επίπεδο, χρησιμοποιείται για τη μελέτη της απόδοσης του κινητήρα της ατράκτου. Έχει αναφερθεί ότι η άτρακτος μπορεί να καταναλώσει το 15% της συνολικής ενέργειας [72] η οποία σε αυτό το επίπεδο μπορεί να είναι χρήσιμη για την ανάλυση της απόδοσης του κινητήρα της ατράκτου. Η ενέργεια της ατράκτου εξαρτάται από τον κινητήρα, ο οποίος ποικίλλει ευρέως μεταξύ των εργαλειομηχανών. Επιπλέον, η ενέργεια της ατράκτου δεν συγκρίνεται με άλλες μηχανουργικές κατεργασίες.

Σε επίπεδο εργαλειομηχανής, αναλύεται η κατανάλωση ενέργειας ολόκληρης της εργαλειομηχανής. Περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται από τα συστήματα ελέγχου εργαλειομηχανών, τα συστήματα τροφοδοσίας, τα βοηθητικά εξαρτήματα, τη μονάδα ατράκτου, τις μονάδες ψύξης και λίπανσης, τα συστήματα μετάδοσης κίνησης, τον κινητήρα ατράκτου, τη διαδικασία κατασκευής και την αφαίρεση υλικού. Η κατανάλωση ενέργειας και συνθηκών κοπής σε αυτό το επίπεδο είναι πρακτική για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των εργαλειομηχανών.

Η ειδική ενέργεια (specific energy) χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της καταναλισκόμενης ενέργειας για μια μηχανική κατεργασία, η οποία ορίζεται ως η κατανάλωση ενέργειας για την αφαίρεση ενός μοναδιαίου όγκου υλικού εργασίας (Εξίσωση 2.1). Η συγκεκριμένη ενέργεια μπορεί να δοθεί σε τρία επίπεδα, ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας που αξιολογείται σε επίπεδο μηχανής, άξονα ή κατεργασίας (Εξισώσεις 2.2-2.4). Η ενέργεια ειδικής μηχανής (U_M) είναι πρακτική όταν αφορά τη συνολική ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από μια εργαλειομηχανή. Η ειδική ενέργεια του άξονα (U_S) είναι χρήσιμη για την ανάλυση της απόδοσης του κινητήρα του άξονα. Το πρόβλημα με την ειδική ενέργεια μηχανής και άξονα είναι ότι εξαρτώνται από τις εργαλειομηχανές. Προκειμένου να συγκριθεί αποτελεσματικά η κοπή με άλλες διαδικασίες αφαίρεσης υλικού, πρέπει να ληφθεί υπόψη η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής (U_{nc}).

Η ειδική ενέργεια καθαρής κοπής αφορά μόνο την ενέργεια που καταναλώνεται από την πραγματική κατεργασία κοπής και είναι ανεξάρτητη από την εργαλειομηχανή.

$$U = \frac{E}{V} = \frac{P}{MRR} \quad (2.1)$$

$$U_M = \frac{E_M}{V} = \frac{P_M}{MRR} \quad (2.2)$$

$$U_S = \frac{E_S}{V} = \frac{P_S}{MRR} \quad (2.3)$$

$$U_{nc} = \frac{E_{nc}}{V} = \frac{P_{nc}}{MRR} = \frac{P_S - P_{ac}}{MRR} \quad (2.4)$$

όπου:

E_M , E_S , E_{nc} είναι η ενέργεια της μηχανής, η ενέργεια του άξονα και η καθαρή ενέργεια κοπής σε J,

V είναι ο όγκος του υλικού που αφαιρέθηκε σε mm^3 ,

P_M , P_S , P_{nc} , και P_{ac} είναι η ισχύς μηχανής, ατράκτου, δικτύου κοπής και κοπής αέρα σε W, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με μετρητή ισχύος και

MRR είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού σε mm^3/s , ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί με παραμέτρους διαδικασίας (βλέπε παράρτημα).

Για παράδειγμα στο φινίρισμα (φραιζάρισμα) του σκληρυμένου χάλυβα εργαλείων AISI H13, τα U_M , U_S και U_{nc} κυμαίνονται μεταξύ 100 και 555 J/mm^3 , 50-250 J/mm^3 και 4-12 J/mm^3 , αντίστοιχα. Η ενεργειακή απόδοση (ο λόγος της καθαρής ειδικής ενέργειας κοπής προς την ενέργεια της μηχανής) κυμαίνεται μεταξύ 1% και 6%.

Παρόλο που η ενεργειακή απόδοση μπορεί να βελτιωθεί με υψηλότερο MRR πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν μπορεί να θυσιάζεται η ποιότητα του εξαρτήματος για χάρη της ενεργειακής απόδοσης.

Το **δεύτερο κριτήριο ταξινόμησης** βασίζεται στην εξέλιξη του ενεργειακού κόστους τόσο του άμεσου όσο και του έμμεσου ενεργειακού κόστους της μηχανής για την κατασκευή του προϊόντος. Άμεση ενέργεια είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από την εργαλειομηχανή για να εκτελέσει τις απαραίτητες εργασίες για την κατασκευή του προϊόντος και έμμεση ενέργεια είναι η ενσωματωμένη ενέργεια του κοπτικού εργαλείου, του ψυκτικού και του υλικού του τεμαχίου εργασίας. Η ανάλυση της άμεσης ενέργειας σε επίπεδο εργαλειομηχανών είναι σημαντική για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής τους.

Το **τρίτο κριτήριο** διαιρεί την άμεση κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο εργαλειομηχανής, σε κατανάλωση ενέργειας κοπής και κατανάλωση ενέργειας χωρίς κοπή σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κοπής. Η ενέργεια κοπής είναι η ενέργεια που απαιτείται για την αφαίρεση υλικού και η ενέργεια που δεν αφορά άμεσα την κοπή είναι η σταθερή ενέργεια που καταναλώνει η εργαλειομηχανή όταν είναι ενεργοποιημένη, ανεξάρτητα από το φορτίο κοπής. Περαιτέρω έρευνα του πεδίου επιβεβαιώνει ότι μεταξύ των καταστάσεων κοπής, υπάρχει μια άλλη κατάσταση που είναι υπεύθυνη για την προετοιμασία των εργαλείων για τη λειτουργία κοπής, η οποία ονομάζεται κατάσταση ετοιμότητας του μηχανήματος. Περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας από την περιστροφή του άξονα χωρίς φορτίο και την κίνηση του άξονα τροφοδοσίας.

Με την πρόοδο στην ανάλυση ενέργειας του εξοπλισμού, η κατανάλωση ενέργειας κατηγοριοποιείται σε πιο λειτουργικές καταστάσεις, όπως επιτάχυνση / επιβράδυνση ατράκτου, αλλαγή εργαλείου, κοπή αέρα, τοποθέτηση εργαλείου, κ.λπ..

Για την καλύτερη κατανόηση, το **τέταρτο κριτήριο ενεργειακής ταξινόμησης** βασίζεται στις καταστάσεις λειτουργίας των εργαλειομηχανών. Ορισμένες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές προσεγγίσεις μάθησης μηχανικής για τον προσδιορισμό της λειτουργικής κατάστασης μιας εργαλειομηχανής.

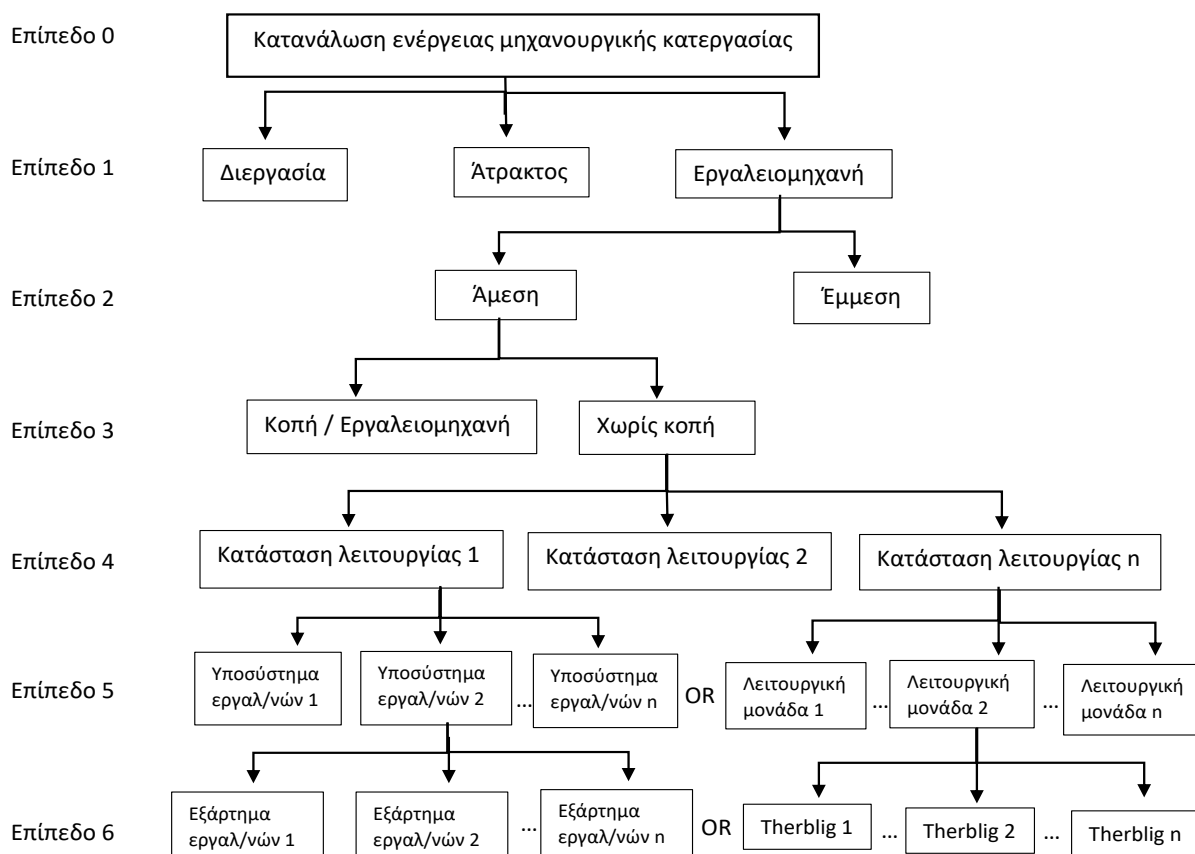
Το **πέμπτο κριτήριο ταξινόμησης** ενέργειας βασίζεται στα υποσυστήματα εργαλειομηχανών / λειτουργικές μονάδες / συστήματα σύνθεσης.

Σε κάθε τρόπο λειτουργίας του μηχανήματος, ένα ή περισσότερα συστήματα σύνθεσης είναι ενεργά. Κάθε σύστημα συναρμολόγησης περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα εξαρτήματα μηχανής όπως κινητήρα ψυκτικού, κινητήρα τροφοδοσίας ατράκτου, ελεγκτή, αντλία ψυκτικού, μεταφορέα τσιπ, αυτόματο εναλλάκτη εργαλείων, κ.λπ..

Το **έκτο κριτήριο** για την ενεργειακή ταξινόμηση βασίζεται στα εξαρτήματα εργαλειομηχανών. Τα μέρη της μηχανής χωρίζονται σε πυρήνα / οδηγό και βοηθητικά / περιφερειακά. Τα εξαρτήματα πυρήνα / οδηγού είναι υπεύθυνα για την αφαίρεση υλικού και τη μετάδοση κίνησης, ενώ τα βοηθητικά / περιφερειακά εξαρτήματα υποστηρίζουν τις βοηθητικές λειτουργίες. Τα εξαρτήματα εργαλειομηχανών μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως σταθερά ή παροδικά, με βάση τα χαρακτηριστικά κατανάλωσης ισχύος τους. Ο συνδυασμός μοντέλων εξαρτημάτων χαμηλού επιπέδου και τα μοντέλα κατάστασης υψηλού επιπέδου αποτελούν μια προσέγγιση υβριδικής ταξινόμησης ενέργειας [73], ενώ για τη χρήση στατιστικής προσέγγισης αναγνώρισης προτύπων, παρουσιάστηκε μια στοιχειώδης μελέτη, με σκοπό την ταξινόμηση εξαρτημάτων εργαλειομηχανών με βάση τα ενεργειακά τους χαρακτηριστικά [74].

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι λόγω της πολύπλοκης δομής των εργαλειομηχανών και του μεγάλου αριθμού εξαρτημάτων που καταναλώνουν ενέργεια στις εργαλειομηχανές, ο

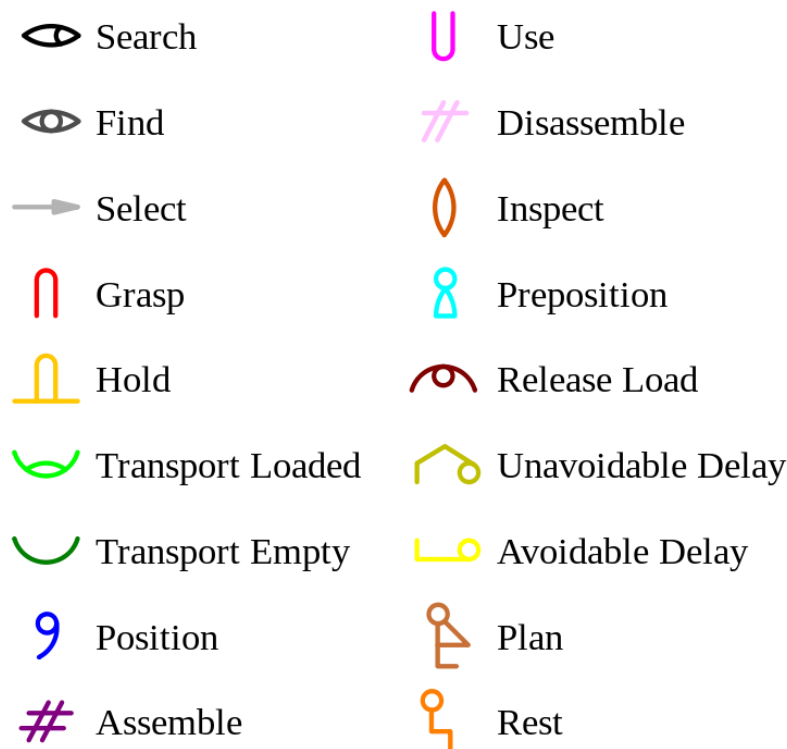
Σχήμα 2.1: Ιεραρχικό μοντέλο έξι επιπέδων για την ταξινόμηση της ενεργειακής κατεργασίας



Ένα βασικό στοιχείο κίνησης είναι ένα από ένα σύνολο θεμελιωδών κινήσεων που απαιτούνται από έναν εργαζόμενο για να εκτελέσει μια χειροκίνητη λειτουργία ή εργασία. Το σετ αποτελείται από 18 στοιχεία, καθένα από τα οποία περιγράφει μια τυποποιημένη δραστηριότητα.

- Transport Empty (εκφόρτωση) (TE): λήψη αντικειμένου με άδειο χέρι. (Τώρα ονομάζεται "Reach".)
- Grasp (G): πιάσιμο ενός αντικειμένου με το ενεργό χέρι.
- Transport Loaded (TL): μετακίνηση αντικειμένου με κίνηση του χεριού.

- Hold (H): κράτημα ενός αντικειμένου.
- Release Load (RL): απελευθέρωση του ελέγχου ενός αντικειμένου.
- Preposition (PP): τοποθέτηση και/ή προσανατολισμός ενός αντικειμένου για την επόμενη λειτουργία και σε σχέση με μια θέση προσέγγισης.
- Position (P): τοποθέτηση και/ή προσανατολισμός ενός αντικειμένου στην καθορισμένη θέση.
- Use (U): χειρισμός ενός εργαλείου με τον προβλεπόμενο τρόπο κατά τη διάρκεια της εργασίας του μαθήματος.
- Assemble (A): ένωση δύο μερών μεταξύ τους.
- Disassemble (DA): διαχωρισμός πολλαπλών εξαρτημάτων που έχουν συνδεθεί.
- Search (Sh): προσπάθεια εύρεσης αντικειμένου χρησιμοποιώντας τα μάτια και τα χέρια.
- Select (St): Επιλογή μεταξύ πολλών αντικειμένων σε μια ομάδα.
- Plan (Pn): λήψη απόφασης για μια πορεία δράσης.
- Inspect (I): προσδιορισμός της ποιότητας ή των χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας τα μάτια ή/και άλλες αισθήσεις.
- Unavoidable Delay (UD): αναμονή λόγω παραγόντων πέρα από τον έλεγχο του εργαζομένου και περιλαμβάνεται στον κύκλο εργασίας.
- Avoidable Delay (AD): αναμονή υπό τον έλεγχο του εργαζομένου που προκαλεί αδράνεια που δεν περιλαμβάνεται στον κανονικό κύκλο εργασίας.
- Rest (R): ανάπαυση για να ξεπεραστεί η κόπωση, που αποτελείται από μια παύση στις κινήσεις των χεριών ή/και του σώματος κατά τη διάρκεια των κύκλων εργασίας ή μεταξύ τους.
- Find (F): Μια στιγμιαία νοητική αντίδραση στο τέλος του κύκλου αναζήτησης. Σπάνια χρησιμοποιείται.

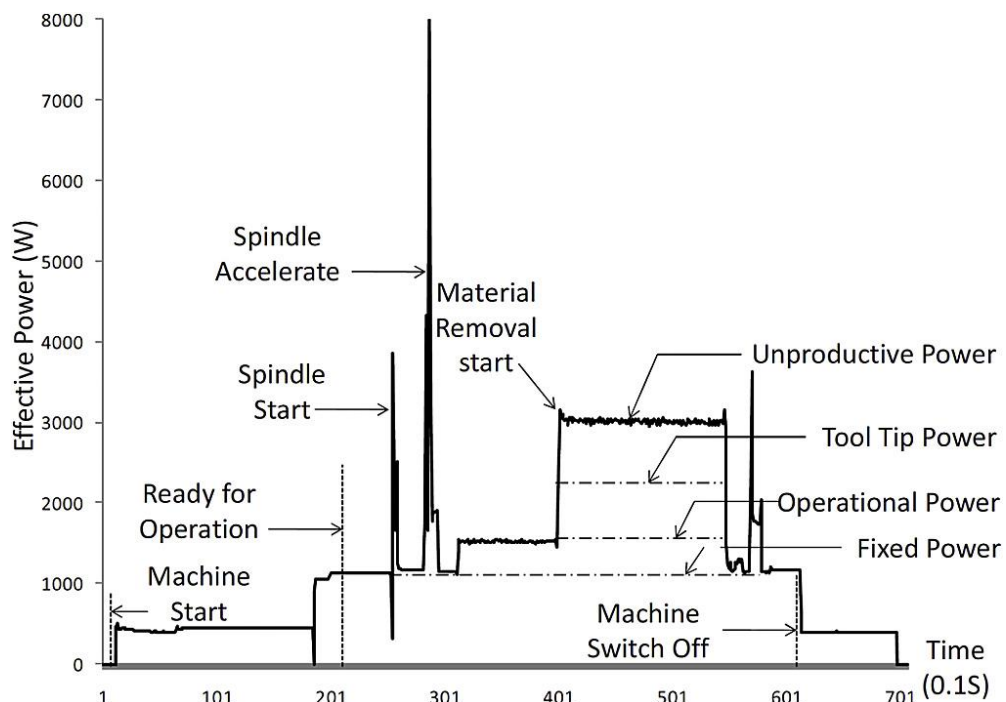


Σχήμα 2.2: Τα τυπικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των 18 Therbligs.

2.1.2 Κατανάλωση ενέργειας με βάση την κατάσταση της κάθε εργαλειομηχανής

Μια πλήρης διαδικασία μηχανουργικής κατεργασίας περιλαμβάνει την προετοιμασία της μηχανής, την προετοιμασία της πρώτης ύλης (stock), τον σχεδιασμό των οδηγών και των σφιγκτήρων (jigs and fixtures), τις συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση), τα εργαλεία κοπής και τα στάδια συναρμολόγησης.

Με βάση τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών κατεργασίας, το Cooperative Effort in Process Emission (CO₂PE!) (βλέπε παράρτημα) ταξινομεί τις εργαλειομηχανές σε δύο κατηγορίες: “BasicState” (Βασική κατάσταση) και “CuttingState” (Κατάσταση κοπής).



Σχήμα 2.3: Ηλεκτρικό προφίλ εργαλειομηχανών για μια ολοκληρωμένη διαδικασία κατεργασίας.

Στο “BasicState”, η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση των απαιτούμενων εξαρτημάτων της μηχανής και τη διασφάλιση της λειτουργικής ετοιμότητας της εργαλειομηχανής, ενώ στο “CuttingState”, η ενέργεια καταναλώνεται στο άκρο του εργαλείου για να αφαιρεθεί το υλικό του τεμαχίου εργασίας. Επιπλέον, οι Balogun και Mativenga έχουν προτείνει μια μεταβατική κατάσταση που ονομάζεται “ReadyState” (Κατάσταση ετοιμότητας) μεταξύ του “BasicState” και του “CuttingState” [97].

Το “ReadyState” πραγματοποιείται μετά την εκκίνηση της μηχανής αλλά πριν από την κοπή. Απαιτεί περισσότερη ενέργεια για τους ηλεκτροκινητήρες και την κίνηση του άξονα για να γίνει αλλαγή στο εργαλείο, να τοποθετηθεί το εργαλείο και το τεμάχιο εργασίας στις σωστές θέσεις και να ρυθμιστούν οι απαραίτητες παράμετροι επεξεργασίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 η κατανάλωση ενέργειας ταξινομείται σε E_{Basic} , E_{Ready} και $E_{Cutting}$ σύμφωνα με τα τρία στάδια κατασκευής.

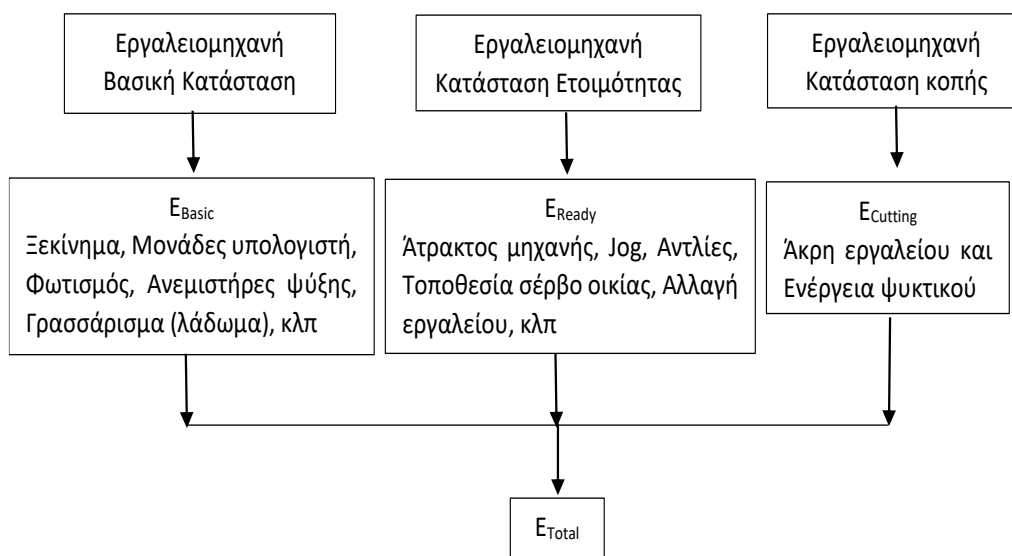
Αναλόγως, ταξινομείται και η κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- κατάσταση αδράνειας,
- λειτουργία χρόνου εκτέλεσης και

- λειτουργία παραγωγής.

Στην κατάσταση αδράνειας όταν το μηχάνημα είναι έτοιμο για παραγωγή, η κατανάλωση ενέργειας είναι σταθερή και καταναλώνεται από εξαρτήματα όπως ο πίνακας λειτουργίας και οι ανεμιστήρες. Στη λειτουργία χρόνου εκτέλεσης, όταν ενεργοποιούνται περισσότερα βοηθητικά στοιχεία, όπως ο κινητήρας, ο άξονας και το ψυκτικό, η κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης σταθερή. Στη λειτουργία παραγωγής, η κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται με την αφαίρεση υλικού και είναι μεταβλητή [70].

Η ταξινόμηση με βάση τις καταστάσεις της διαδικασίας κατασκευής είναι χρήσιμη για την κατανόηση της κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε στάδιο της διαδικασίας. Η συντόμευση του σταδίου αποκοπής και η επιλογή των παραμέτρων κοπής εξοικονόμησης ενέργειας στο στάδιο κοπής μειώνει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας στη μηχανική κατεργασία.



Σχήμα 2.4: Ταξινόμηση της κατανάλωσης ενέργειας με βάση τα στάδια κατασκευής

2.1.3 Ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας

Μια σύγχρονη εργαλειομηχανή αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα, π.χ. κινητήρες ατράκτου, σερβοκινητήρες, υδραυλικό σύστημα, σύστημα ψύξης και λίπανσης, σύστημα ελέγχου, βοηθητικό σύστημα και σύστημα περιφέρειας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Η κατανάλωση ενέργειας από τα επιμέρους εξαρτήματα εργαλειομηχανών μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο τύπους: σταθερή ενέργεια και μεταβλητή ενέργεια.

Η σταθερή ενέργεια καταναλώνεται από το υδραυλικό σύστημα, το σύστημα λίπανσης ψύξης, το σύστημα ελέγχου και άλλες περιφερειακές συσκευές όπως η μονάδα ελέγχου, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μηχανικής κατεργασίας.

Η μεταβλητή κατανάλωση ενέργειας προέρχεται από το σύστημα κίνησης με άξονα και σερβοκινητήρα, στο οποίο η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντίσταση κοπής. Η κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας ανά εξάρτημα της εργαλειομηχανής φαίνεται στη συνέχεια.

| Σύστημα εργαλειομηχανών | Κύρια εξαρτήματα | Λειτουργία |
|-------------------------|------------------------|---|
| Οδηγοί ατράκτου | Κύριος άξονας κινητήρα | Παροχή περιστροφικής κίνησης για κοπτικό εργαλείο ή |

| | | |
|------------------------|--|--|
| | | τεμάχιο εργασίας |
| Οδηγοί σερβομηχανισμού | Κινητήρες άξονα | Παροχή γραμμικής ή περιστροφικής κίνησης κατά μήκος του άξονα |
| Υδραυλικό σύστημα | Κινητήρας υδραυλικής μονάδας | Παροχή πίεσης σύσφιξης για το τεμάχιο εργασίας |
| Σύστημα ψύξης λίπανσης | Κινητήρας αντλίας λιπαντικού | Περιστροφική κίνηση για την αντλία για την παροχή λιπαντικού |
| | Κινητήρας αντλίας ψυγείου λαδιού | Περιστροφική κίνηση για την αντλία για την παροχή ψυκτικού υγρού |
| Σύστημα ελέγχου | Πίνακας ελέγχου συσκευής αριθμητικού ελέγχου | Μεταφορά αριθμητικών οδηγιών ελέγχου στην έξοδο ηλεκτρικών σημάτων |
| Βοηθητικό σύστημα | Υπολογιστής και συσκευή προβολής | Επεξεργασία δεδομένων και οπτικοποίηση των αντίστοιχων δεδομένων |
| | Φωτισμός | Φωτισμό στον χώρο εργασίας |
| | Ανεμιστήρες | Ψύχος στα ηλεκτρικά εξαρτήματα |
| Περιφερειακό σύστημα | Κινητήρας μεταφορέα τσιπ | Μεταφορά τσιπ |
| | Κινητήρας βραχίονα αλλαγής εργαλείου | Αλλαγή εργαλείου κοπής |

Πίνακας 2.1: Κύρια ηλεκτρικά εξαρτήματα εργαλειομηχανών

Η κατανάλωση ενέργειας των εργαλειομηχανών σε μια διαδικασία κατεργασίας αποτελείται από σταθερή και μεταβλητή κατανάλωση [70]. Η σταθερή κατανάλωση ενέργειας περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία εκκίνησης (δηλαδή στους ανεμιστήρες υπολογιστή, στους σερβομηχανισμούς, στην αντλία ψυκτικού, στο κλειδί άξονα και στους κινητήρες χωρίς φορτίο) και την ενέργεια που καταναλώνεται σε λειτουργίες χρόνου εκτέλεσης (JOG, αλλαγή εργαλείου, άξονα και καρουζέλ) (βλέπε παράρτημα). Η μεταβλητή κατανάλωσης ενέργειας σχετίζεται με τη μηχανική δράση. Με άλλα λόγια, η σταθερή κατανάλωση ενέργειας είναι ανεξάρτητη από τη μηχανουργική κατεργασία, ενώ η μεταβλητή κατανάλωσης ενέργειας εξαρτάται από τη μηχανουργική κατεργασία.

Με ανάλογο τρόπο, η συνολική ενεργειακή απαίτηση του αρχείου αριθμητικού ελέγχου για μηχανουργική κατεργασία 2,5 αξόνων ταξινομείται σε 1) σταθερή ενέργεια και 2) ενεργειακή απαίτηση κινητήρων αξόνων και αξόνων τροφοδοσίας [75]. Η σταθερή ενέργεια προσδιορίζεται με βάση μια προσεκτική παρακολούθηση του μεριδίου ενέργειας μεταξύ του βοηθητικού εξοπλισμού που υποστηρίζει την ολοκλήρωση των εργασιών μηχανουργικής κατεργασίας. Η ενέργεια των κινητήρων του άξονα και των αξόνων τροφοδοσίας υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα καθεστώτα σταθερής και μεταβατικής κατάστασης.

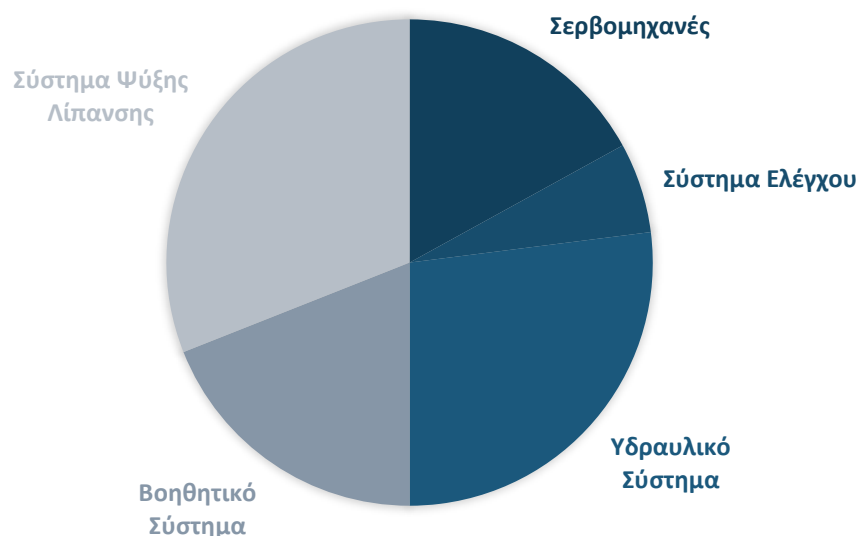
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 η ενέργεια στο στάδιο κοπής ταξινομείται σε τέσσερα μέρη:

- στην ειδική σταθερή ενέργεια (SFE – Specific Fixed Energy), που χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί ότι η εργαλειομηχανή είναι έτοιμη για λειτουργία,

- στην ειδική λειτουργική ενέργεια (SOE – Specific Operational Energy), που χρησιμοποιείται για να επιτρέψει βασικές λειτουργίες, όπως περιστροφή του άξονα και κίνηση του κοπτικού εργαλείου,
- στη συγκεκριμένη ενέργεια αιχμής εργαλείου (STE – Specific Tool Tip Energy), που απαιτείται από το άκρο εργαλείου και τέλος,
- στην ειδική μη παραγωγική ενέργεια (SUE – Specific Unproductive Energy), που μετατρέπεται σε θερμότητα [76].

Η ενέργεια που καταναλώνεται από όλα τα ενεργοποιημένα εξαρτήματα της μηχανής που διασφαλίζει τη λειτουργική ετοιμότητα της εργαλειομηχανής, αποτελεί τη σταθερή κατανάλωση ενέργειας στις εργαλειομηχανές λείανσης, τόννευσης και φραιζαρίσματος και ταξινομείται σε πέντε υποσυστήματα: 1) σερβοκινητήρες, 2) συστήματα ελέγχου, 3) υδραυλικό σύστημα, 4) σύστημα λίπανσης, ψύξης και 5) βοηθητικό σύστημα [76].

Η μέση σταθερή κατανάλωση ενέργειας για τις εργαλειομηχανές που εξετάστηκαν φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Επομένως, το υδραυλικό σύστημα και το σύστημα λίπανσης ψύξης καταναλώνουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας. Η ταξινόμηση με βάση τα εξαρτήματα εργαλειομηχανών είναι χρήσιμη για την κατανόηση της κατανάλωσης ενέργειας κάθε εξαρτήματος και την υιοθέτηση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας για τα εξαρτήματα υψηλής κατανάλωσης ενέργειας.



Σχήμα 2.5: Η κατανομή της μέσης σταθερής κατανάλωσης ενέργειας.

2.2 Διαδικασίες μέτρησης των απαιτούμενων ποσοτήτων ενέργειας

2.2.1 Εισαγωγή

Στις μηχανουργικές κατεργασίες, η επεξεργασία διακριτών εξαρτημάτων καταναλώνει σημαντική ποσότητα ενέργειας και πόρων. Από τη βιομηχανική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης (EE-27) το 2008, προκύπτει ότι η βιομηχανία μεταλλουργίας ευθύνεται για το 14,3% ή για 164 δισεκατομμύρια kWh [77]. Αν καταναλώνονται 3500 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά 4 νοικοκυριά το χρόνο, αυτό ισοδυναμεί με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 46,9 εκατομμυρίων νοικοκυριών. Ταυτόχρονα, υπάρχει μια

τάση προς πιο ενεργοβόρες τεχνολογίες επεξεργασίας και ως εκ τούτου ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της κατανάλωσης ενέργειας και των σχετικών κατασκευαστικών τομέων αυξάνεται σταθερά [79].

Σήμερα παρατηρείται πλέον μια κατεύθυνση προς πιο περιβαλλοντικές λύσεις. Εκτός από τους αυστηρότερους κανονισμούς (π.χ. το στόχο της ΕΕ 20/20/20 που αφορά 20% μείωση των αερίων θερμοκηπίου, 20% αύξηση ενεργειακής αποδοτικότητας και επιπλέον αύξηση του ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% [78]) και τα κίνητρα (π.χ. εργασίες τυποποίησης κατά ISO/CD 14955-1 που αποτελεί την εφαρμογή προτύπων οικολογικού σχεδιασμού σε εργαλειομηχανές, κυρίως για εργαλειομηχανές που λειτουργούν αυτόματα ή/και αριθμητικά ελεγχόμενες (NC – Numerical Control)), υπάρχουν επίσης και ανταγωνιστικά οικονομικά πλεονεκτήματα (π.χ. αύξηση των τιμών ενέργειας και πόρων) και προληπτική πράσινη συμπεριφορά (π.χ. εταιρική ταυτότητα), όπου μπορούν να θεωρηθούν ως σημαντικοί οδηγοί, για μια πιο πράσινη παραγωγή.

Οι περιβαλλοντικές αξιολογήσεις της αυτόνομης μηχανικής κατεργασίας και των ολοκληρωμένων αλυσίδων κατεργασίας συνεχίζουν να δείχνουν μεγάλες δυνατότητες βελτίωσης της κατασκευής εργαλειομηχανών, του ελέγχου διεργασιών και των επιπέδων σχεδιασμού παραγωγής, αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα των κατασκευαστικών εργασιών.

Σε όλα αυτά τα επίπεδα, έχουν προταθεί διαφορετικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ενεργειακών τιμών, που κυμαίνονται από θεωρητικούς προσδιορισμούς ενέργειας με βάση φυσικές διεργασίες έως μέσες χρονικές τιμές με βάση στατιστικούς προσδιορισμούς πειραματικών μετρήσεων εργαλειομηχανών που λειτουργούν σε βιομηχανικές συνθήκες. Η θεωρητική απαιτούμενη διαδικασία ενέργειας, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως το βέλτιστο κάτω όριο, συγκρίνεται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από δύο προτεινόμενες μεθόδους για συστηματικό προσδιορισμό καταχωρήσεων βάσης δεδομένων LCI (Life Cycle Inventory – Απογραφή Κύκλου Ζωής) για διακριτές μηχανουργικές κατεργασίες μονάδων.

Η πρώτη μέθοδος, η λεγόμενη **“Screening Approach”** (προσέγγιση προ συμπτωματικού ελέγχου), βασίζεται σε αντιπροσωπευτικά, δημόσια διαθέσιμα δεδομένα (π.χ. φύλλα δεδομένων εργαλειομηχανών, εγχειρίδια συντήρησης και εργασίες με αξιολόγηση) και θεωρητικούς υπολογισμούς μηχανικής, για τη χρήση ενέργειας, την απώλεια υλικών και τον προσδιορισμό μεταβλητών για βελτίωση. Η προσέγγιση προ συμπτωματικού ελέγχου παρέχει την πρώτη εικόνα στη διαδικασία της μονάδας και καταλήγει σε ένα σύνολο κατά προσέγγιση δεδομένων LCI, τα οποία χρησιμεύουν επίσης για να καθοδηγήσουν την πιο λεπτομερή και πλήρη σε βάθος προσέγγιση που οδηγεί σε πιο ακριβή δεδομένα LCI καθώς και στον εντοπισμό πιθανών βελτιώσεων της ενεργειακής απόδοσης και των πόρων της διαδικασίας της μονάδας παραγωγής. Αυτή η προσέγγιση απεικονίζεται για παράδειγμα μέσω μιας μελέτης περίπτωσης μιας διαδικασίας γεώτρησης [80].

Η δεύτερη μέθοδος, η **“In-Depth Approach”** (σε βάθος προσέγγιση) καθορίζει τη διαδικασία κατανάλωσης ενέργειας βάσει λεπτομερούς χρόνου διεργασίας καθώς και μετρήσεις ισχύος. Η μέθοδος αυτή, η οποία οδηγεί σε πιο ακριβή δεδομένα LCI καθώς και στον εντοπισμό δυνατοτήτων για περιβαλλοντικές βελτιώσεις των διαδικασιών της μονάδας παραγωγής, υποδιαιρείται σε τέσσερις ενότητες, συμπεριλαμβανομένης μιας μελέτης χρόνου, μιας μελέτης κατανάλωσης ενέργειας, μιας μελέτης αναλωσίμων και μια μελέτη εκπομπών, στην οποία όλες οι σχετικές εισροές και εκροές διεργασιών μετρούνται και αναλύονται λεπτομερώς. Η διαδικασία αυτής της προσέγγισης, μαζί με το προτεινόμενο πρότυπο CO2PE!, απεικονίζεται μέσω μιας μελέτης περίπτωσης μιας διαδικασίας κοπής με λείζερ και αποτελεί ένα παράδειγμα εφαρμογής της [80].

Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη αναπαραγωγιμότητα και δυνατότητα εφαρμογής, οι οδηγίες τεκμηρίωσης για δεδομένα και μεταδεδομένα περιλαμβάνονται και στις δύο προσεγγίσεις. Η καθοδήγηση για τον ορισμό της λειτουργικής μονάδας και της ροής αναφοράς καθώς και για τον προσδιορισμό των ορίων του συστήματος καθορίζει τις γενικές απαιτήσεις ορισμού στόχου και πεδίου σύμφωνα με το ISO 14040 (2006) και το ISO 14044 (2006). Τέλος, όπου είναι δυνατόν, οι λαμβανόμενες τιμές κατανάλωσης ενέργειας συγκρίνονται με τα διαθέσιμα αρχεία δεδομένων μιας από τις πιο γνωστές συμβουλευτικές βάσεις δεδομένων την LCI Ecolnvent 2.0.

Η βάση δεδομένων Ecolnvent είναι μια βάση δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής LCI που υποστηρίζει διάφορους τύπους αξιολογήσεων βιωσιμότητας. Η βάση δεδομένων Ecolnvent επιτρέπει στους χρήστες να αποκτήσουν μια βαθύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων και των υπηρεσιών τους. Ακόμα, τα σύνολα δεδομένων Ecolnvent περιέχουν πληροφορίες για τη βιομηχανική ή γεωργική διαδικασία που μοντελοποιούν, μετρώντας τους φυσικούς πόρους που αποσύρονται από το περιβάλλον, τις εκπομπές που απελευθερώνονται στο νερό, το έδαφος και τον αέρα, τα προϊόντα που απαιτούνται από άλλες διαδικασίες (ηλεκτρισμός) και φυσικά τα προϊόντα, παραγόμενα παραπροϊόντα και απόβλητα.

2.2.2 Ανάλυση διαδικασίας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για έξι διαφορετικές μηχανουργικές κατεργασίες: Τόρνευση, Φραιζάρισμα, Κοπή λείζερ, Κάμψη, Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λείζερ (Selective Laser Sintering - SLS) και χύτευση σε καλούπι, χρησιμοποιώντας τις διαφορετικές προσεγγίσεις που περιγράφονται παραπάνω.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 καθώς και στο Σχήμα 2.6.

Τόρνευση και Φραιζάρισμα

Η τόρνευση και το φραιζάρισμα είναι οι πιο εκτεταμένες διαδικασίες αφαίρεσης υλικών στην παραγωγή. Η θεωρητική ενέργεια της διαδικασίας αφαίρεσης είναι ίση με την εργασία που απαιτείται για την αφαίρεση του υλικού, η οποία περιλαμβάνει κυρίως ενέργεια διάτμησης και ενέργεια τριβής. Αφαιρώντας τη θεωρητική ενέργεια ανά όγκο υλικού, το e_{th} μπορεί να υπολογιστεί όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.5.

$$e_{th} = e_s + e_f = \tau\gamma + \frac{F_c r}{bt} \quad (2.5)$$

όπου:

e_s είναι η ειδική ενέργεια διάτμησης (J/cm^3)

e_f είναι η ειδική ενέργεια τριβής (J/cm^3)

τ είναι η διατμητική αντοχή (MPa)

γ είναι η διατμητική τάση

F_c είναι η συνιστώσα της δύναμης κοπής παράλληλη με την όψη του εργαλείου (N)

r είναι ο λόγος κοπής

b είναι το βάθος κοπής (mm)

t είναι η τροφοδοσία (mm/rev)

Η ενέργεια διάτμησης κατά την κοπή αντιστοιχεί στο 65-80% της συνολικής ειδικής ενέργειας και ορίζεται ως συνάρτηση της σκληρότητας Brinell (HB) του υλικού e_s [kJ/cm^3]

= (0,005-0,1) HB. Για παράδειγμα, η θεωρητική ειδική ενέργεια για ανθρακούχο χάλυβα με σκληρότητα Brinell 200 είναι 264 kJ/kg [80].

Ο υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας e_{sc} , αποτελείται από τρία μέρη: την ενέργεια κοπής, την ενέργεια αδράνειας (όλα τα συστήματα ενεργά, αλλά όχι αποτελεσματική κοπή, εξαιρούμενης της βασικής ενέργειας) και τη βασική ενέργεια (βοηθητικά συστήματα σε λειτουργία, όχι ενεργή τοποθέτηση ή κοπή) και προσδιορίζεται από την Εξίσωση 2.6 [106].

$$e_{sc} = e_p + \frac{P_{idle}}{MRR} + \frac{P_{basic}}{MRR} \left(1 + \frac{t_s}{t_m}\right) \quad (2.6)$$

όπου:

e_p είναι η ειδική ενέργεια κοπής (J/mm³)

MRR είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm³/s)

t_s είναι ο χρόνος αναμονής

t_m είναι ο χρόνος κατεργασίας

P_{idle} είναι το μέσο επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας για την αδράνεια

P_{basic} είναι το μέσο επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας για τη βασική λειτουργία

Από την πραγματοποίηση σε βάθος μετρήσεις σε κατεργασίες τórνευσης, αναλύθηκε η ενεργειακή ζήτηση των κατεργασιών φραιζαρίσματος [79]. Λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια αναμονής (έως και 30% του συνολικού χρόνου παραγωγής που δαπανάται σε κατάσταση αναμονής), η ειδική κατανάλωση ενέργειας, με βάση τις μετρήσεις της διαδικασίας όπως εφαρμόζονται κατά προσέγγιση σε βάθος, το e_{in} μπορεί να εξαχθεί χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.7.

$$e_{in} = \frac{P_m}{MRR} + \left(\frac{P_s}{MRR}\right) \left(\frac{t_s}{t_m}\right) \quad (2.7)$$

όπου:

P_m είναι η συνολική ισχύς εργαλειομηχανών (W) κατά τη διάρκεια της κατεργασίας

P_s είναι η συνολική ισχύς εργαλειομηχανών (W) κατά τη διάρκεια της κατάστασης αναμονής

Ο Πίνακας 2.2 και το Σχήμα 2.6 δείχνουν μια ποσοτική ανάλυση των ειδικών ενεργειακών τιμών της διαδικασίας τórνευσης και φραιζαρίσματος με χρήση ανθρακούχου χάλυβα. Διάφορα MRR από 0,75 cm³/min (φινίρισμα) έως 230 cm³/min (τραχύτητα) που προτείνονται από τον προμηθευτή του εργαλείου εφαρμόζονται για έλεγχο και εις βάθος ενεργειακή ανάλυση [82]. Η βάση δεδομένων Ecolnvent 2.0 LCI [83] αναφέρει την τιμή 1.706 MJ/kg κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τις μέσες λειτουργίες φραιζαρίσματος, ενώ οι τιμές για το CNC και του συμβατικού τórνου είναι 6.408 και 1.217 MJ/kg, αντίστοιχα.

Κοπή λείζερ

Η περίπτωση μελέτης της κοπής με λείζερ είναι η εκτέλεση μιας διαδικασίας κοπής με μήκος κοπής 30 m σε φύλλο χάλυβα πάχους 1 mm. Το υλικό της εργασίας είναι χάλυβας υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα S235JR. Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει απώλεια αγωγιμότητας ή αφαίρεση υλικού, η θεωρητική ειδική ενέργεια της κοπής με λείζερ είναι ο

συνδυασμός της απαιτούμενης ενέργειας για να έρθει ο πυρήνας στη θερμοκρασία τήξης του και για τη μετάβαση φάσης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.8 [79]:

$$e_{th} = m_{kerf} c_p (T_m - T_o) + m_{kerf} h_f \quad (2.8)$$

όπου για το αντίστοιχο τεμάχιο εργασίας, η θερμοκρασία τήξης είναι $T_m = 1808K$, η θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_o = 293K$, ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p = 0,7 \text{ kJ/kg K}$ και ενθαλπία της σύντηξης $h_f = 270 \text{ kJ/kg}$. Με βάση αυτές τις τιμές, η συγκεκριμένη θεωρητική ενέργεια e_{th} είναι 1330 kJ/kg .

Οι μηχανές κοπής με λέιζερ CO_2 ταξινομούνται κυρίως με βάση τη μέγιστη απόδοση της ισχύος του λέιζερ. Η μέθοδος ταξινόμησης χρησιμοποιεί δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας από δημοσιεύσεις του κατασκευαστή. Οι Duflou et al., ερεύνησαν την ενεργειακή χρήση μιας μηχανής λέιζερ CO_2 5kW μαζί με την κατανάλωση ενέργειας των υπομονάδων της, ενώ συζητήθηκε η κατανάλωση ισχύος των εργαλειομηχανών λέιζερ CO_2 2,5 και 4,5 kW [84]. Οι τιμές κατανάλωσης ισχύος από αυτές τις μελέτες περιλαμβάνονται στον υπολογισμό «Προσέγγιση σε βάθος» μαζί με πρόσθετα δεδομένα μέτρησης σε μηχανές κοπής με λέιζερ 2.5, 4 και 6 kW, όπως συλλέχθηκαν από τους συγγραφείς [85]. Όπως φαίνεται στην εκτενή έρευνα, λαμβάνεται υπόψη ένα ποσοστό του χρόνου αναμονής 15%. Στη βάση δεδομένων EcoInvent2.0, η διαθέσιμη γκάμα εργαλειομηχανών κοπής με λέιζερ CO_2 είναι από 2 έως 6 kW και η σχετική ισχύς κυμαίνεται από 40 έως 76 kWh σε λειτουργία 1 ώρας με χωρητικότητα 100% [83].

Κάμψη

Η θεωρητική αντοχή που απαιτείται για την κάμψη ενός φύλλου εξαρτάται από το σχήμα των οπών και των καλουπιών, την αντοχή του υλικού, το πάχος κάμψης και το μήκος του τεμαχίου εργασίας. Η θεωρητική δύναμη κάμψης (N) και η απαίτηση ενέργειας (J) της συνάρτησης κάμψης V μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις 2.9 και 2.10.

$$F_{bending} = \frac{1.33TSwt^2}{D} \quad (2.9)$$

$$E_{bending} = \frac{1.33TSwt^2}{[2tan(a/2)]} \quad (2.10)$$

όπου:

TS είναι η αντοχή εφελκυσμού (MPa)

W είναι το μήκος κάμψης (mm)

t είναι το πάχος του τεμαχίου (mm)

D είναι το άνοιγμα του καλουπιού V (mm)

a είναι η γωνία κάμψης.

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση διαλογής, προσδιορίζεται η κατανάλωση ενέργειας των διεργασιών κάμψης (σχηματισμός φρένων) ενώ αναλύεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των υδραυλικών και ηλεκτροκίνητων φρένων πίεσης, μέσω βιομηχανικών μετρήσεων χρόνου και ισχύος [79]. Ο Πίνακας 2.2 και το Σχήμα 2.5 δείχνουν την κατανάλωση ενέργειας για κάμψη 100 τόνων (1000kN) σε εργαλειομηχανές με μέγιστη χωρητικότητα φορτίου που κυμαίνεται από 100 έως 135 τόνους, λαμβάνοντας υπόψη το 87,5% του χρόνου αναμονής. Επί του παρόντος, οι διαδικασίες κάμψης αέρα δεν καλύπτονται στη βάση δεδομένων EcoInvent 2.0 [85].

Χύτευση σε καλούπι

Όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.11, η θεωρητική ειδική ζήτηση ενέργειας e_{th} σε διαδικασίες επεξεργασίας πολυμερών, όπως χύτευση με έγχυση, μπορεί να υπολογιστεί με βάση την ειδική ενθαλπία:

$$e_{th} = \Delta H_{T1} - \Delta H_{T2} \quad (2.11)$$

όπου ΔH_{T1} και ΔH_{T2} είναι η ειδική ενθαλπία (kJ/kg) σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος $T1$ και θερμοκρασία τήξης $T2$, αντίστοιχα. Για παράδειγμα, η επεξεργασία πολυστυρενίου (PS) από 25°C θερμοκρασία περιβάλλοντος σε θερμοκρασία τήξης 200°C απαιτεί θεωρητική ειδική ενέργεια 302,8 kJ/kg [86].

Ο κύριος κλάδος στις εργαλειομηχανές χύτευσης με έγχυση (σε καλούπι) αφορά τον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται οι ηλεκτροκινητήρες: υδραυλικού, υβριδικοί (σερβοκινητήρες και υδραυλικές αντλίες) ή πλήρως ηλεκτρικοί (σερβοκινητήρες). Ο Thiriez προσδιόρισε μέσες τιμές για τα e_{in} 3.39, 1.67 και 1.46 MJ/kg αντίστοιχα [87]. Για υδραυλικά και υβριδικά μηχανήματα, η ειδική ενεργειακή απαίτηση μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόδοση. Παρόμοιες τιμές λήφθηκαν από τους Ribeiro et al. [88], O' Cleirigh [89] και Kanungo και Swan [90]. Η τελευταία έλαβε μια τιμή e_{in} 0,72 MJ/kg για πλήρως ηλεκτρικές μηχανές.

Το αρχείο δεδομένων που περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων EcoInvent2.0 δείχνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα 5,3 MJ/kg.

SLS (επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ)

Η μελέτη της κατεργασίας SLS είναι μια διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης σκόνης PA12 με τελικό προϊόν βάρους 3 kg. Η θεωρητική ειδική ενέργεια της διαδικασίας SLS είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του κονιοποιημένου υλικού από το περιβάλλον στη θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2.12.

$$e_{th} = m_{sintered} c_p (T_s - T_o) \quad (2.12)$$

όπου:

$m_{sintered}$ είναι η μάζα του προϊόντος

T_s είναι η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης.

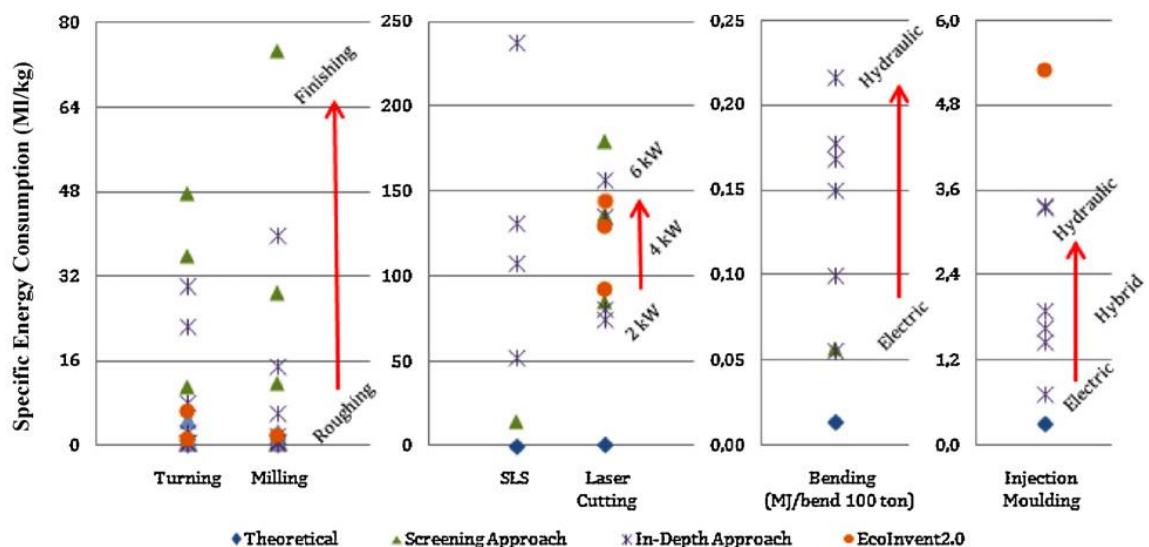
Αντικαθιστώντας τις ιδιότητες του PA12 στην Εξίσωση 2.12, η θεωρητική ειδική ενέργεια της κατεργασίας SLS είναι 396 kJ/kg.

Η προσέγγιση ελέγχου (screening approach) χρησιμοποιεί δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας από τις τεχνικές προδιαγραφές της εργαλειομηχανής SLS. Ο χρόνος διεργασίας υπολογίζεται με βάση τη θεωρητική ενέργεια και τη διαθέσιμη ισχύ λέιζερ κάθε μηχανής, αλλά ο χρόνος μη παραγωγής θεωρείται ότι είναι το 13% του συνολικού χρόνου. Με βάση αυτές τις μεταβλητές, η ενέργεια που απαιτείται για τη διαδικασία SLS με βάση την προσέγγιση ταξινόμησης είναι περίπου 14,5 MJ/kg. Με βάση τις μετρήσεις σε βάθος της κατεργασίας, έχουν αναφερθεί συγκεκριμένες τιμές κατανάλωσης ενέργειας που κυμαίνονται από 14,5 έως 66 kWh/kg για διαφορετικά εργαλεία μηχανών SLS [79].

Επί του παρόντος, η κατεργασία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ δεν είναι ακόμη διαθέσιμη στη βάση δεδομένων EcoInvent2.0 [85].

| | Τόρνευση | Φραιζάρισμα | Κοπή λέιζερ | Κάμψη | Χύτευση σε καλούπι | SLS |
|--|--|---------------|---|---|-----------------------------------|--------------------------------|
| Υλικό | Ανθρακούχο χάλυβα | | Ατσάλι S235JR | Ανοξείδωτο ατσάλι | PS | PA 12 |
| Μονάδα λειτουργίας | Κιλά (kg) του υλικού που αφαιρέθηκε | | | Κάμψη 1000kN | Κιλά (kg) του υλικού προϊόντος | |
| Προδιαγραφές μελέτης περίπτωσης | Σκληρότητα Brinell: 200 MRR: 230 cm ³ /min (τραχύτητα) έως 0.75cm ³ /min (φινίρισμα) | | Πάχος φύλλου: 1mm Μήκος κοπής: 30m | Πάχος φύλλου: 6mm Μήκος κάμψης: 1485 mm V-die: 48 mm Γωνία κάμψης: 1208 Χρόνος κάμψης: 8 δευτ. Χωρίς χρόνο αναμονής | Τήγμα: 200°C | Βάρος προϊό ντος: 3 κιλά |
| Θεωρητική προσέγγιση | 264 kJ | 264 kJ | 1330 kJ | 14 kJ | 302,8 kJ | 396 kJ |
| Προσέγγιση προ συμπωματικού ελέγχου | 0,48-47,71 MJ | 0,62-74,75 MJ | 85-180 MJ | 57 MJ | NA | 14,5 MJ |
| Σε βάθος προσέγγιση | 0,44-30,25 MJ | 0,47-39,84 MJ | 74-157 MJ | 56-217 MJ | 0,72-3,39 MJ | 52- 238 MJ |
| EcoInvent2.0 | CNC: 6,41 MJ Συμβατικό: 1,22 MJ | 1,71 MJ | 93-145 MJ | NA | 5,3 MJ | NA |

Πίνακας 2.2: Ειδικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 2.6: Ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (MJ/kg) με βάση διαφορετικές προσεγγίσεις για μια σειρά παραγωγικών διαδικασιών

2.2.3 Παρατηρήσεις πάνω στην ενεργειακή κατανάλωση

Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών απαιτήσεων μπορεί να παρατηρηθεί σε κάθε τύπο κατεργασίας. Οι μεγαλύτερες αλλαγές μπορούν να παρατηρηθούν στις κατεργασίες τόννευσης και φραιζαρίσματος, όπου η ειδική κατανάλωση ενέργειας μιας διεργασίας χαμηλού MRR (φινίρισμα) μπορεί να είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν μιας διεργασίας υψηλού MRR (τραχύτητα). Μεταξύ αυτών, οι Diaz et al., Kara και Li κατέληξαν σε παρόμοιο συμπέρασμα. Οι άλλες κατεργασίες παρουσιάζουν κατανομή του συντελεστή α από 2 έως 5, κυρίως λόγω διαφορετικών αρχιτεκτονικών εργαλειομηχανών (π.χ. υδραυλικές έναντι ηλεκτροκινούμενες εργαλειομηχανές) και χωρητικότητα φορτίου (π.χ. πηγές λέιζερ 2,5 έναντι 6 kW), οι οποίες έχουν σημαντική επίδραση στη σταθερή κατανάλωση ενέργειας (σύστημα ψύξης) κατά τη διάρκεια παραγωγικών αλλά και μη παραγωγικών (π.χ. αναμονής). Για το SLS, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των διαθέσιμων τιμών βάθους συμβαίνουν επειδή οι περισσότερες συγκεκριμένες τιμές ενέργειας βασίζονται μόνο στη μάζα, ενώ επίσης και το ύψος κατασκευής επηρεάζει σημαντικά τη συγκεκριμένη κατανάλωση ενέργειας.

Μια δεύτερη παρατήρηση είναι η τυχαία διαφορά μεταξύ των ενεργειακών απαιτήσεων που προκύπτουν από τις προσεγγίσεις διαλογής και εις βάθος. Ενώ η προσέγγιση διαλογής υπερεκτιμά τις ενεργειακές απαιτήσεις των κατεργασιών τόννευσης και φραιζαρίσματος (κυρίως λόγω των υποτιθέμενων υψηλών επιπέδων αδράνειας και βασικής ισχύος), τα αποτελέσματα της κοπής με λέιζερ είναι πολύ κοντά στην ποιότητα δεδομένων των τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή εργαλειομηχανών. Δεδομένου ότι η προσέγγιση διαλογής συχνά δεν λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια μη παραγωγικών τρόπων λειτουργίας, μπορεί να παρατηρηθεί σοβαρή υποεκτίμηση των διεργασιών κάμψης και SLS. Γενικά, η προσέγγιση διαλογής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων που παρέχονται από τους κατασκευαστές εργαλειομηχανών και τη σωστή αναγνώριση των συστάσεων για μη παραγωγικούς τρόπους λειτουργίας.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3, υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ της θεωρητικής ζήτησης ενέργειας, παραβλέποντας την κατανάλωση ενέργειας των περιφερειακών (υπό) διεργασιών (π.χ. τοποθέτηση τεμαχίου εργασίας, ψύξης, κ.λπ.) για υποστήριξη της λειτουργίας και την πραγματικά καταναλωθείσα ενέργεια. Αυτό δείχνει μεγάλες δυνατότητες για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των διαδικασιών κατασκευής διακριτών εξαρτημάτων. Όπως περιγράφεται από τους Duflou et al., αυτό το δυναμικό βελτίωσης περιλαμβάνει διαφορετικές στρατηγικές (π.χ. επιλογή κατεργασίας/εργαλειομηχανής, σχεδιασμός εργαλειομηχανών, έλεγχος κατεργασιών κ.λπ.) και μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά επίπεδα του συστήματος παραγωγής, από διαδικασίες μονάδας έως το επίπεδο της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού [91].

| MJ | Θεωρητική | Σε βάθος προσέγγιση | | Αναλογία (ratio) |
|-------------------|-----------|---------------------|--------|---------------------|
| | | Min. | Max. | |
| Τόννευση | 0.26 | 0.44 | 30.26 | 1.7 -> 116.4 |
| Φραιζάρισμα | 0.26 | 0.47 | 39.84 | 1.8 -> 153.2 |
| Κοπή λέιζερ | 1.3 | 74.32 | 157 | 57 -> 121 |
| Κάμψη | 0.0014 | 0.056 | 0.216 | 40 -> 156 |
| SLS | 0.4 | 52.2 | 237.67 | 130 -> 594 |
| Χύτευση με έγχυση | 0.30 | 0.72 | 3.39 | 2.4 -> 11.2 |

Πίνακας 2.3: Αναλογία θεωρητικής και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Τέλος, τα σύνολα δεδομένων διεργασίας LCI που είναι διαθέσιμα αυτήν τη στιγμή στο Ecolnvent2.0 [85] μπορούν να συγκριθούν με τις τιμές μετρούμενης ενέργειας. Ενώ οι διαθέσιμες μέσες τιμές για τις διεργασίες τóρνευσης και φραιζαρίσματος τείνουν να υποτιμούν την πραγματική κατανάλωση ενέργειας, για τις διαδικασίες χύτευσης με έγχυση μπορεί να παρατηρηθεί υπερεκτίμηση έως τον παράγοντα 7. Αν και το σύνολο δεδομένων LCI βασίζεται σε μετρήσεις κατεργασίας, αυτές οι διαφορές μπορούν να εξηγηθούν από περιορισμένες (1 ή 2) και χρονολογημένες (1976-1997) πηγές δεδομένων. Σύμφωνα με πιο αξιόπιστα δεδομένα κατασκευαστών (Trumpf 2D TruLaser series, 2006), τα διαθέσιμα λείζερ είναι πολύ ακριβή. Τα δεδομένα για κατεργασίες SLS και Κάμψη Αέρα (Air Bending) δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων Ecolnvent 2.0.

Συνοψίζοντας ως αυτό το σημείο παρουσιάστηκαν οι μεγάλες αποκλίσεις στη ζήτηση ενέργειας και τις σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών παραγωγής διακριτών εξαρτημάτων που προκύπτουν από διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης. Η θεωρητική προσέγγιση κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί σε μεγάλες υποεκτιμήσεις, έως και 2 τάξεις μεγέθους. Ενώ η εις βάθος ανάλυση χρόνου και ισχύος των εργαλειομηχανών που λειτουργούν υπό βιομηχανικές συνθήκες παρέχει πραγματική κατανάλωση ενέργειας, οι πιο φιλικές μέθοδοι κατεργασίας ως προς τους απαιτούμενους πόρους έχουν σημαντικά μικρότερο μερίδιο μη παραγωγικού χρόνου, περιορισμένο αριθμό παραμέτρων κατεργασίας και καλά τεκμηριωμένες προδιαγραφές. Ωστόσο, η ακρίβεια των κατά προσέγγιση υποθέσεων που γίνονται με αυτήν τη μέθοδο διαλογής μπορεί να επαληθευτεί αυστηρά μόνο με βάση τη μέθοδο της εις βάθος αξιολόγησης και επομένως αυτή η μέθοδος συνίσταται κατά την αξιολόγηση της χρήσης των αποτελεσμάτων στη βάση δεδομένων LCI.

Τέλος, η ακρίβεια των διαθέσιμων καταγεγραμμένων δεδομένων σχετικά με τις διαδικασίες παραγωγής σε βάσεις δεδομένων LCI, όπως το Ecolnvent2.0, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της κατεργασίας. Για ορισμένα αρχεία, η ποιότητα των καταχωρημένων δεδομένων αφήνει σημαντικό χώρο για βελτίωση. Η ποιότητα της κάλυψης της βάσης δεδομένων LCI των μηχανουργικών κατεργασιών θα μπορούσε επίσης να βελτιωθεί με περαιτέρω υποδιαίρεση κατηγοριών διεργασιών με βάση τα εφαρμοσμένα υλικά, την αρχιτεκτονική εργαλειομηχανών και τη χωρητικότητα καθώς και τις παραμέτρους κατεργασίας [79].

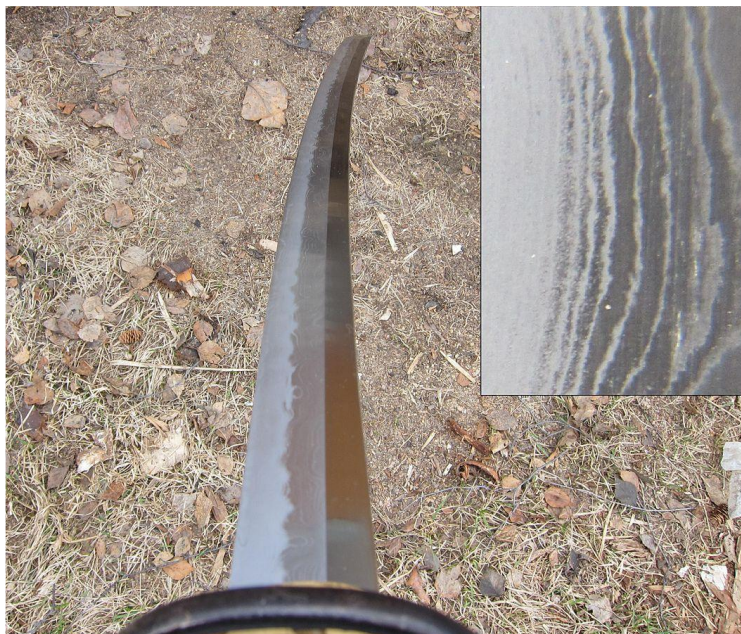
2.3 Συσχέτιση της κατανάλωσης ενέργειας με την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος από τη διαδικασία κατεργασίας

2.3.1 Χαρακτηρισμός ποιότητας επιφανειών

Η ποιότητα της επιφάνειας ενός προϊόντος είναι σημαντική, συμπεριλαμβανομένων στοιχείων όπως η τραχύτητα και η υφή των επιφανειών, η οποία είναι σημαντική τόσο για λειτουργικούς όσο και για αισθητικούς λόγους. Οι τραχιές επιφάνειες αντανakλούν λιγότερο φως, γεγονός που διευκολύνει την προσκόλληση οποιασδήποτε συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια και τη δημιουργία ισχυρότερου δεσμού. Επιπλέον, η αυξημένη τριβή είναι απαραίτητη σε εργασίες όπως παράδειγμα σε χειρολαβές εργαλείων ή φρένα. Οι λείες επιφάνειες είναι επιθυμητές για εξαρτήματα που απαιτούν χαμηλή τριβή ή για διηλεκτρικές επαφές. Αισθητικά, οι επιφάνειες παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην ελκυστικότητα ενός προϊόντος, π.χ. οι λείες/γυαλιστερές επιφάνειες ενισχύουν, συνήθως,

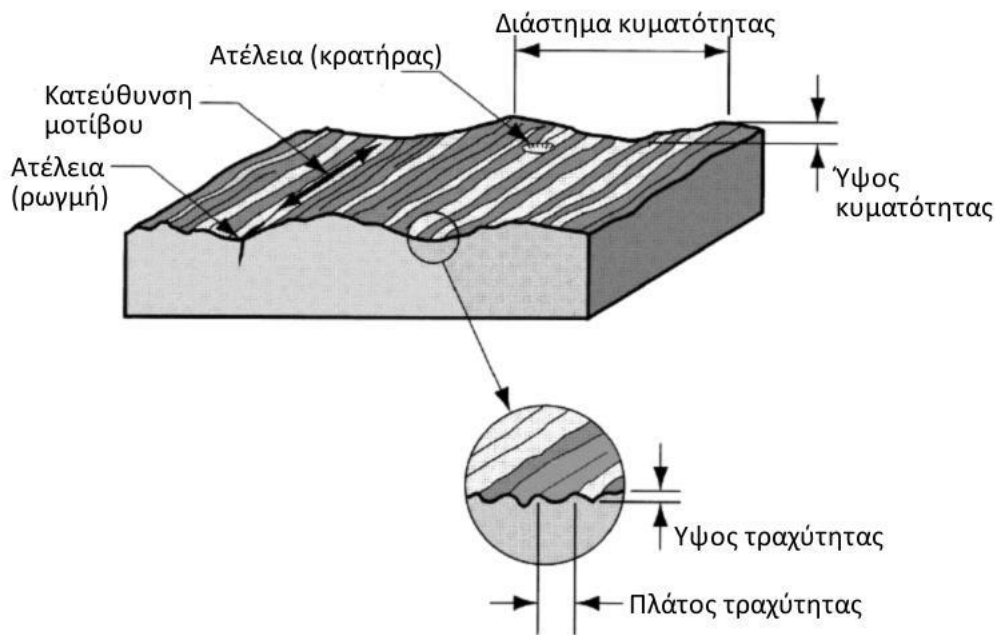
το χαρακτήρα πολυτέλειας ή καθαρότητας, ενώ οι πιο θαμπές (ματ) επιφάνειες αποπνέουν ένα αίσθημα παλαιότητας και μια εικόνα πιο κοντά στη φύση.

Η εξέταση της επιφάνειας ενός αντικειμένου με μικροσκόπιο μπορεί να αποκαλύψει διάφορα ελαττώματα, αλλά και συγκεκριμένα μοτίβα υφής. Η παρατηρούμενη υφή μπορεί να έχει κάποια κανονικότητα/περιοδικότητα, όπως όταν εμφανίζονται αυλακώσεις στην επεξεργασμένη επιφάνεια. Η ποιότητα της επιφάνειας είναι συνήθως αποτέλεσμα επιφανειακών επεξεργασιών όπως λείανση, σκλήρυνση ή οξείδωση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η σύνθεση ή η μικροδομή του επιφανειακού στρώματος είναι διαφορετική από τον όγκο του εξαρτήματος, όπως παρατηρείται στη λεπίδα ενός ξίφους (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Λεπίδα ξίφους - εμφανής διαφορά της περιοχής που έχει υποστεί σκλήρυνση (πιο ανοιχτό χρώμα) [92]

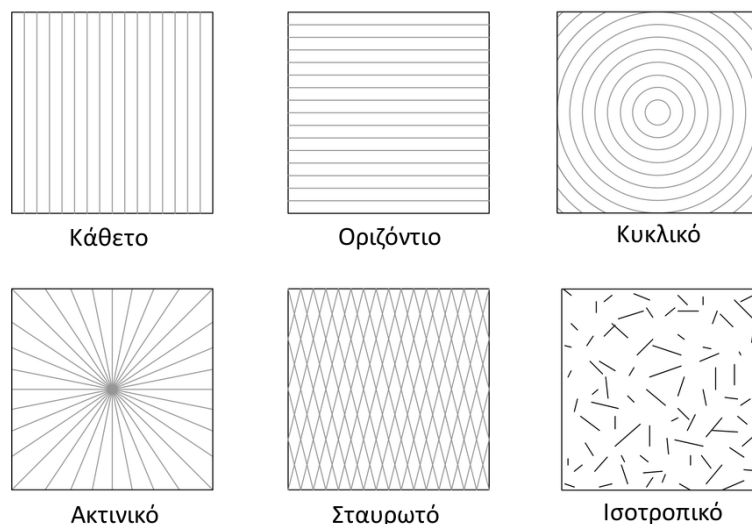
Με τον όρο «ποιότητα επιφάνειας» καθορίζεται συνολικά η ποιότητα μιας επιφάνειας και η αίσθηση που αποδίδει. Η ποιότητα μιας επιφάνειας μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέτρηση των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της, καθώς και των πιθανών αποκλίσεων που εμφανίζουν ότι έχει οριστεί κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του κομματιού/προϊόντος. Υπάρχουν τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά ποιότητας μιας επιφάνειας που συνήθως διαφέρουν από κατασκευαστική άποψη: η τραχύτητα, η κυμάτωση, το μοτίβο ή στρώση και οι ατέλειες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστικά υφής μιας επιφάνειας.

Ο όρος **τραχύτητα** (roughness) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει σχετικά μικρές και πολυάριθμες αποκλίσεις από την ονομαστική (ιδεατή) επιφάνεια. Η τραχύτητα οφείλεται στις ιδιότητες του υλικού και στις μεθόδους επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται αλλά και στις παραμέτρους της.

Με τον όρο **κυμάτωση** (waviness) χαρακτηρίζονται επιφάνειες που εμφανίζουν συνήθως κάποια περιοδικότητα, λόγω μεγάλων αποκλίσεων, και σχετίζονται συστηματικά με συγκεκριμένους παράγοντες, όπως δονήσεις και φορτία που προκαλούν εκτροπές/αποκλίσεις στο κομμάτι ή το εργαλείο αλλά και θερμική επεξεργασία.



Σχήμα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση διάφορων προτύπων επιφάνειας [92]

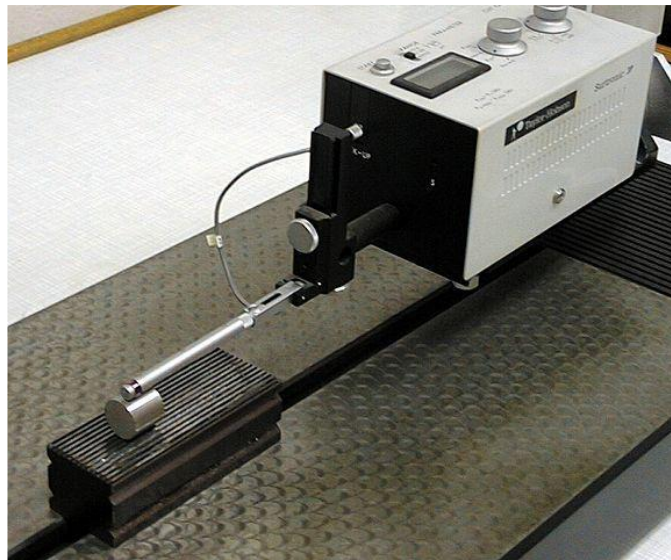
Ανάλογα με τη μέθοδο κατεργασίας ή κατασκευής και τις σχετικές παραμέτρους, διαφορετικά πρότυπα μπορεί να είναι ορατά στην επιφάνεια του κομματιού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

Το **μοτίβο** (lay) μιας επιφάνειας καθορίζεται κυρίως από την κατεύθυνση της επεξεργασίας του υλικού. Στις κατεργασίες κοπής με φρέζα το μοτίβο σχετίζεται συνήθως με την κατεύθυνση και το πρότυπο κίνησης του εργαλείου. Αντίστοιχα, σε μια τεχνική 3D εκτύπωσης, το μοτίβο σχετίζεται με το πρότυπο κίνησης της κεφαλής κατά τη διάρκεια της φόρτωσης του υλικού.

Τέλος, οι **ατέλειες** (flaws) είναι ελαττώματα/ανωμαλίες στην επιφάνεια που προκύπτουν περιστασιακά όπως ρωγμές, χαράγματα, ακαθαρσίες και άλλα. Η ποιότητα της επιφάνειας επηρεάζεται από τις ατέλειες, όπως και την ακεραιότητά της.

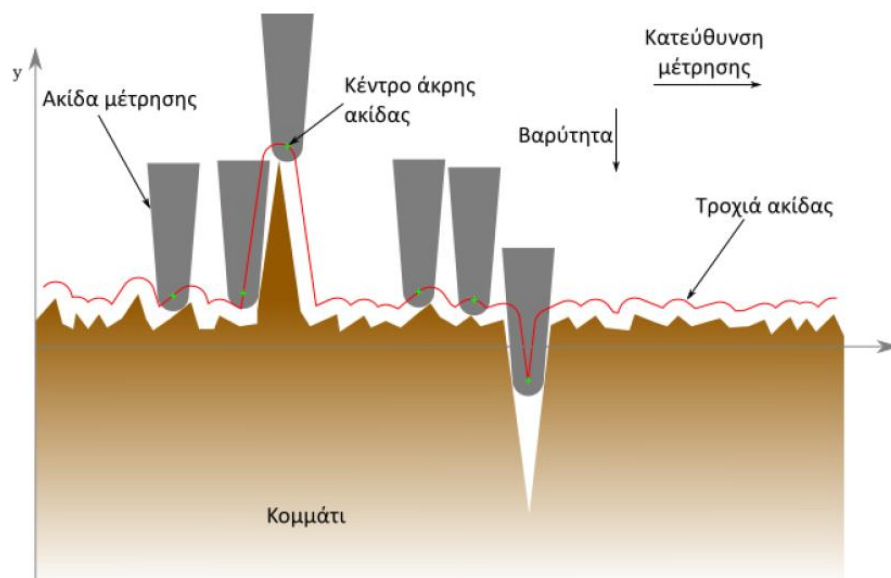
2.3.2 Μέτρηση χαρακτηριστικών επιφάνειας

Οι τεχνικές μέτρησης επαφής χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας. Το ηλεκτρονικό προφιλόμετρο ή τραχύμετρο (roughness profilometer) είναι το πιο συνηθισμένο εργαλείο μέτρησης της ποιότητας των επιφανειών (Σχήμα 2.10).



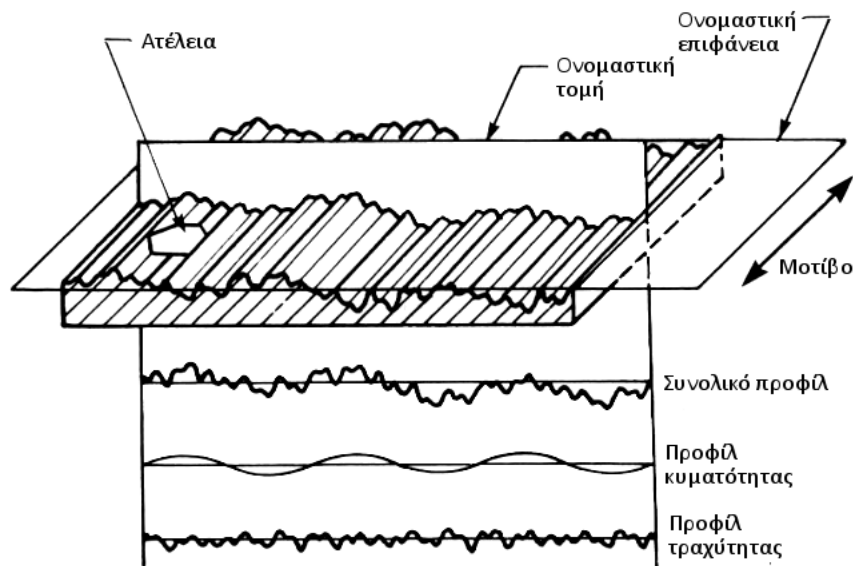
Σχήμα 2.10: Ηλεκτρονικό τραχύμετρο

Το τραχύμετρο διαθέτει μια ακίδα/βελόνα (stylus) που είναι κατασκευασμένη από διαμάντι και έχει συνήθως κωνικό σχήμα με ακτίνα περίπου, 0,005 mm στο άκρο της. Η συσκευή, ουσιαστικά, καταγράφει και μετρά τις κάθετες κινήσεις της βελόνας, καθώς αυτή περνά μέσα από μια επιφάνεια (Σχήμα 2.11).



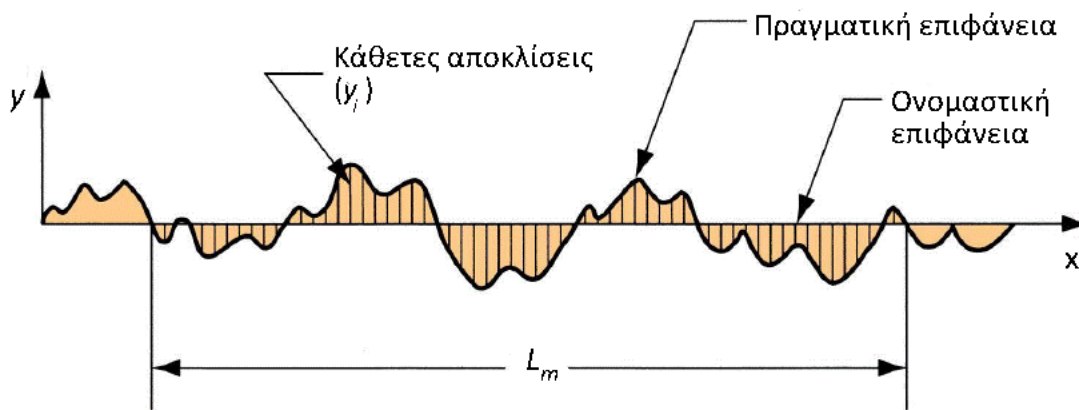
Σχήμα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση της πορείας της ακίδας ενός τραχύμετρου κατά τη μέτρηση μιας επιφάνειας ([Mechanical filtering of surface finish trace](#) by Emok).

Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η καταγραφή του συνολικού προφίλ της επιφάνειας, της γραμμής δηλαδή που προκύπτει κατά την τομή της επιφάνειας από το κάθετο επίπεδο που ορίζει η τροχιά της βελόνας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Το προφίλ αυτό, μπορεί στη συνέχεια να συγκριθεί με το ονομαστικό προφίλ αναφοράς (τομή του κάθετου επιπέδου με το ονομαστικό επίπεδο αναφοράς της επιφάνειας), που αντιπροσωπεύει την ιδεατή/επιθυμητή μορφή της επιφάνειας, και έτσι να καθοριστούν χαρακτηριστικά όπως η τραχύτητα και η κυμάτωση.



Σχήμα 2.12: Το συνολικό προφίλ μιας επιφάνειας όπως προκύπτει από την τομή της με το κάθετο επίπεδο [92]

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης της ποιότητας μιας επιφάνειας είναι από τη τραχύτητά της, η οποία είναι η μέση τιμή των σχετικά μικρών κάθετων αποκλίσεων από την ονομαστική/ιδεατή γραμμή της επιφάνειας για ένα συγκεκριμένο μήκος (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13: Οι μετρούμενες κάθετες αποκλίσεις (y) από την τιμή αναφοράς για μια επιφάνεια, κατά την κατεύθυνση της ακίδας (x).

Για τον υπολογισμό της ποιότητας μιας επιφάνειας χρησιμοποιούνται συνήθως οι απόλυτες τιμές των αποκλίσεων και προκύπτει το μέτρο της μέσης τραχύτητας (average roughness) από την παρακάτω σχέση:

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y(x)| dx \quad (2.13)$$

όπου:

R_a είναι η μέση τραχύτητα,

L_m είναι το μήκος του διαστήματος μέτρησης

$y(x)$ η κάθετη απόκλιση στο σημείο x του διαστήματος μέτρησης

Μια πιο απλή ίσως προσεγγιστική έκφρασης της τραχύτητας δίνεται από τον τύπο:

$$R_a = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i|}{n} \quad (2.14)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των σημείων στα οποία χωρίζεται το διάστημα μέτρησης και μετριέται η κάθετη απόκλιση, ενώ y_i είναι η κάθετη απόκλιση στο σημείο i του διαστήματος μέτρησης.

Πρακτικά, το μέγεθος των μετρούμενων αποκλίσεων (y) είναι συνήθως αρκετά μικρό (μικρότερο του 1 mm) και έτσι η μέση τραχύτητα εκφράζεται συνήθως σε μικρόμετρα ή αλλιώς σε μικρά ($\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$).

Ένας άλλος τρόπος για τον υπολογισμό των τιμών τραχύτητας είναι ο προσδιορισμός της ρίζας της μέσης τιμής των τετραγωνικών αποκλίσεων από την ονομαστική τιμή (root-mean-square). Οι τιμές τραχύτητας που υπολογίζονται με αυτήν τη μέθοδο είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερες από τις μέσες απόλυτες τιμές, καθώς οι μεγάλες σχετικά αποκλίσεις βαραίνουν αναλογικά περισσότερο στο τελικό αποτέλεσμα. Αν και η τραχύτητα είναι το πιο συνηθισμένο μέτρο για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας, δεν χαρακτηρίζει όμως, την συνολική ποιότητα της επιφάνειας.

Κύριο χαρακτηριστικό μιας επιφάνειας αποτελεί ο βαθμός εμφάνισης κυματώσεων σε αυτήν. Για τη μέτρηση του βαθμού κυμάτωσης, είναι σημαντικό να μη ληφθεί υπόψη η επίδραση που ασκεί η τραχύτητα και οι σχετικά μικρές αποκλίσεις, που σχετίζονται με αυτήν (Σχήμα 2.12). Αντίστοιχα, για τη μέτρηση της τραχύτητας είναι απαραίτητο να

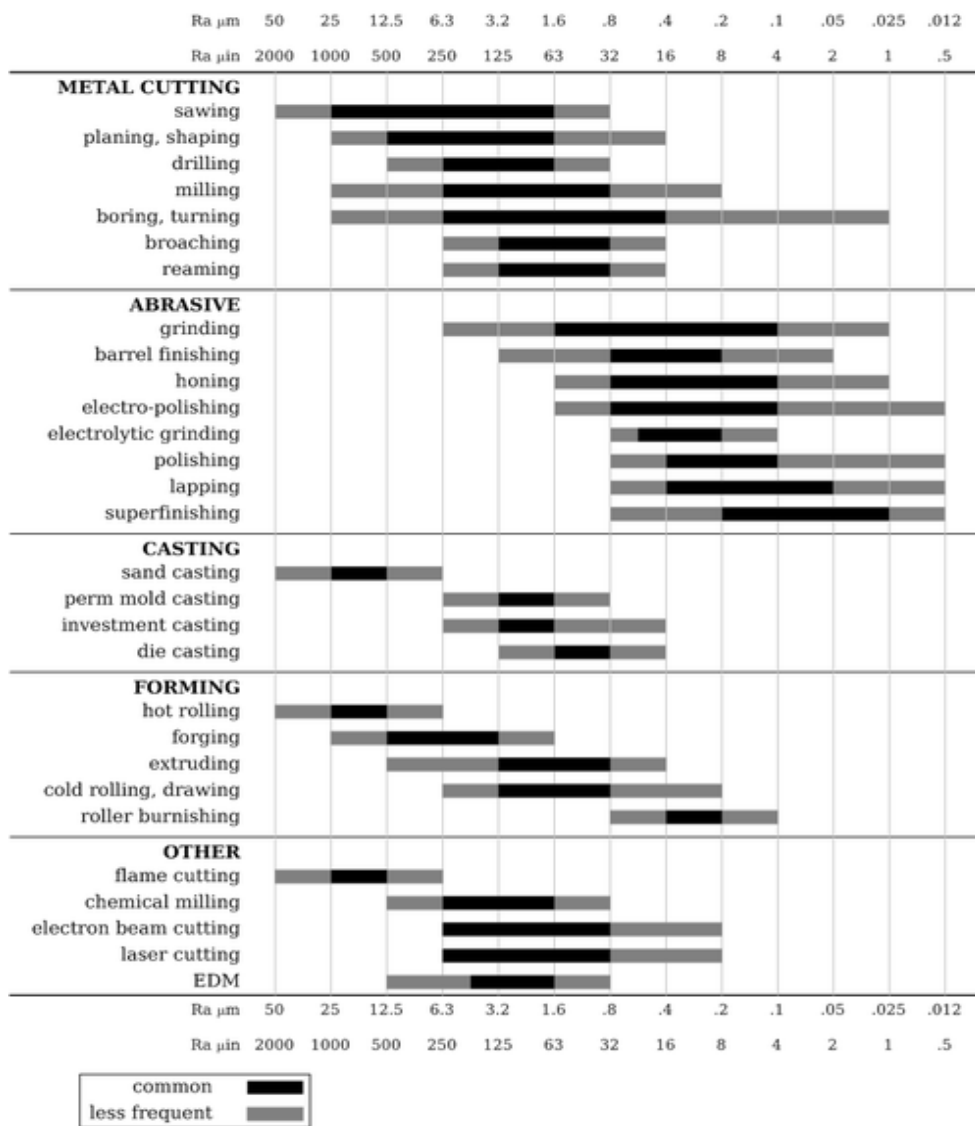
απαλειφθεί η επίδραση των μεγαλύτερων περιοδικών αποκλίσεων που σχετίζονται με την κυμάτωση. Η απομόνωση των αποκλίσεων που σχετίζονται μόνο με ένα από τα δύο μεγέθη γίνεται μέσω προσαρμογής του μήκους αποκοπής ή ολοκλήρωσης (cutoff length). Το μήκος αποκοπής είναι το διάστημα δειγματοληψίας για τη λήψη μιας μέτρησης, μέσω του οποίου φιλτράρονται τα αποτελέσματα ανάλογα με το μετρούμενο χαρακτηριστικό. Εάν η μέτρηση σχετίζεται με την τραχύτητα, το μήκος αποκοπής είναι σχετικά μικρό (τυπικές τιμές είναι μεταξύ 0,8 και 2,5 mm), έτσι ώστε να μην συνυπολογισθεί η κυμάτωση. Αντίθετα, στη μέτρηση της κυμάτωσης, το μήκος αποκοπής είναι μεγαλύτερο, το οποίο καθιστά δυνατή τη μέτρηση των κυματομορφών.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για τον υπολογισμό της τραχύτητας, είτε με επαφή είτε από απόσταση. Ένας παραδοσιακός τρόπος για να μετρηθεί η τραχύτητα μιας επιφάνειας είναι η σύγκριση της επιφάνειας με πρότυπες επιφάνειες γνωστής τραχύτητας, όπως αυτές των μπλοκ αναφοράς (surface comparator plates). Η σύγκριση βασίζεται στις ανθρώπινες αισθήσεις και μπορεί να είναι οπτική ή μέσω αφής, συγκρίνοντας την αίσθηση που αποκομίζει κάποιος διατρέχοντας τις δύο επιφάνειες (πρότυπη και εξεταζόμενη) με την αφή. Είναι προφανές ότι αυτή η μέθοδος έχει υποκειμενικό χαρακτήρα και χαμηλή ακρίβεια μέτρησης, ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά για την αξιολόγηση σε σύγκριση με το μέγεθος της τραχύτητας.

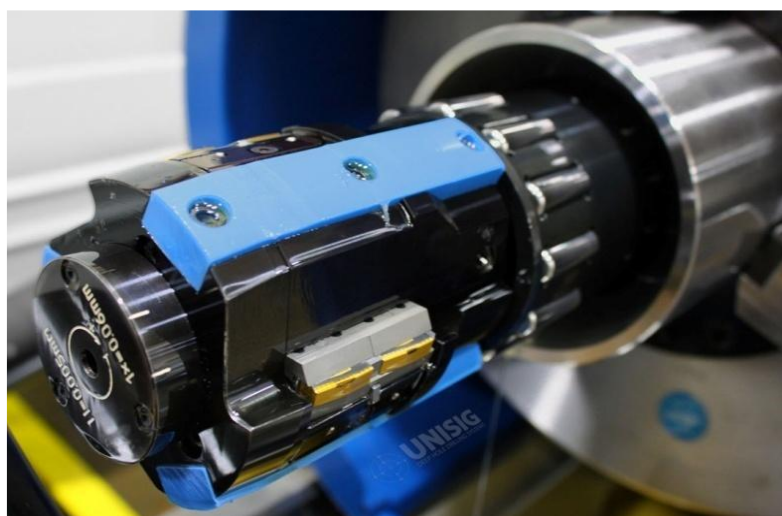
2.3.3 Τραχύτητα σε διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους

Όπως η ακρίβεια των διαστάσεων ισχύει ότι και η ποιότητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία κατασκευής. Το Σχήμα 2.14 δείχνει ορισμένες τυπικές ανοχές τραχύτητας επιφάνειας που μπορούν να επιτευχθούν με διάφορες μεθόδους κατασκευής, όπου η διαδικασία θεωρείται ότι εμπίπτει στον ορισμό της διαστατικής ακρίβειας.

Όπως είναι λογικό, οι τεχνικές λείανσης και επεξεργασίας επιφάνειας, όπως η μέθοδος της στίλβωσης με τροχό (roller burnishing) που φαίνεται στο Σχήμα 2.15, είναι οι τεχνικές για τη λήψη των χαμηλότερων τιμών τραχύτητας, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συχνά ως βοηθητικές μέθοδοι για τον καθαρισμό της επιφάνειας. Η επίτευξη πρωτογενούς τραχύτητας που πλησιάζει το κατώτερο όριο για κάθε μέθοδο απαιτεί γενικά υψηλότερο κόστος κατεργασίας [92].



Σχήμα 2.14: Τυπικά όρια τραχύτητας για διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους.



Σχήμα 2.15: Στίλβωση κυλίνδρων με τροχό για την επίτευξη εξαιρετικά λείας επιφάνειας [92].

Κεφάλαιο 3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Ενεργειακά μοντέλα μηχανουργικών κατεργασιών

Λόγω της σύνθετης συμπεριφοράς των εργαλειομηχανών, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν ακριβή μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας για την κατανόηση και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από μια μηχανουργική κατεργασία. Η ιστορία της σύγχρονης σκέψης στη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και ισχύος ξεκινά από το 1992 [93]. Στη συγκεκριμένη μελέτη εκτιμήθηκε η ισχύς εισόδου/εξόδου και η έμμεση ενέργεια ως συνάρτηση της δύναμης κοπής για μια διαδικασία λείανσης. Στις σύγχρονες εργαλειομηχανές αυτό αντιπροσωπεύει μόνο ένα κλάσμα της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά την εκτέλεση μιας μηχανουργικής κατεργασίας. Ακολούθησε ένας μεγάλος αριθμός μελετών που επικεντρώθηκε στην ενεργειακή μοντελοποίηση των διαδικασιών μηχανουργικής κατεργασίας ιδιαίτερα στην τελευταία δεκαετία [71]. Τα ενεργειακά μοντέλα, που αναφέρονται στην ενότητα αυτή, ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες με βάση την ενεργειακή τους έκφραση ως:

- Ενεργειακά μοντέλα εργαλειομηχανών
- Ενεργειακά μοντέλα κοπής
- Ενεργειακά μοντέλα με βάση την κατάσταση
- Ενεργειακά μοντέλα βασισμένα σε εξαρτήματα
- Ενεργειακά μοντέλα με βάση το Therblig

3.1.1 Ενεργειακά μοντέλα εργαλειομηχανών

Η ειδική ενέργεια για τη μηχανική κατεργασία ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την αφαίρεση μιας μονάδας όγκου υλικού. Η κατανάλωση ενέργειας των εργαλειομηχανών μπορεί να μετρηθεί σε επίπεδα κοπής, ατράκτου και εργαλειομηχανών [71]. Σε αυτήν την ενότητα εστιάζουμε στα συγκεκριμένα μοντέλα με βάση την ενέργεια σε επίπεδο εργαλειομηχανών. Τα ενεργειακά μοντέλα σε επίπεδα κατεργασίας και ατράκτου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η πρωτοποριακή μελέτη για την ενεργειακή ανάλυση εργαλειομηχανών παρουσιάστηκε από τους Gutowski et al. [135], η οποία ανέφερε ότι η κατανάλωση ενέργειας από τις εργαλειομηχανές δεν είναι σταθερή όπως υποτίθεται από τις περισσότερες από τις μελέτες ανάλυσης του κύκλου ζωής. Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσίασε την έννοια της σταθερής ενέργειας και της ενέργειας κοπής. Επίσης αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο για την πρόβλεψη του SEC (βλέπε παράρτημα) ως συνάρτηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού με βάση ένα ενεργειακό πλαίσιο.

Αυτήν τη μελέτη την ανέλαβαν άλλοι ερευνητές για την ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας για τις κατεργασίες τórνευσης και φραιζαρίσματος [71]. Η κατανάλωση ενέργειας από τον κινητήρα ατράκτου είναι υψηλή και αποτελεί μεγάλο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για μικρότερες εργαλειομηχανές. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα βελτιώθηκαν περαιτέρω λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ταχύτητας του άξονα στη συνολική κατανάλωση ενέργειας μηχανικής κατεργασίας [71]. Αργότερα, οι ερευνητές εξέτασαν τη συμβολή και άλλων στοιχείων ενέργειας, όπως την ισχύ της αντλίας ψυκτικού, τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης ενέργειας [94] και ανέπτυξαν γενικευμένα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας για διαφορετικές εργαλειομηχανές με ποικίλη απόδοση [95].

Τα μοντέλα, που αναφέρθηκαν παραπάνω, εκφράζουν το SEC ως συνάρτηση του MRR. Δηλώνουν επίσης ότι το SEC για μια διαδικασία κατεργασίας στο ίδιο MRR είναι το ίδιο

ανεξάρτητα από τις τιμές των παραμέτρων κοπής. Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων κοπής με ταυτόχρονη διατήρηση του ίδιου MRR θα έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικό SEC. Επομένως, η ενεργειακή μοντελοποίηση σε παραμετρικό επίπεδο είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης. Παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο SEC θεωρώντας την ταχύτητα κοπής, την τροφοδοσία και το βάθος κοπής ως ανεξάρτητες μεταβλητές, οδηγεί σε καλύτερη ακρίβεια αλλά χρειάζεται μεγάλο αριθμό πειραματικών δεδομένων. Έτσι, το MRR θα πρέπει να θεωρείται ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή για την πρόβλεψη της SEC για την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας με λιγότερα πειράματα. Έγιναν περαιτέρω προσπάθειες για να βελτιωθεί η ακρίβεια πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας αναπτύσσοντας μοντέλα που βασίζονται στις διαδικασίες μετατροπής ενέργειας, την ισχύ κοπής (cutting power) στην άκρη του εργαλείου [71]. Περισσότερα στοιχεία για τα συγκεκριμένα μοντέλα με βάση την ενέργεια σε επίπεδο εργαλειομηχανών παρέχεται στον Πίνακα 3.1.

| Μελέτη | Ενεργειακό Μοντέλο | Κατεργασία | Παρατηρήσεις |
|------------------------|---|-------------|---|
| Gutowski et al. (2016) | $P = P_0 + k v$ k σταθερό (kJ/cm ³) | - | Ο προσδιορισμός των συντελεστών P_0 και k είναι δύσκολος. Οι μονάδες των P , P_0 και k είναι kJ, kJ και cm ³ /sec, αντίστοιχα. |
| Li and Kara (2011) | $SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR}$ C_0 και C_1 είναι οι συντελεστές του μοντέλου | Τόρνευση | Είναι ένα ειδικό εμπειρικό μοντέλο εργαλειομηχανών. Οι μονάδες για το SEC και MRR είναι kJ/cm ³ και cm ³ /sec, αντίστοιχα. |
| Li et al. (2013) | $SEC = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + k_2 \frac{1}{MRR}$ k_0 , k_1 , k_2 είναι συντελεστές μοντέλου | Φραιζάρισμα | Εξετάστηκε η διακύμανση της ενέργειας της ατράκτου λόγω αλλαγής στην ταχύτητα κοπής. Οι μονάδες SEC, MRR και n είναι J/mm ³ , mm ³ /sec περιστροφή/sec, αντίστοιχα. |
| Zhao et al. (2016) | $SEC = k_0 + k_1 \frac{1}{MRR} + k_2 \frac{n}{MRR}$ k_0 , k_1 , k_2 είναι συντελεστές μοντέλου και n η ταχύτητα ατράκτου | Τόρνευση | Το μοντέλο Li επεκτάθηκε λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ του άξονα χωρίς φορτίο και την ισχύ της αντλίας ψυκτικού μαζί με την ισχύ αναμονής και κοπής. Οι μονάδες SEC, MRR και n είναι J/mm ³ , mm ³ /sec rev/sec, αντίστοιχα. |

| | | | |
|-----------------------|---|-------------|--|
| Li and Yuan (2013) | $SEC = C_0 \cdot P_{sp} + C_1 \frac{1}{MRR} + C_2 \frac{P_{sp}}{MRR} + C_3$ <p>C_0, C_1, C_2, C_3 είναι σταθερές</p> $P = a \cdot MRR^2 + b \cdot MRR + c$ <p>a, b, c είναι σταθερές για μια συγκεκριμένη εργαλειομηχανή και κοπτικό εργαλείο</p> $SEC = \frac{P}{MRR} = a \cdot MRR + b + \frac{c}{MRR}$ | Φραιζάρισμα | Γενικευμένο μοντέλο για εξαιρετικά αυτοματοποιημένες εργαλειομηχανές. Οι μονάδες SEC, P_{sp} και MRR είναι kJ/cm ³ , kW και cm ³ /sec, αντίστοιχα. Για συγκεκριμένες εργαλειομηχανές. |
| Guo et al. (2012) | $SEC = C_0 v_c^a f^\beta a_p^\gamma D^\Phi + \frac{C_1}{v_c f a_p}$ <p>$C_0, C_1, a, \beta, \gamma, \Phi$ είναι συντελεστές μοντέλου που λαμβάνονται με τη μέθοδο προσαρμογής της καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων</p> | Τόρνευση | Παράμετροι βασισμένοι στην μοντελοποίηση ενέργειας για σταθερή ειδική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας κατεργασιών. Οι μονάδες SEC, v_c , f , a_p και D είναι J/mm ³ , m/min, mm/rev, mm, και mm, αντίστοιχα. |
| Zhong et al. (2016) | $SEC = \frac{P_{fixed}}{MRR} + \frac{kn+b}{MRR} + \frac{\lambda v_c^a f^\beta a_p^\gamma}{MRR}$ <p>$\lambda, a, \beta, \gamma$, είναι συντελεστές που σχετίζονται με εργαλειομηχανές, υλικά τεμαχίου εργασίας, κοπτικά εργαλεία κλπ</p> | Τόρνευση | Η ενέργεια κοπής μοντελοποιήθηκε με βάση λεπτομερής παραμέτρους. Οι μονάδες P_{fixed} , MRR, n , v_c , f , και a_p είναι W, mm ³ /sec, rev/min, m/min, mm/min και mm, αντίστοιχα. |
| Liu et al. (2015) | $SEC = \frac{C_0}{MRR} + C_1 \frac{P_{cutting}}{MRR}$ | Φραιζάρισμα | Εξηγείται η διακύμανση της κατανάλωσης ισχύος με τις παραμέτρους κοπής υπό σταθερές συνθήκες MRR. Οι μονάδες SEC, MRR και ισχύος είναι J/mm ³ , mm ³ /sec και W, αντίστοιχα. |
| Velchev et al. (2014) | $SEC = \frac{P_u}{MRR} + B_0 (MRR)^{B_1}$ <p>B_0 και B_1 είναι συγκεκριμένοι συντελεστές μηχανής ανάλογα με τον συνδυασμό τεμαχίου εργασίας και κοπτικού εργαλείου</p> | Τόρνευση | Συμπεριλαμβάνεται κατανάλωση ενέργειας για εγκατάσταση, κοπή, αλλαγή εργαλείου για κατεργασία τόρνευσης με ένα πέρασμα. Οι μονάδες SEC, P_u και MRR είναι kW/cm ³ , kW cm ³ /min, αντίστοιχα. |
| Zhou et al. (2017) | $SEC = C_1 n^{C_2} + C_3 \frac{n}{MRR} + \frac{C_4}{MRR}$ | Φραιζάρισμα | Τα μοντέλα Gutowski και Li επεκτάθηκαν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην κατανάλωση ισχύος για την κατεργασία |

| | | | |
|----------------------|---|----------|---|
| | | | φραιζαρίσματος. Οι μονάδες SEC, η και MRR είναι J/mm ³ , rev/min και mm ³ /sec, αντίστοιχα. |
| J. Xie et al. (2016) | $SEC = \frac{60 * \int (P_u(t) + P_{ad}(t) + P_c(t)) dt}{\int (v_c(t) + f(t) + a_p(t)) dt}$ $P_u(t) = \{P_u(n_1), P_u(n_2), \dots, P_u(n_n)\}$ $P_c(t) = F_c(t) * \frac{v_c(t)}{60}$ $P_{ad} = \alpha_1 P_c(t) + \alpha_2 P_c^2(t)$ | Τόρνευση | Ολοκληρωμένο μοντέλο για SEC λαμβάνοντας υπόψη λεπτομερείς παραμέτρους διαδικασίας. Οι μονάδες ισχύος, v _c , f και a _p είναι W, rev/min, mm/rev και mm, αντίστοιχα. |

Πίνακας 3.1: Εξέλιξη συγκεκριμένων μοντέλων βασισμένων στην ενέργεια σε επίπεδο εργαλειομηχανών

Παρατηρείται ότι μοντέλα βασισμένα στη φυσική έχουν προταθεί ευρέως στη βιβλιογραφία για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κατανάλωσης ενέργειας των εργαλειομηχανών. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό φυσικών μεταβλητών, οι οποίες είναι δύσκολο να προβλεφθούν. Επιπλέον, αυτά τα μοντέλα έχουν περιορισμένη αξιοπιστία όταν οι εργαλειομηχανές και οι συνθήκες λειτουργίας είναι αβέβαιες. Επομένως, υπολογιστικές τεχνικές όπως ANN, SVM, NN (βλέπε παράρτημα) καθώς και οι μη παραμετρικές προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας από τις εργαλειομηχανές.

3.1.2 Ενεργειακά μοντέλα κοπής

Τα ενεργειακά μοντέλα που συζητιούνται στην Ενότητα 3.1.1 επικεντρώνονται στο SEC σε επίπεδο εργαλειομηχανών και δεν ασχολούνται απευθείας με την ενέργεια αφαίρεσης υλικού σε επίπεδο διεργασίας. Η ενέργεια κοπής σε επίπεδο διεργασίας αντιπροσωπεύει γενικά λιγότερο από το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναλυθεί η ενέργεια κοπής καθώς αφορά το σχηματισμό τσιπ και τη δημιουργία νέας επιφάνειας. Επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του κατεργασμένου τεμαχίου. Ως εκ τούτου, ένας μεγάλος αριθμός μελετών επικεντρώθηκε στη μοντελοποίηση της ενέργειας κοπής σε επίπεδο κατεργασίας με βάση διάφορα ενεργειακά χαρακτηριστικά. Τα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας κοπής ταξινομούνται με βάση τα χαρακτηριστικά τους:

- Μοντέλα βασισμένα στη δύναμη κοπής
 - I. Αναλυτική
 - II. Αριθμητική
 - III. Πειραματική
- Μοντέλα βασισμένα στη θεωρία παραμόρφωσης μετάλλων
- Μοντέλα βασισμένα σε λεπτομερείς παραμέτρους
- Μοντέλα βασισμένα στη φθορά εργαλείων
- Μοντέλα που βασίζονται στη μεταβλητή MRR
- Μοντέλο που βασίζεται στην ισχύ εισροής άξονα
- Μοντέλα βασισμένα σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης

3.1.3 Μοντέλα με βάση την κατάσταση

Για να εκτελέσουν μια διαδικασία κατεργασίας οι εργαλειομηχανές περνάνε σταδιακά από μια σειρά διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας. Οι ερευνητές έχουν εργαστεί στη

μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε μία ή περισσότερες καταστάσεις λειτουργίας των εργαλειομηχανών. Το ISO 14955-1 [96] ορίζει την κατάσταση λειτουργίας εργαλειομηχανών μέσα από συνδυασμούς τρόπων λειτουργίας εξαρτημάτων εργαλειομηχανών. Τα εξαρτήματα μπορούν να υπάρχουν σε τρεις μορφές -on, off ή hold- σε κάθε κατάσταση λειτουργίας. Η κατανάλωση ενέργειας κατεργασίας μπορεί να ληφθεί από το άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια κάθε κατάστασης λειτουργίας.

Το Cooperative Effort in Process Emission (CO₂PE!) εξετάζει δύο καταστάσεις λειτουργίας: τη βασική κατάσταση και την κατάσταση κοπής. Η βασική κατάσταση ή η κατάσταση αναμονής ορίζεται ως η κατάσταση λειτουργίας όπου η εργαλειομηχανή είναι ενεργοποιημένη αλλά το σύστημα ελέγχου, το σύστημα ατράκτου, οι σερβοκινητήρες, το σύστημα ψύξης, κ.λπ. είναι σε αναμονή. Η ισχύς αναμονής υπάρχει σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας μιας μηχανουργικής κατεργασίας και επομένως η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλή. Η ισχύς που αντλείται από τις εργαλειομηχανές κατά την κατάσταση αναμονής είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους μηχανουργικής κατεργασίας και γενικά μετρίεται πειραματικά. Έχει παρατηρηθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας σε αναμονή ποικίλλει σημαντικά για διαφορετικές εργαλειομηχανές με βάση το μέγεθος, την πολυπλοκότητα και το βαθμό αυτοματοποίησής τους. Η κατάσταση κοπής μιας εργαλειομηχανής ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία όλα τα βοηθητικά εξαρτήματα είναι ενεργά και το υλικό αφαιρείται. Η ισχύς που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια αυτής της κατάστασης αποτελείται από την ισχύ που καταναλώνεται από τη βασική κατάσταση, τα βοηθητικά εξαρτήματα και την αφαίρεση υλικού με τη διαδικασία διάτμησης και τις απώλειες με τη μορφή τριβής και θερμότητας. Η ενέργεια αφαίρεσης υλικού έχει μια μη γραμμική σχέση με τις παραμέτρους κοπής. Οι Balogun και Mativenga εισήγαγαν μια τρίτη κατάσταση λειτουργίας: την κατάσταση ετοιμότητας για τη μηχανή, η οποία είναι η μεταβατική κατάσταση μεταξύ της βασικής και της κατάστασης κοπής. Η μεταβατική κατάσταση καταναλώνει πρόσθετη ενέργεια για την περιστροφή της ατράκτου και την κίνηση του άξονα. Με την πρόοδο στην ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας της μηχανικής κατεργασίας, εισήχθησαν και μοντελοποιήθηκαν καταστάσεις, όπως εκκίνηση (start-up), κοπή αέρα, επιτάχυνση/επιβράδυνση άξονα, αλλαγή εργαλείου κοπής, πρόσθετη απώλεια, έμμεση κατανάλωση ενέργειας, κ.λπ., για τη βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης [97].

3.1.4 Μοντέλα βασισμένα σε εξαρτήματα

Τα εξαρτήματα εργαλειομηχανής ορίζονται ως οι μηχανικές, ηλεκτρικές, υδραυλικές ή πνευματικές συσκευές μιας εργαλειομηχανής ή ο συνδυασμός τους όπως οι μονάδες ψύξης, μονάδες ατράκτου, άξονες μετάδοσης κίνησης, ελεγκτές, κ.λπ. Θεωρούνται ως οι βασικές μονάδες κατανάλωσης ενέργειας μιας εργαλειομηχανής.

Η ενεργειακή μοντελοποίηση σε επίπεδο εξαρτημάτων παρέχει μεγαλύτερη διαφάνεια. Πολλές μελέτες παρέχουν αναλυτικά ή πειραματικά ενεργειακά μοντέλα για διαφορετικά εξαρτήματα εργαλειομηχανών. Αυτά τα ενεργειακά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της συνολικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία της μηχανικής κατεργασίας. Αναλυτικά μοντέλα για τα συστήματα τροφοδοσίας ατράκτου και αξόνων δημοσιεύτηκαν κατά την περίοδο 2011-2013. Αυτά τα μοντέλα περιλάμβαναν μεγάλο αριθμό συντελεστών, οι οποίοι ήταν δύσκολο να ληφθούν. Μια μελέτη υπολόγισε την ενέργεια που καταναλώνεται από την αντλία ψυκτικού, το ATC (Automatic Tool Changer) και τη σταθερή ενέργεια, με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές τους [98]. Μετά το 2014, μελετήθηκε η κατανάλωση ενέργειας από άλλα εξαρτήματα εργαλειομηχανών όπως αλλαγή εργαλείου, περιστροφή άξονα χωρίς φορτίο, κίνηση τροφοδοσίας, κοπή, παροχή

υγρού κοπής, μεταφορέα τσιπ, κ.λπ. και ελήφθησαν πειραματικά μοντέλα για την κατανάλωση ενέργειας από αυτά τα εξαρτήματα. Αρχικά, η ισχύς τροφοδοσίας του άξονα και των αξόνων μοντελοποιήθηκαν ως γραμμικές συναρτήσεις της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου και του ρυθμού τροφοδοσίας, αντίστοιχα. Μέσα από παραπέρα έρευνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά ισχύος των κινητήρων τροφοδοσίας αξόνων, μοντελοποιήθηκε η κατανάλωση ισχύος από αυτούς τους κινητήρες μέσα από τμηματικές γραμμικές ή πολυωνυμικές συναρτήσεις. Η σταθερή κατανάλωση ενέργειας μιας εργαλειομηχανής θεωρείται γενικά σταθερή. Ωστόσο, οι σύγχρονες εργαλειομηχανές CNC διαθέτουν κεντρικό σύστημα λίπανσης με περιοδικά μεταβαλλόμενη κατάσταση λειτουργίας με βάση την πίεση και τη θερμοκρασία λαδιού. Οι Zhou et al. μοντελοποίησαν τη σταθερή κατανάλωση ενέργειας ως τμηματική συνάρτηση με βάση την ενεργοποίηση του συστήματος λίπανσης [99].

3.1.5 Ενεργειακά μοντέλα με βάση το Therblig

Μια άλλη προσέγγιση μοντελοποίησης κατανάλωσης ενέργειας βασίζεται στις μικροκινήσεις στην εργαλειομηχανή. Αυτές οι μικροκινήσεις είναι 18 που περιγράφουν η κάθε μία από αυτές, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Οι εργασίες κατεργασίας ολοκληρώνονται με την εκτέλεση μιας σειράς κινήσεων εργαλειομηχανών που καταναλώνουν ενέργεια και τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των εργαλειομηχανών CNC μπορούν να προσδιοριστούν με βάση τον έλεγχο της κίνησης τους. Η ενεργειακή μοντελοποίηση με βάση το Therblig έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την ενεργειακή ανάλυση των θεμελιωδών κινήσεων των εργαλειομηχανών. Το Therblig θεωρείται βασική μονάδα ενεργειακής ζήτησης. Η μοντελοποίηση ενεργειακής ζήτησης με βάση το Therblig, χωρίζει τις διαδικασίες κατεργασίας σε μια σειρά από δραστηριότητες και τις δραστηριότητες σε Therbligs, και τα Therbligs συνδέονται με την κατάσταση μηχανικής κατεργασίας. Οι Lv et al. [100] παρείχαν μοντέλα για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας από διαφορετικά Therbligs. Οι Jia et al. [101] παρείχαν μια μεθοδολογία για τη διαίρεση μιας διαδικασίας μηχανικής κατεργασίας σε δραστηριότητες χρησιμοποιώντας πληροφορίες ενεργοποίησης Therblig. Οι Jia et al. [102] επέκτειναν τη μελέτη για να προβλέψουν την ενέργεια χωρίς προστιθέμενη αξία με βάση τα μοντέλα ισχύος που βασίζονται στο Therblig. Οι Jia et al. [103] πρότειναν, για πρώτη φορά, τη μέθοδο Therblig embedded Value Stream Mapping (TVSM) για τη χαρτογράφηση της κατανάλωσης ενέργειας από τη διαδικασία μηχανικής κατεργασίας σε μικροεπίπεδο. Η προτεινόμενη προσέγγιση παρέχει καλύτερη ενεργειακή διαφάνεια και δείχνει ξεκάθαρα τη σπατάλη ενέργειας κατά τη μηχανική κατεργασία. Οι παραπάνω εργασίες επικύρωσαν τα προτεινόμενα μοντέλα για τις διεργασίες τόννευσης.

3.2. Ενεργειακή μοντελοποίηση για τη διαδικασία μιας μηχανουργικής κατεργασίας

Μια εργαλειομηχανή στη μηχανική κατεργασία ενός δεδομένου προϊόντος υφίσταται πολλές διαφορετικές καταστάσεις, π.χ. εκκίνηση εργαλειομηχανής, λειτουργία αναμονής, λειτουργία σύσφιξης και τοποθέτησης, κοπή αέρα, υλικά κοπής και απενεργοποίηση μηχανής [70]. Επιπλέον, ένα κατεργαζόμενο κομμάτι υπόκειται σε επεξεργασία με πολυάριθμα περάσματα κοπής. Οπότε υπήρξε ανάγκη να αναπτυχθεί ένα μοντέλο υψηλής πιστότητας για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας για μια μηχανουργική κατεργασία πρακτικού εξαρτήματος.

3.2.1 Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται σε διαφορετικά στάδια επεξεργασίας

Οι Mori et al. ανέπτυξαν ένα μοντέλο που εξετάζει την κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση κοπής και μη κοπής, συμπεριλαμβανομένης της τοποθέτησης και της επιτάχυνσης του άξονα μετά από αλλαγή εργαλείου, αφαίρεση υλικού, επιστροφή του άξονα στη θέση ανταλλαγής εργαλείου μετά την κατεργασία και επιβράδυνση του άξονα [70].

$$E_{total} = P_1 \times (T_1 + T_2) + P_2 \times T_2 + P_3 \times T_3 \quad (3.1)$$

όπου:

P_1 είναι η μέση κατανάλωση ισχύος κατά τη λειτουργία της εργαλειομηχανής ανεξάρτητα από την κατάσταση λειτουργίας,

T_1 είναι ο χρόνος κύκλου κατά την κατάσταση μη κοπής,

P_2 είναι η κατανάλωση ισχύος για κοπή από τον άξονα και τους σερβοκινητήρες και ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες κοπής,

T_2 είναι ο χρόνος κύκλου κατά την κατάσταση κοπής,

P_3 είναι η κατανάλωση ενέργειας για την τοποθέτηση του πάγκου εργασίας και για την επιτάχυνση/ επιβράδυνση του άξονα στην καθορισμένη ταχύτητα και τέλος

T_3 είναι ο χρόνος που απαιτείται για την τοποθέτηση του πάγκου εργασίας και για την επιτάχυνση/ επιβράδυνση του άξονα.

Με σκοπό την εξέταση επιδόσεων επιτάχυνσης/ επιβράδυνσης, αναπτύχθηκε μια μέθοδος πρόβλεψης για την κατανάλωση ενέργειας των εργαλειομηχανών [104]

$$E_{total} = E_{const} + E_{run-time-transient} + E_{run-time-steady} + E_{cut} \quad (3.2)$$

όπου E_{const} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τις λειτουργίες που δεν σχετίζονται άμεσα με τη μηχανική κατεργασία.

Η ενέργεια που καταναλώνεται από την άτρακτο, τους άξονες τροφοδοσίας και τον βραχίονα αλλαγής εργαλείου της εργαλειομηχανής χωρίζεται σε δύο μέρη ανάλογα με τη σταθερή και μεταβατική κατάσταση, δηλαδή μεταβατικό χρόνο $E_{run-time-transient}$ και σταθερό χρόνο $E_{run-time-steady}$ αντίστοιχα. Το E_{cut} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από την αφαίρεση υλικού της εργαλειομηχανής. Το μηχάνημα καταναλώνει περισσότερη ισχύ κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση από ότι στη σταθερή κατάσταση, επομένως το $E_{run-time-transient}$ δεν πρέπει να αγνοηθεί. Οι δοκιμές επαλήθευσης έδειξαν ότι τα σχήματα δημιουργίας διαδρομής εργαλείου επηρέασαν την ενέργεια και τον χρόνο επεξεργασίας που απαιτείται για τη μηχανή του ίδιου εξαρτήματος.

Οι Balogun και Mativenga ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης για την κατανάλωση ενέργειας εργαλειομηχανών λαμβάνοντας υπόψη τρεις καταστάσεις της εργαλειομηχανής, δηλαδή τη βασική κατάσταση, την κατάσταση ετοιμότητας και την κατάσταση κοπής [97]:

$$E_{total} = p_b t_b + (p_b + p_r) t_r + p_{air} t + (p_b + p_r + p_{cool} + kv) t_c \quad (3.3)$$

όπου:

E_{total} είναι η συνολική ενεργειακή απαίτηση

p_b είναι η βασική ισχύς

p_r είναι η ισχύς σε ετοιμότητα κατάστασης

p_{cool} είναι η ισχύς της αντλίας ψυκτικού υγρού

t_b είναι ο βασικός χρόνος

t_r είναι ο χρόνος

k σε kJ/cm^3 , είναι η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής που σχετίζεται στενά με τη δυνατότητα κατεργασίας του τεμαχίου προς κατεργασία

v σε cm^3/s , είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού

t_c είναι ο χρόνος κοπής

P_{air} είναι οι μέσες απαιτήσεις ισχύος για μη κοπτικές και ανασυρόμενες κινήσεις πάνω από το τεμάχιο εργασίας και

t_{air} είναι ο συνολικός χρόνος κατά τη διάρκεια αυτών των μη κοπτικών κινήσεων.

Κατά τη λειτουργία μη κοπής, το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ισχύος προκύπτει από την εκκίνηση του μηχανήματος (45%), την ισχύ του άξονα (15%), τη θέση του σερβομηχανισμού (10%), τις υδραυλικές αντλίες (8,9%) και τις αντλίες ψυκτικού υγρού (8,2%). Προφανώς, ο χρόνος μη κοπής θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατό συντομότερα, προκειμένου να βελτιωθεί η χρήση εργαλειομηχανών και η ενεργειακή απόδοση.

3.2.2 Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται σε εξαρτήματα εργαλειομηχανών

Η πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας με βάση τα εξαρτήματα εργαλειομηχανών είναι μια άλλη μέθοδος υπό δεδομένες συνθήκες κοπής. Οι He et al. ανέπτυξαν μια μέθοδο για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας στη μηχανουργική κατεργασία [98]

$$E_{total} = \int_{t_{ms}}^{t_{me}} p_m dt + \int_{t_{cs}}^{t_{ce}} p_c dt + \sum_{i=1}^m \int_{t_{fs}}^{t_{fe}} p_i dt + p_{tool} t_{tool} + p_{cool} (t_{coe} - t_{cos}) + (p_{servo} - p_{fan})(t_e - t_s) \quad (3.4)$$

όπου:

E_{total} είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας για ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου (NC)

p_m είναι η ισχύς που επιτρέπει την κατάσταση λειτουργίας της μονάδας μετάδοσης ατράκτου

t_{ms} είναι η ώρα έναρξης της ατράκτου

t_{me} είναι η ώρα λήξης του ατράκτου

p_c είναι η ισχύς αφαίρεσης υλικού

t_{cs} είναι ο χρόνος έναρξης κοπής

t_{ce} είναι ο χρόνος λήξης κοπής

p_i είναι η ισχύς του κινητήρα τροφοδοσίας του άξονα i

t_{fs} είναι ο χρόνος εκκίνησης του κινητήρα τροφοδοσίας του i_{th} άξονα

t_{fe} είναι ο χρόνος λήξης του κινητήρα τροφοδοσίας του i_{th} άξονα

p_{tool} είναι η ισχύς του κινητήρα αλλαγής εργαλείου

t_{tool} είναι ο χρόνος περιστροφής του πυργίσκου (turret)

p_{cool} είναι η ισχύς του κινητήρα της αντλίας ψυκτικού

$(t_{coe} - t_{cos})$ είναι ο χρόνος λειτουργίας του κινητήρα της αντλίας ψυκτικού

p_{servo} είναι η ισχύς του συστήματος σερβομηχανισμού

p_{fan} είναι η ισχύς των κινητήρων του ανεμιστήρα

$(t_e - t_s)$ είναι ο χρόνος λειτουργίας της εργαλειομηχανής σε όλη τη διαδικασία κατεργασίας.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση των κωδικών NC για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Οι Lv et al. πρότειναν ένα άλλο μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας [100]

$$P_{total} = P_{SO} + P_{CFS} + P_{CC} + P_L + P_{spindle} + (P_x + P_y + P_z) + P_{TS} + P_{TC} + P_{cut} \quad (3.5)$$

όπου τα P_{SO} , P_{CFS} , P_{CC} , και P_L αντιπροσωπεύουν τη βασική ισχύ της μονάδας, την ισχύ ψύξης, την ισχύ αυτόματης αφαίρεσης τσιπ και την ισχύ φωτισμού, αντίστοιχα. Τα $P_{spindle}$, P_x , P_y και P_z αντιπροσωπεύουν την ισχύ του άξονα τροφοδοσίας, άξονα x,y και z αντίστοιχα. Τα P_{TS} , P_{TC} και P_{cut} αντιπροσωπεύουν την ισχύ για την επιλογή εργαλείου, την αλλαγή εργαλείου και τα υλικά κοπής αντίστοιχα.

Τα πειράματα φραιζαρίσματος έδειξαν ότι το μέγιστο σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης και της μετρούμενης κατανάλωσης ισχύος της μονάδας διεργασίας ήταν 6,6% χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.5.

Τα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας που βασίζονται στην κατάσταση των εργαλειομηχανών παρέχουν μια προσέγγιση για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας για την κατεργασία ενός εξαρτήματος. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών κατανάλωσης ενέργειας των εξαρτημάτων εργαλειομηχανών είναι το κλειδί για τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης.

3.3 Ενεργειακή μοντελοποίηση κατά την κοπή

Οι προβλέψεις κατανάλωσης ενέργειας βοηθούν τους χειριστές να προσδιορίσουν τις πιο αποδοτικές παραμέτρους διαδικασίας για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να προβλεφθεί σύμφωνα με τη συγκεκριμένη κατανάλωση ενέργειας, τις παραμέτρους επεξεργασίας, την ισχύ κοπής, το στάδιο επεξεργασίας ή τα εξαρτήματα εργαλειομηχανών. Αυτή η ενότητα περιγράφει τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ισχύος κατά την κοπή σε επίπεδο κατεργασίας, ατράκτου και εργαλειομηχανής.

3.3.1 Καθαρή κοπή ειδικής ενέργειας

Σε επίπεδο κατεργασίας, η ειδική ενέργεια ορίζεται ως καθαρή ειδική ενέργεια κοπής και λαμβάνει υπόψη μόνο την ενέργεια που καταναλώνεται από την πραγματική αφαίρεση υλικού. Η καθαρή ενέργεια κοπής καθορίζει το σχηματισμό τσιπ και το φινίρισμα της επιφάνειας και επηρεάζεται από τις συνθήκες διεργασίας και τις ιδιότητες του υλικού εργασίας. Η καθαρή ενέργεια κοπής θεωρήθηκε σταθερή σε ορισμένα μοντέλα. Για παράδειγμα, η Εξίσωση 3.6, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της καθαρής κατανάλωσης ενέργειας κοπής E_{nc} στην κοπή ανοξείδωτου χάλυβα T316L [70]:

$$E_{nc} = k_0 MRR t_{cutting} \quad (3.6)$$

όπου:

MRR ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού σε cm^3/min

k_0 η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής σε kJ/cm^3

$t_{cutting}$ ο χρόνος κοπής σε λεπτά.

Η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής για την άλεση ανοξειδωτού χάλυβα με φρέσκο εργαλείο ήταν $4,72 \text{ J/mm}^3$. Στη συγκεκριμένη εργασία παρατηρήθηκε ότι η καθαρή ενέργεια κοπής επηρεάστηκε σημαντικά από τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο για να προβλέψει την καθαρή ειδική ενέργεια κοπής χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους κοπής [70]

$$U_{nc} = k a_e a_p z^b v_f n^b \quad (3.7)$$

όπου:

a_e είναι το πλάτος κοπής σε mm

a_p είναι το βάθος κοπής σε mm

z είναι ο αριθμός των δοντιών στο κοπτικό εργαλείο

v_f είναι η ταχύτητα τροφοδοσίας σε mm/min

n είναι η ταχύτητα του άξονα σε rpm

k και b εμπειρικά καθορισμένες σταθερές προσαρμογής.

Κατόπιν, προτάθηκε η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής να μπορεί να υπολογιστεί με τη μετρούμενη διαφορά ισχύος της ατράκτου κατά την κοπή και την κοπή με αέρα

$$U_{nc} = \frac{P_s - P_{ac}}{MRR} \quad (3.8)$$

όπου P_s είναι η ισχύς του άξονα κατά την κοπή και P_{ac} είναι η δύναμη κοπής αέρα.

Ένα μοντέλο παλινδρόμησης ισχύος αναπτύχθηκε για να προβλέψει την καθαρή ειδική ενέργεια κοπής με παραμέτρους διεργασίας (a_p , a_e , v , f_z) και τη φθορά του εργαλείου (w):

$$U_{nc} = a_0 a_p a_e v^{a_3} f_z (1 + w)^{a_5} \quad (3.9)$$

όπου a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 και a_5 είναι εμπειρικοί συντελεστές.

Τόσο για αιχμηρά όσο και για φθαρμένα εργαλεία, η ακρίβεια πρόβλεψης είναι κοντά στο 90%. Το πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα της φθοράς του εργαλείου κοπής καθώς η καθαρή ειδική ενέργεια κοπής αυξάνεται σημαντικά με την αυξανόμενη φθορά του εργαλείου. Σε γενικές γραμμές, τα παραπάνω μοντέλα μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική ακρίβεια πρόβλεψης. Το πρόβλημα με αυτά τα μοντέλα είναι ότι απαιτείται μεγάλος αριθμός πειραμάτων για τον προσδιορισμό των εμπειρικών συντελεστών.

3.3.2 Ειδική ενέργεια ατράκτου

Η άτρακτος είναι το πιο σημαντικό μέρος μιας εργαλειομηχανής. Με βάση τη ροή ενέργειας του μηχανικού και ηλεκτρικού συστήματος καθιερώθηκε το μοντέλο ισχύος της μονάδας ατράκτου [70]

$$P_s = P_u + P_a + P \quad (3.10)$$

Η ισχύς του άξονα P_s αποτελείται από ισχύ χωρίς φορτίο P_u , ισχύ κοπής P_c και πρόσθετης απώλειας φορτίου P_a . Πρέπει να σημειωθεί ότι η πρόσθετη απώλεια ενέργειας δεν είναι

σταθερή, αλλά εξαρτάται από την ισχύ του άξονα. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε το μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας άξονα:

$$E_s = P_u t_M + \int_0^{t_M} P_a(t) dt + \int_0^{t_M} P_c(t) dt \quad (3.11)$$

όπου t_M είναι ο χρόνος κοπής.

Σύμφωνα με την εκτιμώμενη ενεργειακή απόδοση του συστήματος ατράκτου, προτάθηκε το μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας μονάδας άξονα [105]:

$$U_s = \frac{P_c}{60\eta MRR} \quad (3.12)$$

όπου:

P_c είναι η απαραίτητη ισχύς κοπής,

MRR είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και

η είναι η ενεργειακή απόδοση της ατράκτου που κυμαίνεται μεταξύ 0,15 και 0,85 με τις δοκιμασμένες πειραματικές συνθήκες.

Η απόδοση μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από το φόρτο εργασίας των εργαλειομηχανών.

3.3.3 Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών

Η κατανάλωση ενέργειας εργαλειομηχανών κατά την κοπή περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται από όλα τα συστήματα εργαλειομηχανών που αναφέρονται στον Πίνακα 3.1 στο στάδιο αφαίρεσης υλικού. Οι μέθοδοι πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας κοπής εργαλειομηχανών συνοψίζονται όπως φαίνονται στη συνέχεια.

3.3.3.1 Μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται στην ενέργεια της μηχανής

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι η ενέργεια που δαπανάται για την αφαίρεση υλικού μονάδας όγκου, η οποία μπορεί να αντανάκλα τη σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και του ρυθμού αφαίρεσης υλικού. Ως εκ τούτου, η ειδική κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιείται συνήθως για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας του μηχανήματος κατά την κοπή. Για την ειδική κατανάλωση ενέργειας της μηχανής στο φραιζάρισμα, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης, όπως απεικονίζεται παρακάτω [70].

$$e_{cut} = k \frac{1}{MRR} + b \quad (3.13)$$

Σημειώνεται ότι η σταθερά k έχει ουσιαστικά μονάδες ισχύος και το b αντιπροσωπεύει την ειδική ενέργεια σε σταθερή κατάσταση. Η ειδική ενέργεια της μηχανής, η οποία αντιπροσωπεύει τη ζήτηση ισχύος κοπής και κοπής αέρα, έχει πράγματι μια αντίστροφη σχέση με το MRR .

Με τον ίδιο τρόπο, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης βασισμένο σε μετρήσεις ισχύος στη μηχανή τórνευσης υπό συνθήκες ξηρής κοπής [106]

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad (3.14)$$

$$E_M = SEC * Q \quad (3.15)$$

όπου:

SEC είναι η ειδική ενέργεια μηχανής

C_0 , C_1 είναι οι εμπειρικοί συντελεστές

MRR είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και

Q είναι ο όγκος των υλικών που θα πρέπει να αφαιρεθούν.

Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας της εργαλειομηχανής μπορεί να προβλεφθεί με βάση τις παραμέτρους της διαδικασίας χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.15. Οι τιμές των συντελεστών C_0 και C_1 ποικίλλουν ανάλογα με τις λεπτομέρειες μηχανουργικής κατεργασίας, όπως τον τύπο της μηχανής και το υλικό εργασίας.

Για το χαρακτηρισμό της σχέσης μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και των μεταβλητών διεργασίας για κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, έγινε βελτίωση των εμπειρικών συντελεστών του τρόπου πρόβλεψης στην Εξίσωση 3.14 για να ληφθούν υπόψη τόσο οι συνθήκες ξηρής επεξεργασίας όσο και οι συνθήκες επεξεργασίας πλημμύρας [70]. Για παράδειγμα, το Σχήμα 3.1 δείχνει τη σχέση μεταξύ SEC και MRR στην εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος DMU 60P (βλέπε παράρτημα), 5 αξόνων. Οι δοκιμές επαλήθευσης έδειξαν ότι το εμπειρικό μοντέλο είχε ακρίβεια μεγαλύτερη από 90%.

Στην Εξίσωση 3.16, περιγράφεται ένα βελτιωμένο εμπειρικό μοντέλο SEC ως συνάρτηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και της ταχύτητας του άξονα [107]

$$SEC = \frac{P_{standby} + k_1 n + b + k_0 MRR}{MRR} = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + k_2 \frac{1}{MRR} \quad (3.16)$$

όπου:

$P_{standby}$ είναι η ισχύς αναμονής,

n είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα και

k_0 , k_1 και k_2 είναι πειραματικοί συντελεστές.

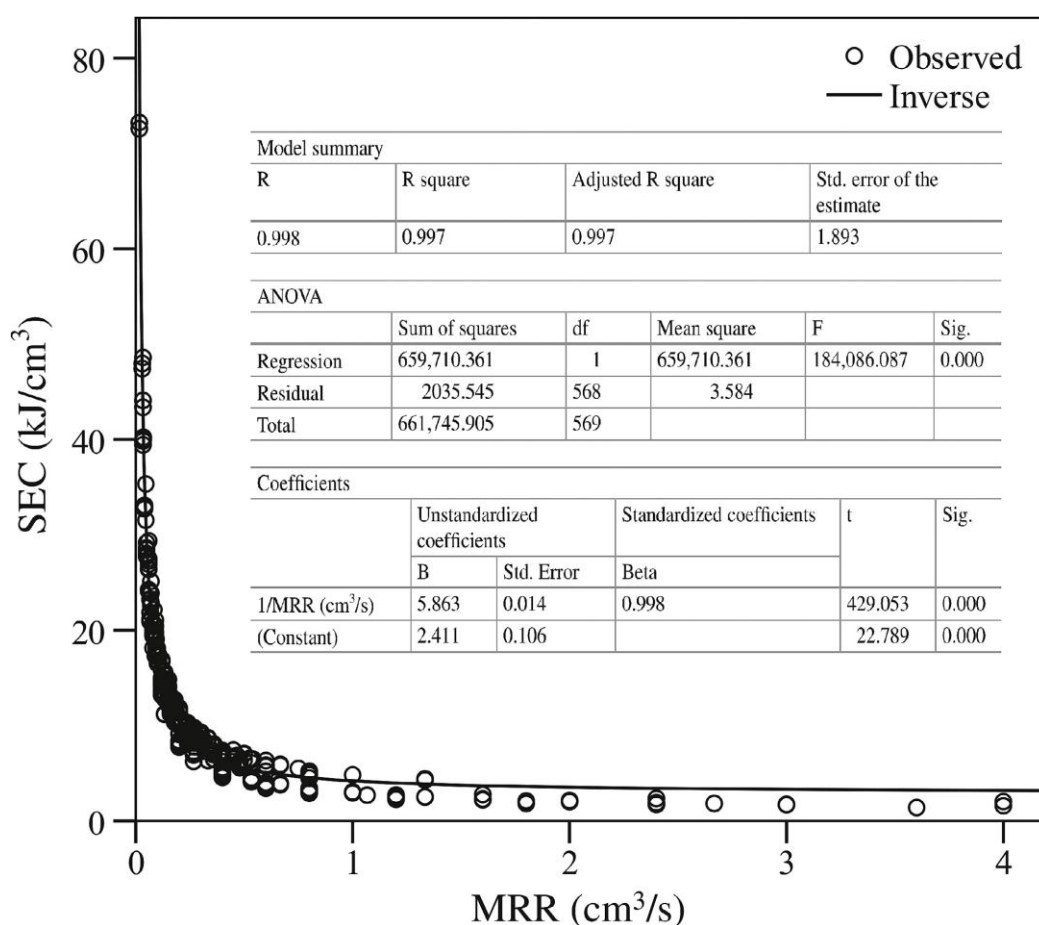
Το παραπάνω μοντέλο αγνοεί την ισχύ του συστήματος τροφοδοσίας επειδή χρειάζεται πολύ μικρό ποσοστό. Η ακρίβεια πρόβλεψης του μοντέλου επαληθεύεται στη διαδικασία φραιζαρίσματος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να παρέχει πιο ακριβή εκτίμηση ενέργειας από το μοντέλο στο οποίο το MRR λαμβάνεται υπόψη μόνο για εργασίες φραιζαρίσματος. Δεδομένου ότι κάθε εργαλειομηχανή είναι ένα πολύπλοκο και δυναμικό σύστημα, υπάρχει αβεβαιότητα εξαγωγής ενός κατάλληλου εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας λόγω διακυμάνσεων στη χωρητικότητα εργαλειομηχανών, στον τύπο του υλικού λειτουργίας και στις διάφορες παραμέτρους διαδικασίας. Για να επιτευχθεί ένα ακριβές μοντέλο, η διακύμανση των ελεγχόμενων μεταβλητών θα πρέπει να ορίζεται προσεκτικά και να καλύπτεται εκτενώς.

3.3.3.2 Μέθοδοι πρόβλεψης βασισμένες σε νευρωνικό δίκτυο

Λόγω της πολυπλοκότητας της μελέτης της κατανάλωσης ενέργειας από εργαλειομηχανές, πολλοί ερευνητές έχουν διεξάγει τις μελέτες τους χρησιμοποιώντας μεθόδους νευρωνικών δικτύων για να προβλέψουν την κατανάλωση ενέργειας εργαλειομηχανών κατά την κοπή. Το δίκτυο BP (Back-Propagation) (βλέπε παράρτημα) είναι ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που βασίζεται σε αλγόριθμο αναδρομικής διάδοσης σφαλμάτων και πάνω σε αυτό βασίστηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας τόνου [108]. Στο συγκεκριμένο δίκτυο οι είσοδοι αποτελούνται από την ταχύτητα κοπής, το ρυθμό τροφοδοσίας και το βάθος κοπής ενώ η έξοδος είναι η κατανάλωση ενέργειας

της εργαλειομηχανής στην κοπή. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ότι η ακρίβεια πρόβλεψης του συγκεκριμένου μοντέλου είναι πάνω από 92%.

Για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας εργαλειομηχανών για χάλυβα AISI 4340 υψηλής ταχύτητας σκληρής στροφής, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου [109]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο υπάρχουν 4 νευρώνες στο στρώμα εισόδου, που εκφράζουν την ταχύτητα κοπής, το ρυθμό τροφοδοσίας, το βάθος κοπής και την αρνητική γωνία κλίσης αντίστοιχα. Επίσης υπάρχουν 2 νευρώνες στο στρώμα εξόδου, που εκφράζουν την κατανάλωση ενέργειας της μηχανής και την ισχύ στην κοπή. Τα πειραματικά αποτελέσματα εδώ έχουν δείξει ότι η καλύτερη πρόβλεψη κατά τη χρήση 20 κρυφών στρωμάτων δίνει απόκλιση περίπου 2,6% από τις πραγματικές τιμές και η ταχύτητα κοπής είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την κατανάλωση ενέργειας εργαλειομηχανών κοπής.



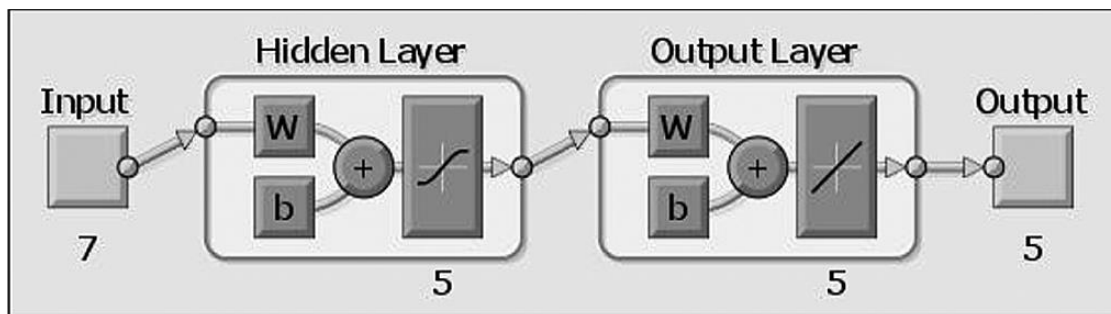
Σχήμα 3.1: Η σχέση μεταξύ SEC και MRR στο DMU 60P χωρίς ψυκτικό

Προκειμένου να αναλυθεί η επίδραση των παραμέτρων διεργασίας στην κατανάλωση ισχύος σε κατεργασίες φραιζαρίσματος υψηλής ταχύτητας σε σφαιρίδια που πραγματοποιούνται σε χάλυβα AISI H13, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας κατά την κοπή [110]. Η δομή του νευρωνικού δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Οι είσοδοι περιλαμβάνουν 7 στοιχεία:

- ταχύτητα ατράκτου,
- ταχύτητα τροφοδοσίας,
- δόντι τροφοδοσίας,
- αξονικό βάθος κοπής,

- ακτινικό βάθος κοπής,
- ακτίνα εργαλείου και
- συνθήκες ψυκτικού υγρού που αντιπροσωπεύονται από 0 ή 1 αντίστοιχα.

Ο στόχος περιλαμβάνει 5 στοιχεία που είναι η κατανάλωση ισχύος της ατράκτου, του άξονα X, άξονα Y και άξονα Z και η συνολική κατανάλωση ισχύος εργαλειομηχανών στην κοπή. Η τιμή της παλινδρόμησης R μετρά τη συσχέτιση μεταξύ των εξόδων και των μετρούμενων δεδομένων. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το R πλησιάζει το 100% και η ακρίβεια πρόβλεψης του μοντέλου είναι κοντά στο 98%. Το μοντέλο επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους της διαδικασίας κοπής.



Σχήμα 3.2: Δομή νευρωνικού δικτύου

Τα σχήματα νευρωνικών δικτύων βοηθούν στην καλύτερη πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας των εργαλειομηχανών με μεγαλύτερη ακρίβεια και βοηθούν τους χειριστές να προσδιορίζουν τις πιο αποτελεσματικές παραμέτρους κοπής για εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Ωστόσο, τα νευρωνικά δίκτυα είναι τοπικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που εμπίπτουν εύκολα εντός τοπικών ορίων.

3.3.3.3 Προγνωστικές μέθοδοι που εξετάζουν τη φθορά του εργαλείου

Η αύξηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου προκαλεί υψηλότερη δύναμη κοπής και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε μια μηχανική κατεργασία. Είναι σημαντικό να προβλεφθεί η κατανάλωση ενέργειας εργαλειομηχανών λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα φθοράς του εργαλείου κοπής. Οι Yoon et al. ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας της μηχανής φραιζαρίσματος σε τρία είδη συνθηκών φθοράς εργαλείου, ελαφρά, μεσαία και σοβαρή [111].

$$E_{machine} = E_{const} + E_{spindle} + E_{feed} + E_{cut} \quad (3.17)$$

όπου το E_{cut} στην Εξίσωση 30 μπορεί να ληφθεί από την Εξίσωση 3.18

$$P_{cut} = f_1(n, v_f, a_p) + f_2(n, v_f, a_p)VB(tool) \quad (3.18)$$

όπου το $f_1(n, v_f, a_p)$ είναι η ισχύς φορτίου για την αφαίρεση υλικού με αιχμηρό εργαλείο και η τιμή του $f_2(n, v_f, a_p) \cdot VB(tool)$ είναι η αύξηση της ισχύος που προκαλείται από τη φθορά της πλευράς του κοπτικού εργαλείου VB.

Οι μέθοδοι πρόβλεψης που εξετάζουν τη φθορά του εργαλείου είναι πιο ακριβείς. Ο λόγος είναι πως δεδομένου ότι η μέτρηση ισχύος δεν διαταράσσει τη διαδικασία κατεργασίας, η κατάσταση φθοράς ενός εργαλείου κοπής μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί με τη μετρούμενη ισχύ εργαλειομηχανής.

3.3.3.4 Προγνωστικές μέθοδοι που εξετάζουν την ενσωματωμένη ενέργεια του κοπτικού εργαλείου

Όταν η φθορά της πλευράς του κοπτικού εργαλείου φτάσει στο όριο του κριτηρίου ζωής του εργαλείου στη μηχανική κατεργασία, το εργαλείο κοπής πρέπει να απορριφθεί. Ειδικά στην κοπή σκληρών και εύθραυστων υλικών, τα εργαλεία κοπής φθείρονται γρήγορα και πρέπει να αντικατασταθούν. Κατά συνέπεια, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει ότι η ενσωματωμένη ενέργεια του εργαλείου κοπής θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση και την πρόβλεψη της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

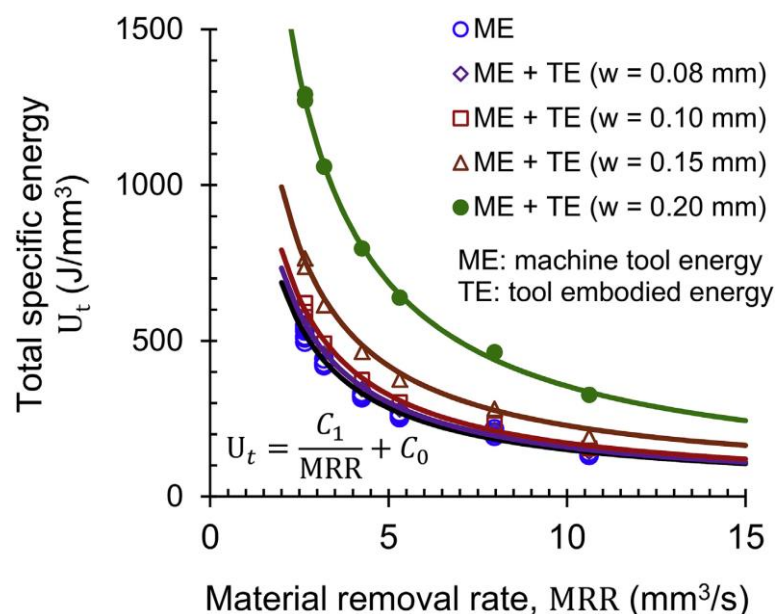
Οι Liu et al. όρισαν την κατανάλωση ενέργειας του κοπτικού ένθετου E_w ως συνάρτηση της φθοράς των πλευρών στην Εξίσωση 3.19, όπου το εργαλείο ενσωματώνει την ενέργεια U_w ως την ενέργεια που καταναλώνεται από το εργαλείο κοπής για την αφαίρεση μονάδας όγκου υλικού στην Εξίσωση 3.20 [112].

$$E_w = \frac{E_{T0}w}{w_c} \quad (3.19)$$

$$U_w = TE = \frac{E_w}{V} \quad (3.20)$$

όπου E_{T0} είναι η ενσωματωμένη ενέργεια ενός ενθέματος κοπής, η οποία εξαρτάται από τα υλικά του εργαλείου και τον όγκο του ενθέματος, w είναι η πραγματική φθορά των πλευρών και w_c είναι η κρίσιμη φθορά της πλευράς κατά την οποία απορρίπτεται ένα ένθετο.

Η υλοποίηση της ενσωματωμένης ενέργειας του ενθέτου κοπής στην κατανάλωση ενέργειας μιας εργαλειομηχανής φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Για σχετικά αιχμηρά εργαλεία, η συμβολή της ενσωματωμένης ενέργειας των κοπτικών ενθέτων είναι μικρή λόγω της σχετικά χαμηλής φθοράς των εργαλείων σε αυτό το στάδιο. Ωστόσο, όταν η φθορά του εργαλείου προχωρά πάνω από 0,15mm, η ενσωματωμένη ενέργεια του ένθετου γίνεται σημαντικός παράγοντας για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 3.3: Η σχέση μεταξύ MRR και κατανάλωσης ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη την ενσωματωμένη ενέργεια του εργαλείου

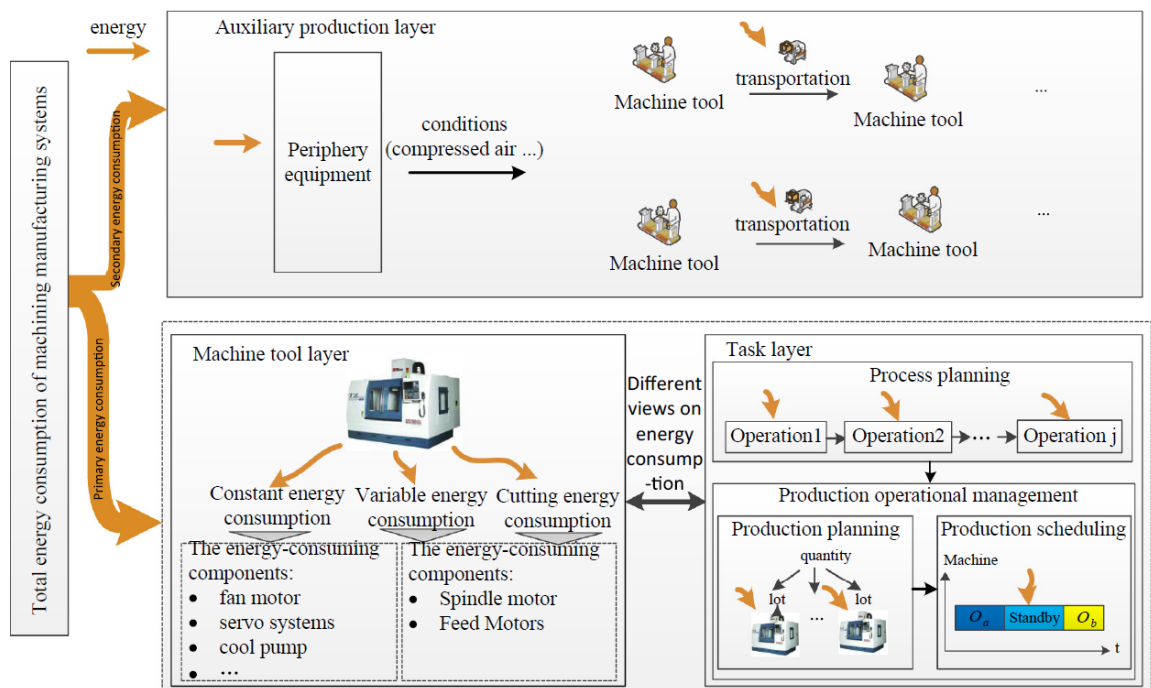
3.4 Ενεργειακή μοντελοποίηση για συστήματα μηχανουργικής κατεργασίας

Ένα σύστημα κατεργασίας θεωρείται ως ένα εργαστήριο κατασκευής που αποτελείται από πολλαπλές μηχανές CNC για την πραγματοποίηση μιας παρτίδας εργασιών παραγωγής. Η ενεργειακή μοντελοποίηση του μηχανικού συστήματος εστιάζει κυρίως σε δύο πτυχές. Η πρώτη πτυχή είναι η κατανόηση και ο χαρακτηρισμός της ροής ενέργειας στο σύστημα κατεργασίας και η δεύτερη πτυχή είναι η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε επίπεδο τρόπου παραγωγής.

3.4.1 Μοντελοποίηση ροής ενέργειας σε επίπεδο συστήματος μηχανουργικής κατεργασίας

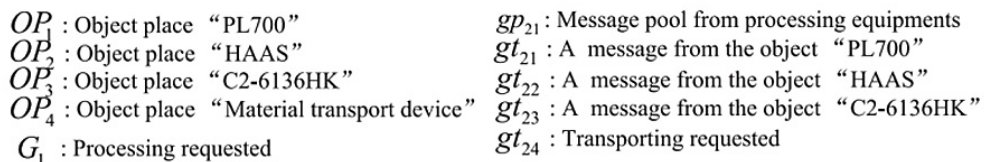
Η κατανόηση και ο χαρακτηρισμός της ροής ενέργειας είναι ουσιαστικής σημασίας για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων εξοικονόμησης ενέργειας σε επίπεδο συστήματος μηχανικής κατεργασίας. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τη μοντελοποίηση της ροής ενέργειας των συστημάτων μηχανουργικής κατεργασίας. Οι Li et al. πρότειναν ένα πλαίσιο μοντελοποίησης για το χαρακτηρισμό της κατανάλωσης ενέργειας ενός συστήματος μηχανικής κατεργασίας από ολιστική άποψη. Η ροή ενέργειας του συστήματος μηχανικής κατεργασίας παρουσιάστηκε για να περιγράψει ιεραρχικά την πολυεπίπεδη δομή των ενεργειακών χαρακτηριστικών ως προς το επίπεδο εργαλειομηχανών, το επίπεδο εργασίας και το βοηθητικό επίπεδο παραγωγής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 [70]. Οι Thiede και Seow πρότειναν τις συστηματικές προσεγγίσεις που βασίζονται στην οπτική γωνία του προϊόντος για να μοντελοποιήσουν την ενέργεια σε επίπεδο συστήματος μηχανικής κατεργασίας, η οποία αποσυνθέτει την ενέργεια στα συστήματα μηχανικής κατεργασίας σε ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε βήμα της διαδικασίας [70]. Ο Zhou πρότεινε μια νέα έννοια του βήματος κατανάλωσης ενέργειας (ECS– Energy Consumption Step) για να περιγράψει ομοιόμορφα διάφορους τύπους κατανάλωσης ενέργειας σε ένα σύστημα μηχανικής κατεργασίας [113]. Ο Peng πρότεινε μια προσέγγιση για την ιεραρχική προβολή ενός ολόκληρου προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ενός συστήματος μηχανικής κατεργασίας σε δύο στάδια και την κατασκευή του ισοδύναμου μοντέλου κατανάλωσης ενέργειας [73].

Δεδομένου ότι η κατανάλωση ενέργειας ποικίλλει δυναμικά ανάλογα με τις διαδικασίες παραγωγής ισχύει ότι μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο διακριτών γεγονότων που προκαλούνται από τις διαδικασίες παραγωγής. Ως εκ τούτου, μπορεί να εφαρμοστεί μια δυναμική διατύπωση διακριτών γεγονότων για τη μοντελοποίηση της ροής ενέργειας σε συστήματα μηχανικής κατεργασίας. Σε αυτήν την κατεύθυνση οι Dietmair και Ver πρότειναν μια γενική διατύπωση για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων μηχανουργικής κατεργασίας, η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει πώς η ροή ενέργειας στα μηχανουργικά συστήματα σχετίζεται με τον τρόπο λειτουργίας τους [114]. Η πρότασή τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. που ακολουθεί.

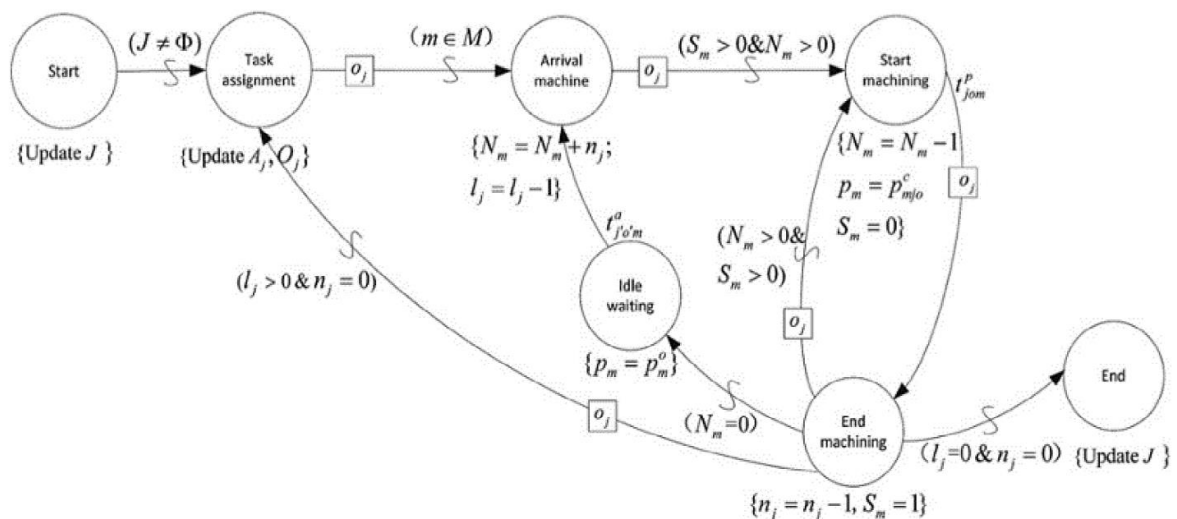


Σχήμα 3.4: Ιεραρχική περιγραφή της ολιστικής ροής ενέργειας σε συστήματα μηχανουργικής κατεργασίας

Οι Li et al. πρότειναν μια μέθοδο μοντελοποίησης για συμπεριφορές υβριδικής ενέργειας σε ευέλικτα συστήματα μηχανουργικής κατεργασίας με έγχρωμο χρονομετρημένο αντικειμενοστραφές δίκτυο Petri (CTOPN– Colored Timed Object-Petri Net) (βλέπε παράρτημα). Οι συμπεριφορές υβριδικής ενέργειας εξαρτώνται όχι μόνο από τις τεχνικές προδιαγραφές που σχετίζονται με τις εργαλειομηχανές και τα τεμάχια εργασίας, αλλά και από μεμονωμένα σενάρια παραγωγής. Το μοντέλο CTOPN για την πρόβλεψη των υβριδικών ενεργειακών συμπεριφορών σε εύκαμπτα συστήματα μηχανικής κατεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 3.5 [115].



Οι He et al. ανέπτυξαν μια μέθοδο μοντελοποίησης της ροής ενέργειας με γνώμονα την εργασία σε συστήματα μηχανουργικής κατεργασίας χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία γραφήματος συμβάντων. Η ροή ενέργειας εξαρτάται δυναμικά από την ευελιξία και τη μεταβλητότητα της ροής εργασιών και η μοντελοποίηση της απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6 [116].



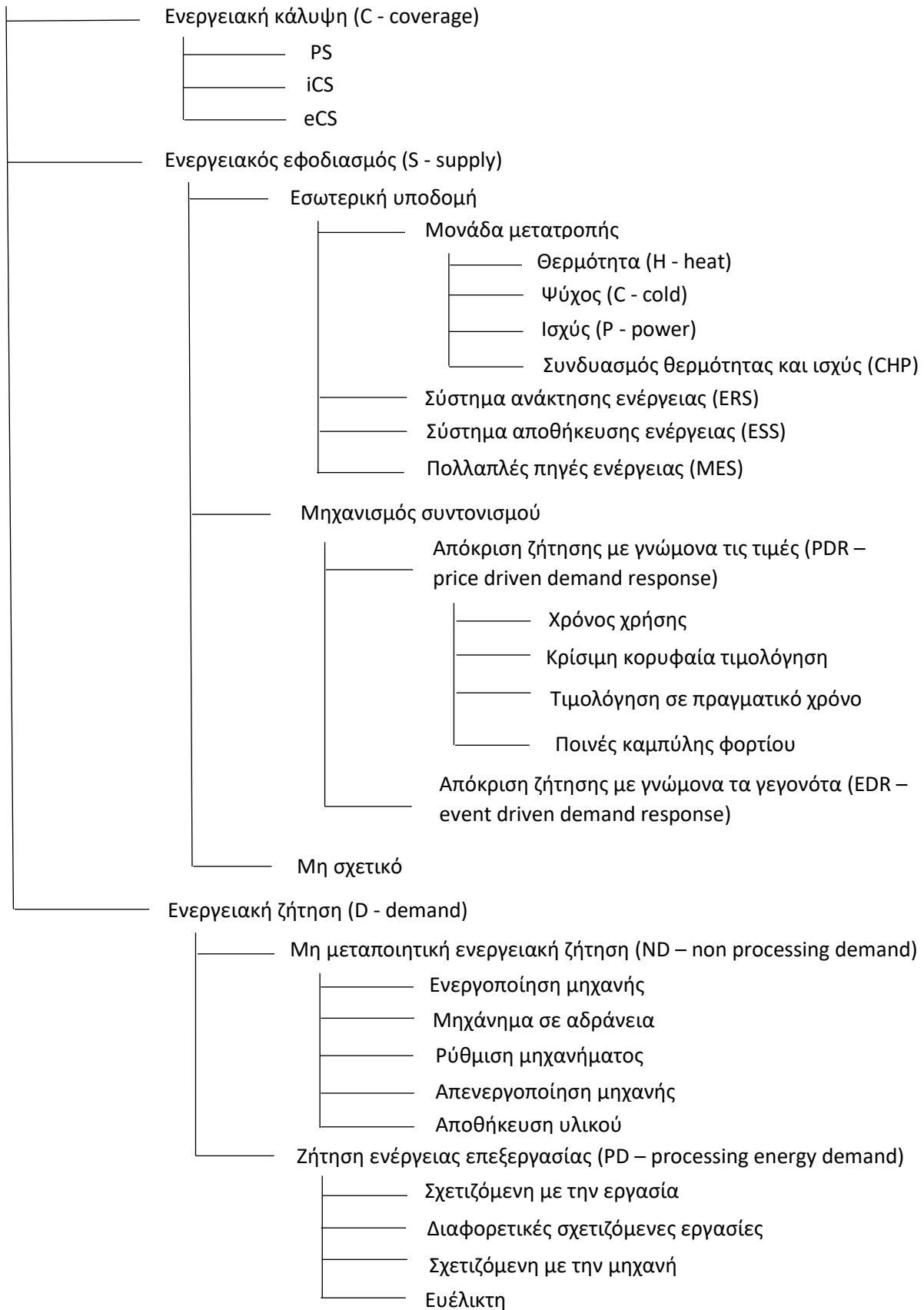
Σχήμα 3.6: Μοντέλο γραφήματος συμβάντων της κατανάλωσης ενέργειας με γνώμονα την εργασία

3.4.2 Μοντελοποίηση ενεργειακής βελτιστοποίησης σε επίπεδο λειτουργίας παραγωγής

Η μοντελοποίηση βελτιστοποίησης ενέργειας σε επίπεδο λειτουργίας παραγωγής χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στον προγραμματισμό παραγωγής. Οι Giret et al. επανεξέτασαν τον προγραμματισμό βιώσιμων παραγωγικών εργασιών σε επίπεδο παραγωγικής λειτουργίας. Τα βήματα για την επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού βιώσιμων παραγωγικών εργασιών προτάθηκαν στο έγγραφο ανασκόπησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Το πρώτο βήμα ήταν η παροχή ενός μοντέλου για τη βελτιστοποίηση των διαφόρων στόχων και το δεύτερο, η επίλυση του ίδιου του προβλήματος προγραμματισμού [117].

Οι Gahm et al. ανέπτυξαν επίσης ένα ερευνητικό πλαίσιο (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.) για τον “ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό (EES – Energy Efficient Scheduling)” το οποίο ταξινόμησε τις έρευνες σε τρεις διαστάσεις την “ενεργειακή κάλυψη”, την “παροχή ενέργειας” και τη “ζήτηση ενέργειας”. Κάθε μία από αυτές τις διαστάσεις περιέχει κατηγορίες και χαρακτηριστικά για τον καθορισμό των ενεργειακών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το EES [118].

Πλαίσιο προγραμματισμού ενεργειακής απόδοσης



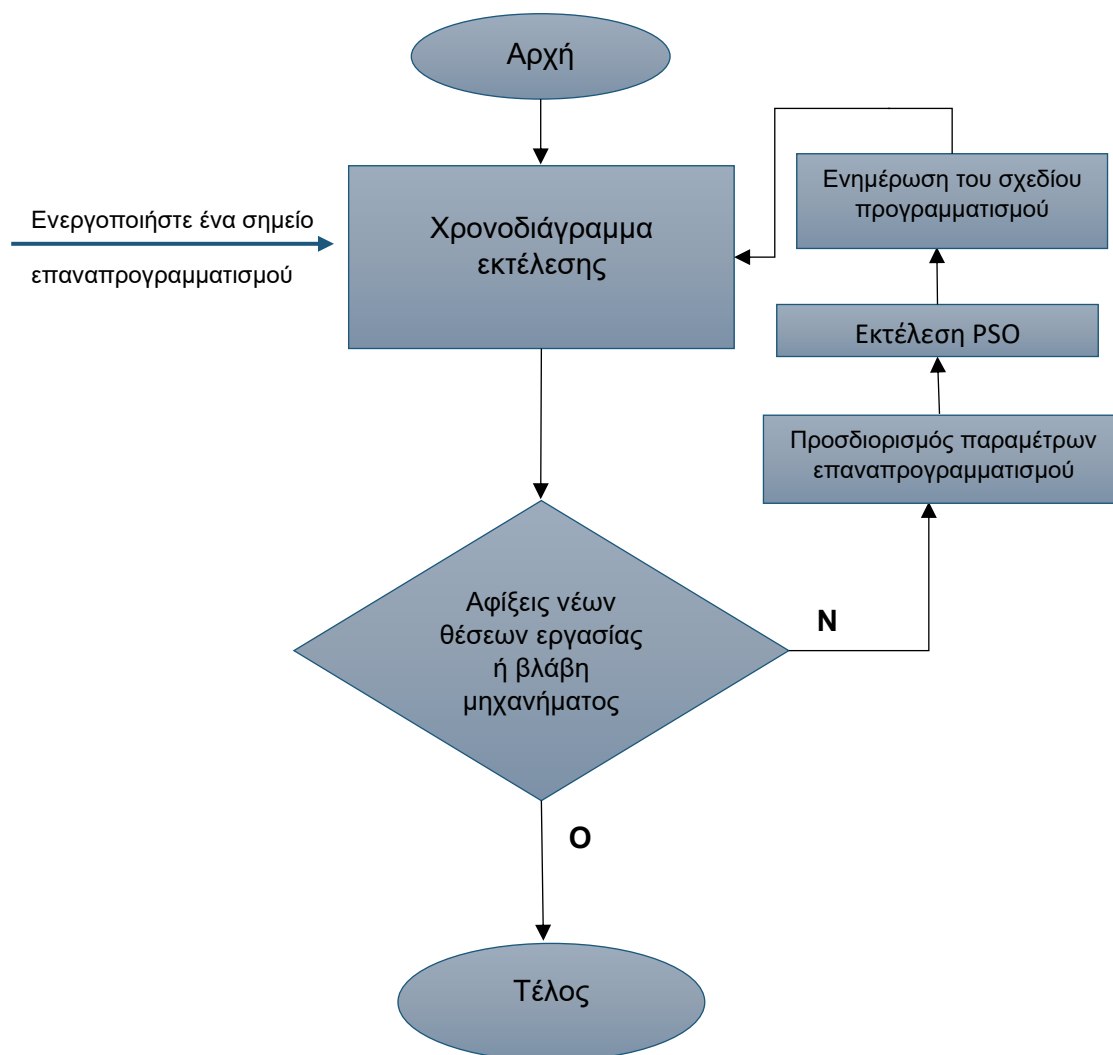
Σχήμα 3.7: Πλαίσιο EES

Η μοντελοποίηση εστιασμένη στην ενέργεια έχει προταθεί για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού εξοικονόμησης ενέργειας από τρία είδη συστημάτων μηχανικής κατεργασίας:

- συστήματα μεμονωμένων μηχανών,
- συστήματα ροής και
- συστήματα εργασίας.

Η βελτιστοποίηση της ενέργειας μοντελοποιήθηκε από τους Fadi et al. για τον προγραμματισμό παραγωγής μεμονωμένων μηχανών για τη μείωση του ενεργειακού κόστους αποφεύγοντας περιόδους υψηλών τιμών ενέργειας [119].

Οι Fang και Dai πρότειναν μοντέλα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων λαμβάνοντας υπόψη τόσο την παραγωγικότητα (δηλαδή, το εύρος κατασκευής) όσο και την ενέργεια (δηλαδή, φορτίο αιχμής, εκφόρτωση και αποτύπωμα άνθρακα) για καταστήματα ροής [120,121]. Οι Tang et al. αντιμετώπισαν το πρόβλημα του δυναμικού προγραμματισμού για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη δημιουργία ενός εύρους για ένα ευέλικτο κατάστημα ροής λαμβάνοντας υπόψη τις αφίξεις νέων θέσεων εργασίας και τη βλάβη μηχανών σε έναν πραγματικό προγραμματισμό παραγωγής [122]. Το Σχήμα 3.8 συνόψισε τη ροή της διαδικασίας δυναμικής επίλυσης.



Σχήμα 3.8: Ροή της δυναμικής διαδικασίας επίλυσης

Αυτά τα ενεργειακά μοντέλα για καταστήματα ροής δεν είναι αποτελεσματικά για τη μείωση της ενέργειας σε καταστήματα εργασίας. Οι Fang et al. πρότειναν ένα μοντέλο προγραμματισμού που έλαβε υπόψη την κατανάλωση ενέργειας για εργασίες μηχανικής κατεργασίας σε καταστήματα εργασίας [123]. Οι He et al. πρότειναν μια μέθοδο βελτιστοποίησης εξοικονόμησης ενέργειας που ενσωματώνει την επιλογή εργαλειομηχανών και τη σειρά λειτουργίας για ευέλικτο προγραμματισμό εργασιών [124]. Το μαθηματικό μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{cases} C = \max\{c_{ijm}\} \quad \forall i, j, m \\ E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{m=1}^M (E_{ijm} x_{ijm}) + \sum_{m=1}^M P_{o,m} t_{w,m} \end{cases}$$

όπου:

C είναι το διάστημα από την αρχή υλοποίησης ως και την ολοκλήρωση ενός έργου (makespan)

i (i=1,...,N) ο δείκτης εργασίας

j (j=1,...,J_i) ο αριθμός λειτουργίας

m (m=1,...,M) ο αριθμός μηχανής

N ο αριθμός των εργασιών

J_i όλες οι λειτουργίες για την εργασία i

M όλες οι λειτουργίες για τις μηχανές

C_{ijm} η ώρα λήξης της λειτουργίας O_{ij} στη μηχανή M_m

E η συνολική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας κατεργασίας των εργασιών και της ενέργειας αδράνειας μη κατεργασίας των εργαλειομηχανών

E_{ijm} η κατανάλωση ενέργειας κατεργασίας κατά τη λειτουργία O_{ij} στη μηχανή M_m

x_{ijm} μεταβλητές απόφασης με τιμή 1 εάν η λειτουργία O_{ij} στη μηχανή M_m, διαφορετικά η τιμή είναι 0

P_{o,m} η ισχύς αδράνειας των M_m

t_{w,m} ο χρόνος αδράνειας των M_m

Τα αποτελέσματα της μελέτης της κατάστασης έδειξαν ότι υπάρχει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας με την ενσωμάτωση της επιλογής εργαλειομηχανών και της σειράς λειτουργίας σε σύγκριση με την εξέταση μόνο ενός από αυτά.

Οι Liu et al. παρουσίασαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης ενέργειας χρησιμοποιώντας έξυπνες τεχνικές προγραμματισμού, οι οποίες ήταν ικανές να ενσωματώσουν κατακερματισμένες μικρές περιόδους αδράνειας στις μηχανές σε μεγάλες. Αυτός ο προγραμματισμός δημιουργεί ευκαιρίες για την απενεργοποίηση των ανεπαρκώς χρησιμοποιούμενων πόρων, ενώ ταυτόχρονα διατηρούσε την απόδοση της παραγωγής [125].

3.5 Στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας

3.5.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων διαδικασίας

Η κατανάλωση ενέργειας και η ενεργειακή απόδοση κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας κοπής εξαρτώνται από την επιλογή των παραμέτρων της διαδικασίας [70]. Επομένως, η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων διεργασίας για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης κατεργασίας κοπής μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης [70]. Αυτό το μοντέλο βελτιστοποίησης μπορεί να αναπτυχθεί με

μεθόδους προσαρμογής καμπύλης εάν υπάρχουν διαθέσιμα επαρκή πειραματικά δεδομένα.

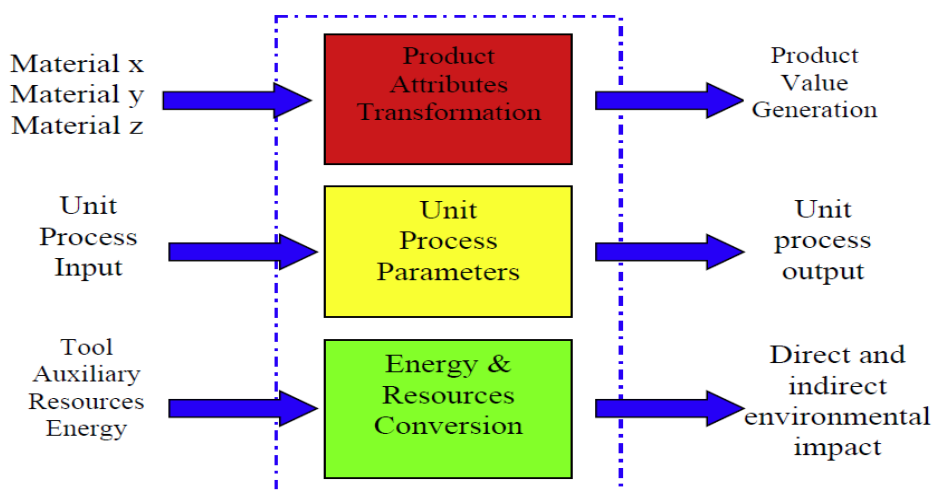
Οι Newman et al. διερεύνησαν τη δυνατότητα μείωσης της ενέργειας μέσω σχεδιασμού διεργασιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανάλωση ενέργειας των εναλλάξιμων διεργασιών μπορεί να διαφέρει σημαντικά [70]. Τα επικυρωμένα πειράματα σε ένα εξάρτημα πολλαπλών χαρακτηριστικών που φαίνεται στο Σχήμα 3.9 έδειξαν ότι η αλλαγή των παραμέτρων κοπής μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αλλαγές στην κατανάλωση ενέργειας για εναλλάξιμες διαδικασίες με υψηλότερα φορτία, δηλαδή υψηλότερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Επίσης έδειξε ότι η απαιτούμενη ενέργεια είναι πολύ μικρότερη στο ημιτελικό φινίρισμα από ότι στο φινίρισμα κοπής.



Σχήμα 3.9: Εξάρτημα πολλαπλών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται στα πειράματα κατανάλωσης ενέργειας

Οι Oda et al. μελέτησαν την εξοικονόμηση ενέργειας εφαρμόζοντας τη μέθοδο της κεκλιμένης κοπής σε κέντρο μηχανικής κατεργασίας 5 αξόνων [126]. Τόνισαν ότι το φραιζάρισμα με άκρα με μπίλια ήταν το βέλτιστο σε κεκλιμένη γωνία 15° με τη χαμηλότερη ειδική ενέργεια στην κατεργασία περιγράμματος.

Οι διαδικασίες παραγωγής μονάδων μπορούν να θεωρηθούν ως υπηρεσία που παράγει αξία για τα προϊόντα καθώς και καταναλώνει ενέργεια και άλλους πόρους που φαίνονται στο Σχήμα 3.10. Ωστόσο, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας δεν πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την ποιότητα του προϊόντος ή να αυξάνει τη χρήση του εργαλείου.



Σχήμα 3.10: Τα στρώματα της μονάδας διαδικασίας οικολογικής απόδοσης

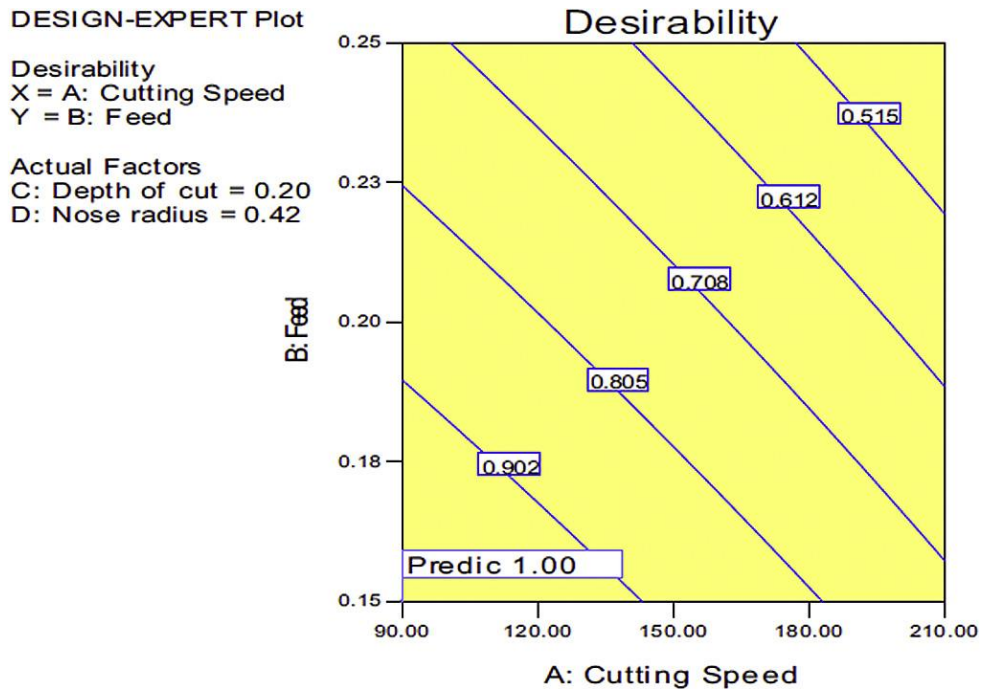
Οι Li et al. πρότειναν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της οικολογικής απόδοσης των διαδικασιών παραγωγής μονάδων [127] χρησιμοποιώντας μια διαδικασία λείανσης για να καταδειχθεί πώς να χαρακτηριστεί η σχέση μεταξύ των παραμέτρων της διαδικασίας, της κατανάλωσης ενέργειας και της ποιοτικής απόδοσης. Η αξιολόγηση έδειξε ότι η οικολογική απόδοση των διαδικασιών παραγωγής μονάδων μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους της διαδικασίας, την κατανάλωση ενέργειας και την ποιότητα του προϊόντος ταυτόχρονα.

Είναι σημαντικό να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα στις μηχανουργικές κατεργασίες, παρέχοντας παράλληλα ευνοϊκή ακεραιότητα επιφάνειας των κατεργασμένων εξαρτημάτων. Προκειμένου να επιτευχθεί ταυτόχρονα η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και η καλύτερη ακεραιότητα της επιφάνειας, οι Hanafi et al. βελτιστοποίησαν τις παραμέτρους της διαδικασίας για ξηρή κατεργασία κετόνης πολυαιθερικού αιθέρα (PolyEtherEtherKetone) ενισχυμένο με 30% ίνες άνθρακα [128]. Τα αποτελέσματα του πειράματος αποκάλυψαν ότι η ταχύτητα κοπής 100m/min, ο ρυθμός τροφοδοσίας 0,05 mm/rev και το βάθος κοπής 0,25 mm είναι ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων κοπής. Συνοπτικά, το βάθος κοπής είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας, ακολουθούμενο από την ταχύτητα κοπής και το ρυθμό τροφοδοσίας.

Οι Yan et al. ανέπτυξαν μια μέθοδο βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων [129]. Σε αυτήν τη μέθοδο, η ταχύτητα του άξονα, ο ρυθμός τροφοδοσίας, το βάθος κοπής και το πλάτος κοπής για μια διαδικασία φραιζαρίσματος βελτιστοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθούν ταυτόχρονα στόχοι βιωσιμότητας, ρυθμού παραγωγής και ποιότητας κοπής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κοπή με χαμηλή ταχύτητα ατράκτου είναι πιο αποδοτική ενεργειακά από την κοπή στην αρχική ταχύτητα για την κατεργασία φραιζαρίσματος.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις βελτιστοποίησης διεργασιών μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας στη μηχανική κατεργασία χωρίς να θυσιάζεται η ακεραιότητα της επιφάνειας. Επιπλέον, ο ρυθμός φθοράς του κοπτικού εργαλείου συμβάλλει σημαντικά στο κόστος λειτουργίας κοπής. Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας και να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής ενός εργαλείου σε διαδικασίες κατασκευής.

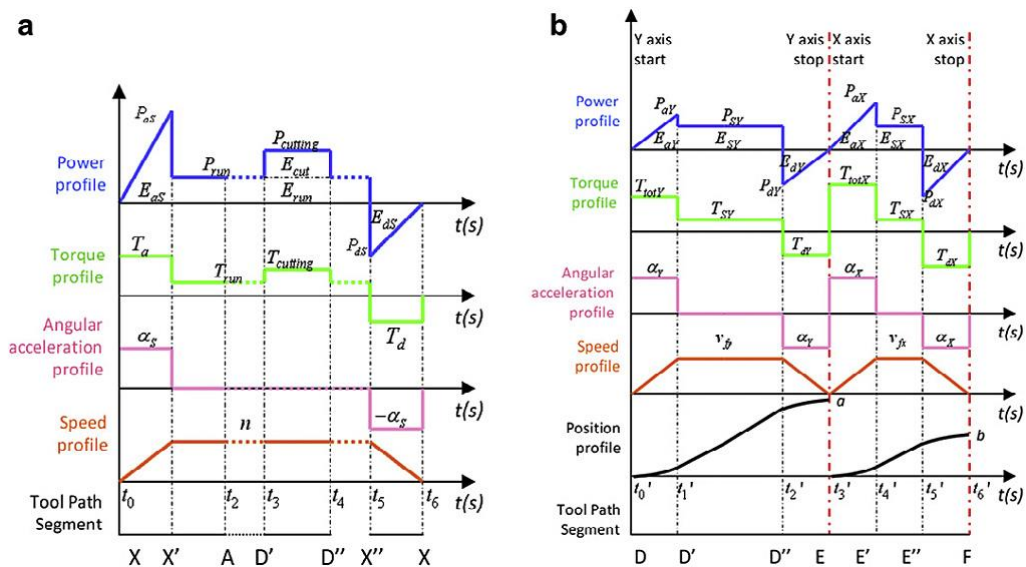
Ο Bhushan ερεύνησε την επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην κατανάλωση ενέργειας και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Οι παράμετροι μηχανικής κατεργασίας όπως η ταχύτητα κοπής, ο ρυθμός τροφοδοσίας, το βάθος κοπής και η ακτίνα μύτης βελτιστοποιήθηκαν με παράγοντες πολλαπλής απόκρισης, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ισχύος και της διάρκειας ζωής του εργαλείου κατά την τόνευση του σύνθετου υλικού 7075 κράμα Al 15wt% SiC, όπως φαίνεται στο Σχήμα που ακολουθεί [130]. Με τη βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων μηχανικής κατεργασίας, επιτεύχθηκε μείωση 13,55% στην κατανάλωση ισχύος και βελτίωση 22,12% στη διάρκεια ζωής του εργαλείου με βελτιστοποίηση πολλαπλών αποκρίσεων μέσω της διαδρομής ανάλυσης επιθυμίας.



Σχήμα 3.11: Σύνθετη επιθυμία κατανάλωσης ενέργειας και διάρκεια ζωής εργαλείου

3.5.2 Βελτιστοποίηση επιτάχυνσης-επιβράδυνσης

Γενικά, ο άξονας εργαλειομηχανών και οι άξονες τροφοδοσίας υφίστανται μια μεταβατική κατάσταση πριν φτάσουν στη σταθερή κατάσταση της μηχανουργικής κατεργασίας. Η ροπή που απαιτείται για την επιτάχυνση ενός κινητήρα είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη ροπή που απαιτείται για τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας. Κατά συνέπεια, τα πλάτη ισχύος που αντιστοιχούν στις μεταβατικές φάσεις υπερσχύουν σε σύγκριση με την ισχύ στις φάσεις σταθερής κατάστασης (Εικόνα 3.1). Η υιοθέτηση κατάλληλων προσεγγίσεων επιτάχυνσης-επιβράδυνσης μπορεί να βελτιώσει την παραγωγικότητα και να μειώσει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας μειώνοντας το χρόνο της διαδικασίας [70].



Εικόνα 3.1: Διαγράμματα κίνησης, ροπής και προφίλ ισχύος για a) άτρακτο και b) άξονες X και Y.

Μετά από κάθε αλλαγή εργαλείου, η άτρακτος εργαλειομηχανής απαιτεί επιτάχυνση από την ηρεμία στην καθορισμένη ταχύτητα περιστροφής. Το σύστημα σερβομηχανισμού τροφοδοσίας μετακινεί το εργαλείο από τη θέση αλλαγής εργαλείου στη θέση κατεργασίας με το γρήγορο ρυθμό τροφοδοσίας. Ωστόσο, η διαδικασία επιτάχυνσης της ατράκτου απαιτεί συνήθως περισσότερο χρόνο από την τοποθέτηση του σερβομηχανισμού τροφοδοσίας στην κατεργασία υψηλής ταχύτητας. Κατά συνέπεια, οι Mori et al. ανέπτυξαν μια νέα προσέγγιση επιτάχυνσης κινητήρα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συγχρονίζοντας την επιτάχυνση της ατράκτου με την ταχύτητα ταχείας τροφοδοσίας του συστήματος τροφοδοσίας. Η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση περίπου 10% στην κατανάλωση ενέργειας [70].

Μια κατάλληλη προσέγγιση επιτάχυνσης-επιβράδυνσης μπορεί να συντομεύσει το χρόνο μη κοπής και να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση αναμονής. Σε γενικές γραμμές, η προσέγγιση γραμμικής επιτάχυνσης-επιβράδυνσης μπορεί να μειώσει τη μεταβατική κατάσταση των κινητήρων του άξονα και των αξόνων τροφοδοσίας της εργαλειομηχανής, αλλά έχει ως αποτέλεσμα κραδασμούς εργαλειομηχανών που θα εξασθενίσουν τη σταθερότητα της διαδικασίας και θα μειώσουν τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η προσέγγιση επιτάχυνσης επιβράδυνσης της καμπύλης S μπορεί να μειώσει τον αντίκτυπο των εργαλειομηχανών, αλλά να παρατείνει τη μεταβατική κατάσταση της εργαλειομηχανής. Επομένως, η προσέγγιση επιτάχυνσης επιβράδυνσης θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί για να ληφθούν υπόψη οι συμβιβασμοί μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας, της ποιότητας κοπής και της διάρκειας ζωής του εργαλείου.

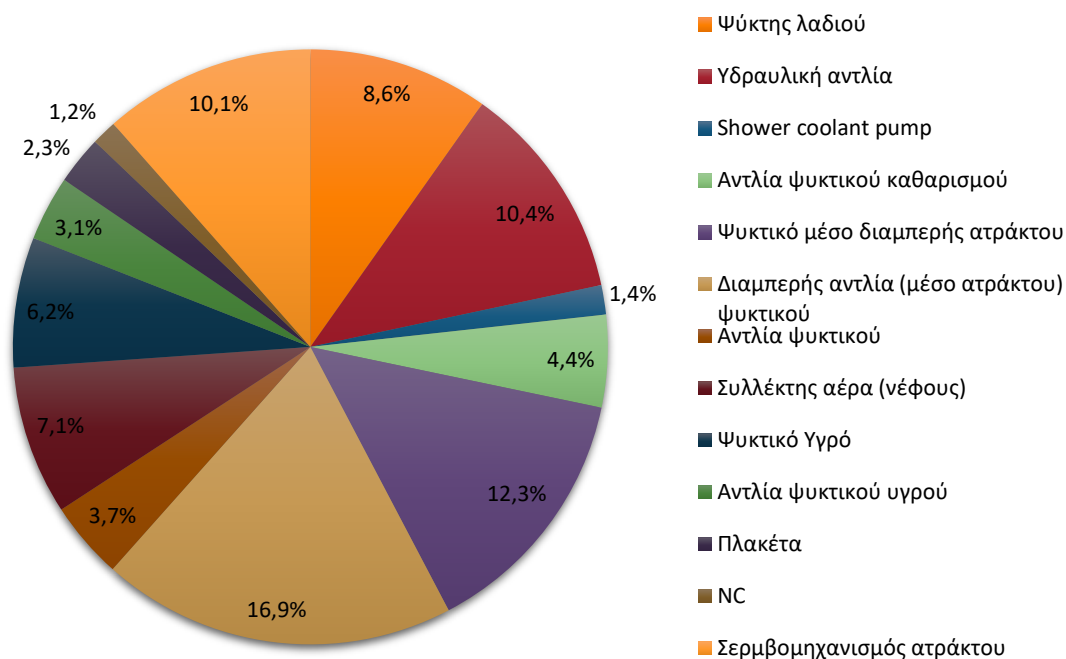
3.5.3 Βελτιστοποίηση ενεργειακών εξαρτημάτων εργαλειομηχανών

Η μείωση των στιγμιαίων απαιτήσεων ισχύος είναι μια αποτελεσματική προσέγγιση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με βελτιστοποίηση σχεδιασμού εξαρτημάτων προσανατολισμένη στην ενέργεια [76]. Τα βελτιστοποιημένα κινούμενα εξαρτήματα με υψηλή απόδοση μετάδοσης, όπως οι ακριβές σφαιρικές βίδες και τα γρανάζια, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε εργαλειομηχανές για τη μείωση της στιγμιαίας απώλειας ισχύος.

Γενικά, ο άξονας εργαλειομηχανής και οι κινητήρες του άξονα τροφοδοσίας καταναλώνουν πολλή μη παραγωγική ενέργεια. Η ισχύς εισόδου του συστήματος ατράκτου εργαλειομηχανής μπορεί να χωριστεί σε ισχύ ρελαντί, ισχύ κοπής και πρόσθετη ισχύ απώλειας φορτίου [131]. Η πρόσθετη απώλεια φορτίου περιλαμβάνει την ηλεκτρική απώλεια και τη μηχανική απώλεια στον κινητήρα του άξονα και στο μηχανικό σύστημα μετάδοσης που δημιουργείται από το φορτίο κοπής. Είναι προφανές ότι η πρόσθετη απώλεια φορτίου μειώνει την ενεργειακή απόδοση του κινητήρα της ατράκτου. Επομένως, η βελτιστοποίηση του κινητήρα του άξονα και του μηχανικού συστήματος μετάδοσης είναι χρήσιμη για τη μείωση της πρόσθετης ισχύος απώλειας φορτίου και τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

3.5.4 Βελτίωση της απόδοσης του περιφερειακού εξοπλισμού

Ο περιφερειακός εξοπλισμός απαιτείται για την εκτέλεση βοηθητικών λειτουργιών στις διαδικασίες παραγωγής. Ωστόσο, ο περιφερειακός εξοπλισμός καταναλώνει σημαντική ποσότητα ενεργειακών πόρων. Οι Li et al. απευθύνονται στη βελτίωση του περιφερειακού εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των υδραυλικών συστημάτων, και των συστημάτων ψύξης και λίπανσης, που θα μπορούσαν να εξοικονομήσουν έως και 58% της σταθερής κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί ότι η εργαλειομηχανή είναι έτοιμη [76].



Σχήμα 3.12: Κατανάλωση ενέργειας περιφερειακού εξοπλισμού εργαλειομηχανών

Μπορεί να φανεί από το Σχήμα 3.12 ότι ο εξοπλισμός που σχετίζεται με το ψυκτικό καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια, περίπου 54%, μεταξύ του περιφερειακού εξοπλισμού, ακολουθούμενος από την υδραυλική αντλία, το ψυκτικό υγρό και το περιφερειακό που σχετίζεται με το σερβομηχανισμό της ατράκτου [132]. Έτσι, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί βελτιστοποιώντας τον αριθμό των αντλιών ψυκτικού, τον όγκο, τη συχνότητα κίνησης και τη μέθοδο ελέγχου του υδραυλικού εξοπλισμού.

3.6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Στην παρούσα εργασία η κατανάλωση ενέργειας ταξινομήθηκε σε επίπεδο εργαλειομηχανής, διαδικασίας και συστήματος. Συζητήθηκε επίσης η κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικές καταστάσεις μιας εργαλειομηχανής. Επιπλέον, διερευνήθηκαν συγκεκριμένα μοντέλα πρόβλεψης ενέργειας και κατανάλωσης ενέργειας. Τέλος, παρουσιάστηκαν στρατηγικές για μείωση της μηχανικής κατεργασίας. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται ως εξής:

- Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να εκτιμηθεί σε επίπεδο κατεργασίας, εργαλειομηχανής και συστήματος. Η κατανόηση των απαιτήσεων ισχύος της εργαλειομηχανής σε διαφορετικές καταστάσεις διαφόρων εξαρτημάτων μιας μηχανής είναι κρίσιμης σημασίας για μοντέλα υψηλής πιστότητας που προβλέπουν την κατανάλωση ισχύος κατεργασίας.
- Η προβλεπόμενη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να βοηθήσει τους χειριστές να επιλέξουν αποτελεσματικές παραμέτρους διαδικασίας, διαδρομές διεργασιών και χρονοδιαγράμματα παραγωγής για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας. Έχει

διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα για την ανάπτυξη μοντέλων για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας κοπής, τα οποία μπορούν να χωριστούν σε τρία επίπεδα: καθαρή ενέργεια κοπής, ειδική ενέργεια ατράκτου και ενέργεια ειδικής μηχανής. Επίσης έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας για εξαρτήματα μηχανικής κατεργασίας.

- Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων κατεργασίας, των μεθόδων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, των μεθόδων προγραμματισμού εργασιών, της βελτιστοποίησης των ενεργειακών στοιχείων εργαλειομηχανής και της βελτίωσης του περιφερειακού εξοπλισμού.

Οι ακόλουθες προοπτικές μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της ενέργειας σε μια μηχανουργική κατεργασία:

- Η μελέτη των χαρακτηριστικών κατανάλωσης ενέργειας των εξαρτημάτων των εργαλειομηχανών μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης κατανάλωσης ενέργειας.
- Είναι σημαντικό να εξετάζεται η επιλογή των παραμέτρων της διεργασίας κατά τη βελτιστοποίηση μιας μηχανουργικής κατεργασίας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.
- Μια καινοτόμος προσέγγιση για την επιτάχυνση και επιβράδυνση των σερβοκινητήρων μηχανών μπορεί να αναπτυχθεί με συμβιβασμούς μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας, της απόδοσης μιας μηχανουργικής κατεργασίας και της διάρκειας ζωής του εργαλείου.
- Οι πολλαπλοί στόχοι για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και της ακεραιότητας της επιφάνειας είναι ένα ενδιαφέρον θέμα το οποίο θα μπορούσε να εξεταστεί στο μέλλον [70].

Κεφάλαιο 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Συμπεράσματα

Η ζήτηση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά [133]. Η λευκή βίβλος της κυβέρνησης του Ηνωμένου Βασιλείου από το 2007 αναφέρει ότι η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας θα είναι περισσότερο από 50% υψηλότερη το 2030 σε σχέση με το 2006 και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με την ενέργεια θα είναι περίπου 55% υψηλότερες [134]. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στη βιομηχανία είναι ουσιαστικής σημασίας για την επίτευξη βιώσιμης παραγωγής.

Στην παρούσα εργασία, η τεράστια κατακερματισμένη βιβλιογραφία που επικεντρώνεται στις ενεργειακές πτυχές των διαδικασιών μηχανουργικής κατεργασίας εξετάζεται για να κατανοηθεί η εξέλιξη της έρευνας στην περιοχή, η τρέχουσα ερευνητική εστίαση και οι μελλοντικές ερευνητικές απαιτήσεις. Μόνο τέσσερα άρθρα σχετικά με την ενεργειακή ανάλυση μηχανικής κατεργασίας δημοσιεύθηκαν πριν από το 2010. Πριν από το 2003, ο ειδικός δείκτης ενέργειας κοπής θεωρούνταν ως δείκτης μηχανικής κατεργασίας του υλικού. Σήμερα, η συγκεκριμένη ενέργεια κοπής αντιπροσωπεύεται ως συνάρτηση των παραμέτρων της διαδικασίας κατεργασίας. Η πρωτοποριακή μελέτη στην ανάλυση ενέργειας μηχανουργικής κατεργασίας δόθηκε από τους Gutowski et al. [135], όταν η μηχανική ενέργεια ταξινομήθηκε ως σταθερά και μεταβλητά μέρη. Ο αριθμός των ερευνητικών άρθρων αυξήθηκε εκθετικά μετά το 2009 (από δύο μόνο ερευνητικά άρθρα πριν το 2009, δημοσιεύθηκαν περίπου έντεκα την περίοδο 2016-2018). Αυτός ο αριθμός μπορεί να είναι χρήσιμος για τους μελλοντικούς ερευνητές για τον εντοπισμό μοτίβων και συσχετίσεων μεταξύ τεχνικών μοντελοποίησης, στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας και αξιολόγησης ενεργειακής απόδοσης χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές όπως η μηχανική μάθηση και η ανάλυση δεδομένων.

Το πρώτο βήμα προς την κατανόηση της κατανάλωσης ενέργειας της μηχανικής κατεργασίας είναι η κατανόηση στην ταξινόμησή της. Ένας αριθμός μελετών ταξινόμησε την κατανάλωση ενέργειας από τη μηχανική κατεργασία χρησιμοποιώντας διαφορετικά κριτήρια σε διαφορετικά ιεραρχικά επίπεδα. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι λείπει ένα δομημένο πλαίσιο για την κατανόηση της ταξινόμησης ενέργειας μηχανικής κατεργασίας. Ως εκ τούτου, στην παρούσα εργασία, προτάθηκε ένα ιεραρχικό μοντέλο έξι επιπέδων για την εξήγηση της ενεργειακής ταξινόμησης με συστηματικό τρόπο: από το επίπεδο εργαλειομηχανών στο επίπεδο (μικρο) Therblig. Η ενεργειακή ταξινόμηση μέχρι μικροεπίπεδο βελτιώνει την ενεργειακή διαφάνεια. Η κίνηση των εργαλειομηχανών είναι η κύρια αιτία κατανάλωσης ενέργειας, επομένως η κατανόηση της ροής ενέργειας βελτιώνεται με τον ποσοτικό προσδιορισμό της ροής ενέργειας σε υψηλότερα επίπεδα.

Για την αντιμετώπιση του ερευνητικού ερωτήματος «Ποιες είναι οι προσεγγίσεις ενεργειακής μοντελοποίησης για την κατανάλωση ενέργειας των εργαλειομηχανών;», όπου η απάντηση αναλύεται στο Κεφάλαιο 3, η βιβλιογραφία αναφοράς εξετάζεται για την κατανόηση των ενεργειακών μοντέλων. Στη βιβλιογραφία αναφοράς παρέχονται τρία είδη ενεργειακών μοντέλων, αναλυτικά, αριθμητικά και πειραματικά. Τα αναλυτικά μοντέλα περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό θεωρητικών συντελεστών που είναι δύσκολο να ληφθούν. Τα αριθμητικά μοντέλα, περιλαμβάνουν πολύπλοκους υπολογισμούς και χρειάζονται μεγάλους χρόνους υπολογισμού. Οι εργαλειομηχανές έχουν πολύπλοκα ενεργειακά χαρακτηριστικά που ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τις διαφορετικές εργαλειομηχανές. Κάνει την αναλυτική και αριθμητική ενεργειακή μοντελοποίηση πιο δύσκολη και λιγότερο

ακριβή. Τα πειραματικά μοντέλα είναι πιο ακριβή για τους υπολογισμούς ενέργειας μηχανουργικής κατεργασίας και είναι εύκολο να ληφθούν. Οι μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας θα πρέπει να είναι προς την ανάπτυξη βελτιωμένων πειραματικών μοντέλων από την ενεργειακή ανάλυση μηχανουργικής κατεργασίας.

Η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας δεν αντιστοιχεί πάντα στη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια αναμονής, για παράδειγμα, έχει χαμηλή βαθμολογία ισχύος, αλλά είναι υπεύθυνη για υψηλή κατανάλωση ενέργειας λόγω μεγάλων χρόνων αδράνειας. Η ισχύς αναμονής θεωρείται γενικά σταθερή. Όμως, στην πράξη, η ονομαστική ισχύς σε κατάσταση αναμονής αλλάζει περιοδικά λόγω της ενεργοποίησης βοηθητικών εξαρτημάτων, όπως οι αντλίες λίπανσης, η οποία παραμελείτε στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι υψηλοί χρόνοι επεξεργασίας και η αναποτελεσματική φόρτωση των ηλεκτροκινητήρων προσδιορίζονται επίσης ως τα βασικά ενεργειακά απόβλητα. Η ενέργεια κοπής ή η ενέργεια αφαίρεσης υλικού επικεντρώνεται κυρίως στη βιβλιογραφία αναφοράς. Παρατηρείται ότι η ενέργεια κοπής επηρεάζεται από τις παραμέτρους της διαδικασίας αλλά δεν ποικίλλει σημαντικά με τις εργαλειομηχανές, ενώ οι ενέργειες του άξονα και του συστήματος τροφοδοσίας ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τις εργαλειομηχανές. Σε μια πιο προσεκτική ανάλυση των μοντέλων ενέργειας συστατικών, παρατηρείται ότι διαφορετικοί άξονες έχουν διαφορετική ισοδύναμη μάζα και τριβή, επομένως, η κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης διαφορετική. Ενεργειακά μοντέλα για διαφορετικά εξαρτήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό εργαλειομηχανών και σχεδιασμό διεργασιών.

Η σαφής ταξινόμηση των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας βοηθά στην επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής για εφαρμογή σε διάφορες φάσεις - σχεδιασμός, μακροοικονομικός σχεδιασμός διεργασιών και προγραμματισμός μικροδιαδικασιών. Παρατηρείται ότι η δομή εργαλειομηχανών θα πρέπει να ενσωματωθεί με στιβαρότητα, κινητικότητα, μικρογραφία, προσαρμοστικότητα, μεταβλητότητα, πολυλειτουργικότητα και ενεργειακή δικτύωση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Οι υπερβολικές διαστάσεις των εργαλειομηχανών συχνά οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας και πόρων. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί εκ των προτέρων η χρήση εργαλειομηχανών, όπως το περιβάλλον κατασκευής, τις επιχειρησιακές πληροφορίες, τη λειτουργικότητα του μηχανήματος και τις διαστάσεις των εξαρτημάτων. Η εργαλειομηχανή θα πρέπει να σχεδιάζεται και να διαμορφώνεται με βάση τη χρήση των πελατών για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και των πόρων. Το κόστος της ενέργειας που καταναλώνεται από μια εργαλειομηχανή κατά τη διάρκεια ζωής της αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο ποσοστό του κόστους του κύκλου ζωής της και η επένδυση σε ενεργειακά αποδοτικές εργαλειομηχανές αναφέρεται ότι είναι οικονομικά βιώσιμη. Επίσης, η κατεργασία ενός χαρακτηριστικού μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλές εναλλακτικές εργαλειομηχανές, εργαλεία κοπής και στρατηγικές κοπής. Ως εκ τούτου, η επιλογή των κατάλληλων συστημάτων κατεργασίας είναι σημαντική για την ενεργειακά αποδοτική μηχανουργική κατεργασία. Μετά την επιλογή της καταλληλότερης εργαλειομηχανής, είναι σημαντικό να συντηρούνται και να λειτουργούν οι εργαλειομηχανές με τον βέλτιστο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η σπατάλη ενέργειας. Τα συστήματα υπηρεσιών προϊόντων (PSS) (βλέπε παράρτημα) παρέχουν υπηρεσίες μαζί με προϊόντα για την καλύτερη χρήση των προϊόντων στη φάση χρήσης από οικονομική και περιβαλλοντική άποψη.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής είναι μια δημοφιλής προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης των εργαλειομηχανών όσον αφορά τον ρυθμό παραγωγής, την ποιότητα και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν αρχίσει να εξετάζουν την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές άνθρακα ως στόχους της διαδικασίας μηχανουργικής κατεργασίας. Οι μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να

εργαστούν προς την παροχή μιας πιο πρακτικής προσέγγισης για την επιλογή των στόχων, συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών και περιβαλλοντικών προοπτικών. Η κατανάλωση ενέργειας για την κατεργασία ενός χαρακτηριστικού ποικίλλει ανάλογα με τις διαφορετικές διαδρομές εργαλείου και τη διαμόρφωση αξόνων της εργαλειομηχανής. Παρατηρήθηκε ότι μια διαδρομή εργαλείου με μεγαλύτερο αριθμό ανασυρόμενων εργαλείων έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας και υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Ο προσανατολισμός του τεμαχίου εργασίας επηρεάζει την αξονική κίνηση κατά μήκος κάθε άξονα και ως εκ τούτου την κατανάλωση ενέργειας για τη διαδικασία κατεργασίας. Μερικές μελέτες ανέλυσαν την επίδραση της ρύθμισης του κατεργαζόμενου τεμαχίου στην κατανάλωση ενέργειας κατεργασίας και διερεύνησαν τις δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας βελτιστοποιώντας τον προσανατολισμό του τεμαχίου εργασίας. Η βελτιστοποίηση του προσανατολισμού του τεμαχίου κατεργασίας είναι πλεονεκτική έναντι των άλλων τεχνικών όπως τα MQLs (βλέπε παράρτημα), ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός εξαρτημάτων ή η βελτιστοποίηση παραμέτρων, καθώς δεν απαιτεί επιπλέον επένδυση ή παραμετρική προσαρμογή. Η χρήση στρατηγικής on-off για την απενεργοποίηση της εργαλειομηχανής κατά τη διάρκεια των περιόδων ρύθμισης θεωρείται ως ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας σε κατάσταση αναμονής. Για παράδειγμα, οι εργαλειομηχανές Mori Seiki (βλέπε παράρτημα) είναι εξοπλισμένες με ηλεκτρομαγνητικά φρένα που εφαρμόζονται στους άξονες βαρύτητας και ο εξοπλισμός απενεργοποιείται εάν η εργαλειομηχανή δεν εκτελέσει καμία λειτουργία για 5 λεπτά. Ωστόσο, η λειτουργία αδράνειας δεν είναι ακόμη δημοφιλής για εξοικονόμηση ενέργειας σε εργαλειομηχανές. Η ενεργειακή απόδοση συνήθως αξιολογείται χρησιμοποιώντας τέσσερα μέτρα: αναλογία ενεργειακής χρήσης, ενεργειακή απόδοση σε πραγματικό χρόνο, ειδική κατανάλωση ενέργειας και σχετική ενεργειακή απόδοση. Οι μελέτες για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των εργαλειομηχανών επικεντρώνονται γενικά στην ειδική κατανάλωση ενέργειας για ένα τεμάχιο αναφοράς, ενώ η εξέταση των ελέγχων διεργασίας στη φάση χρήσης (κατάσταση των βοηθητικών εξαρτημάτων, ταχύτητα περιστροφής του άξονα, ρυθμός τροφοδοσίας κ.λπ.) είναι σπάνια [71].

Οι μεγάλες αποκλίσεις στη ζήτηση ενέργειας και τις σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών παραγωγής διακριτών εξαρτημάτων προκύπτουν από διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης. Η θεωρητική προσέγγιση κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί σε μεγάλες υποεκτιμήσεις, έως και 2 τάξεις μεγέθους. Ενώ οι εις βάθος αναλύσεις χρόνου και ισχύος των εργαλειομηχανών που λειτουργούν υπό βιομηχανικές συνθήκες παρέχουν την πραγματική κατανάλωση ενέργειας, η πιο φιλική προς τους πόρους προσέγγιση ελέγχου μπορεί να είναι μια λογική προσέγγιση για διαδικασίες με σχετικά χαμηλά μη παραγωγικά μερίδια χρόνου, περιορισμένο αριθμό παραμέτρων διεργασίας και καλά τεκμηριωμένη τεχνικές προδιαγραφές. Ωστόσο, η ακρίβεια των υποθέσεων προσέγγισης που γίνονται σε μια τέτοια προσέγγιση διαλογής μπορεί να επαληθευτεί αυστηρά μόνο με βάση τη μέθοδο εις βάθος αξιολόγησης, η οποία κατά συνέπεια συνιστάται κατά τη στόχευση της χρήσης των αποτελεσμάτων αξιολόγησης σε βάσεις δεδομένων LCI. Τέλος, η ακρίβεια των διαθέσιμων εγγραφών δεδομένων σχετικά με τις διαδικασίες παραγωγής σε βάσεις δεδομένων LCI, όπως το Ecoinvent2.0, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της διαδικασίας. Για ορισμένες εγγραφές, η ποιότητα των καταχωρήσεων δεδομένων αφήνει σημαντικό χώρο για βελτίωση. Η ποιότητα της κάλυψης της βάσης δεδομένων LCI των διαδικασιών παραγωγής θα μπορούσε επίσης να βελτιωθεί με περαιτέρω υποδιαίρεση κατηγοριών διεργασιών με βάση τα εφαρμοσμένα υλικά, την αρχιτεκτονική εργαλειομηχανών και τη χωρητικότητα καθώς και τις παραμέτρους διαδικασίας [79].

Από την άλλη, τα κυβερνοφυσικά συστήματα (CPS) έχουν προκαλέσει αυξανόμενη ανησυχία στη βιομηχανία λόγω των αξιοσημείωτων οικονομικών πλεονεκτημάτων της και των εκτεταμένων προοπτικών εφαρμογής της. Ταυτόχρονα, το πρόβλημα του ποιοτικού ελέγχου των προϊόντων είναι μια σημαντική εργασία στο CPS, γι' αυτό και έχουν αναπτυχθεί στην πράξη διάφορες έξυπνες τεχνικές. Σε αυτήν την εργασία, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βάσει δεδομένων και μια έξυπνη μεθοδολογία απόφασης για το σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων στο CPS και το σύστημα ελέγχου ποιότητας του προϊόντος δημιουργήθηκε μέσω της κοινής προσπάθειας διαφορετικών έξυπνων τεχνολογιών επεξεργασίας δεδομένων και μεθόδων ανάπτυξης συστημάτων στο πεδίο εφαρμογής μιας κατασκευαστικής εταιρείας. Με βάση την εμπειρία του παρελθόντος, η τεχνική τεχνητής νοημοσύνης του νευρωνικού δικτύου, η συμπίεση δεδομένων, η εξόρυξη δεδομένων και η τεχνική βάσης δεδομένων είναι ένας νέος τρόπος για την έρευνα μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων. Ακόμα, αναπτύχθηκε ένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου στο CPS χρησιμοποιώντας έξυπνες μεθόδους νευρωνικού δικτύου BP και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το έξυπνο σύστημα που βασίζεται σε δεδομένα είναι μια σημαντική μέθοδος και αποτελεσματικό εργαλείο για τον έλεγχο πρόβλεψης ποιότητας προϊόντων στο CPS. Για περαιτέρω εργασία, σχεδιάζεται να ελεγχθούν διάφορες έξυπνες μέθοδοι λήψης αποφάσεων για τη διαδικασία παραγωγής για τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων στο CPS. Θεωρούνται επίσης, άλλα μηχανικά και ηλεκτρικά προϊόντα ως απαραίτητα για τη διασφάλιση της τρέχουσας και μελλοντικής επιτυχίας. Επιπλέον, θα πρέπει να συνεχιστεί η προσπάθεια επέκτασης του συστήματος ποιοτικού ελέγχου των προϊόντων σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς ώστε να ανταποκρίνεται στη διαφοροποιημένη ζήτηση για έξυπνες κατασκευαστικές επιχειρήσεις [24].

Συμπερασματικά, η εργασία υπογραμμίζει την πρόκληση του τρόπου με τον οποίο οι συμβατικές πράσινες τεχνολογίες παρέχουν αποτελέσματα βιωσιμότητας ως μέρος του Industry 4.0 στην κατασκευή. Έχουν ταξινομηθεί οι τεχνολογίες Industry 4.0, οι πράσινες διαδικασίες και τα αποτελέσματα βιωσιμότητας που σχετίζονται με την κατασκευή. Το αποτέλεσμα της σύνθεσης των δημιουργούμενων ταξινομήσεων είναι ένα ανεπτυγμένο πλαίσιο SGI 4.0. Συνοπτικά, αυτή η νέα ανασκόπηση δείχνει ότι οι πράσινες διαδικασίες αποτελούν σημαντικό μέρος της σχέσης μεταξύ του Industry 4.0 και των αποτελεσμάτων βιωσιμότητας. Οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα ότι οι τεχνολογίες Industry 4.0 επιτρέπουν την πλήρη χρήση πράσινων διαδικασιών για την επίτευξη στόχων βιωσιμότητας που βασίζονται στην παραδοσιακή εξοικονόμηση ενέργειας, πόρων/υλικών, μείωσης του κλίματος/εκπομπών και καθαρότερης παραγωγής πράσινες τεχνολογίες. Η σημασία των πράσινων διαδικασιών έγκειται στις λειτουργίες που μπορούν να εκτελέσουν για να δημιουργήσουν αποτελέσματα βιωσιμότητας. Οι λειτουργίες διευκόλυνσης και υποστήριξης των πράσινων διαδικασιών εξηγούν πώς οι τεχνολογίες Industry 4.0 δημιουργούν αποτελέσματα βιωσιμότητας μέσω αυτών των διαδικασιών.

Μέσα από μια συστηματική ανασκόπηση, εντοπίστηκε το κύριο επίκεντρο της τρέχουσας βιβλιογραφίας που συνδέει την Βιομηχανία 4.0, τα αποτελέσματα βιωσιμότητας και τις πράσινες διαδικασίες. Διαπιστώθηκε ότι οι δημοσιεύσεις στην εξεταζόμενη περιοχή ασχολούνται με την εφαρμογή Industry 4.0 και έξυπνων συστημάτων, μεγάλα δεδομένα και συστήματα πληροφοριών, κυβερνοφυσικά συστήματα για σύνδεση μεταξύ πραγματικού και ψηφιακού κόσμου, IIoT και αισθητήρες, πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα, πράσινη παραγωγή και πράσινη σχεδίαση και ανάπτυξη, περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική βιωσιμότητα, τριπλό αποτέλεσμα (βλέπε παράρτημα) και κυκλική οικονομία. Αυτοί οι τομείς στη συνέχεια διασυνδέονται και τα αποτελέσματά τους οδηγούν σε αποτελέσματα βιωσιμότητας, τα οποία είναι συνήθως εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση εκπομπών, βελτιστοποίηση πόρων, μείωση κόστους, παραγωγικότητα και αποδοτικότητα

και υψηλότερες οικονομικές επιδόσεις, ανάπτυξη ανθρώπινων πόρων, κοινωνική ευημερία και ασφάλεια στο χώρο εργασίας. Από αυτά τα συμπεράσματα ακολουθούν επιπτώσεις, συνεισφορές και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η μελέτη αυτή είναι ωστόσο μια πολύτιμη συνεισφορά στο πεδίο, καθώς προτείνει συνέπειες για την πρακτική και την πολιτική. Η μελέτη συνοψίζει ποιες τεχνολογίες και πράσινες διαδικασίες είναι σημαντικές για την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου βιωσιμότητας. Η πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα, η πράσινη παραγωγή και ο πράσινος σχεδιασμός και ανάπτυξη θα πρέπει να είναι βασικές επιχειρηματικές διαδικασίες. Αυτό παρέχει μια γενική, αλλά πρακτική λύση για διαχειριστικές αποφάσεις, ανάπτυξη πολιτικής και στρατηγικής και επενδύσεις. Οι επιχειρήσεις θα πρέπει να επικεντρωθούν στη βιωσιμότητα με βάση την ανάλυση διαδικασιών αντί να εφαρμόζουν νέες τεχνολογίες χωρίς στρατηγική κατεύθυνση.

Η βασική συμβολή αυτής της εργασίας για τη γνώση και την έρευνα είναι η λύση που παρέχει μια ταξινόμηση και πλαίσιο για τα αποτελέσματα βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών στην εποχή του Industry 4.0. Υπάρχει έλλειψη μελετών που να αντιμετωπίζουν το ζήτημα της περίληψης των αποτελεσμάτων της βιωσιμότητας. Αυτή η έρευνα είναι ένα πρώτο βήμα προς μια πιο βαθιά κατανόηση της βιωσιμότητας της σύνδεσης Industry 4.0 με τις πράσινες διαδικασίες. Αυτό το εύρημα ενισχύει την αντίληψη ότι οι επιχειρηματικές διαδικασίες είναι ζωτικής σημασίας για την εφαρμογή των πράσινων τεχνολογιών στην κατασκευή.

Νέα έρευνα που επιδιώκει να χρησιμοποιήσει το πλαίσιο SGI 4.0 θα πρέπει να προσπαθήσει να δείξει εμπειρικά αποτελέσματα των αποτελεσμάτων βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών σε σχέση με το Industry 4.0. Το πλαίσιο SGI 4.0 επιτρέπει την ανάπτυξη εργαλείων αξιολόγησης για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των πράσινων διαδικασιών στο πλαίσιο της 4^{ης} Βιομηχανίας. Το πλαίσιο υπογραμμίζει ποια αποτελέσματα βιωσιμότητας πρέπει να περιλαμβάνονται σε αυτές τις μεθοδολογίες. Αυτή η μελέτη αναπτύσσει ένα πλαίσιο για την υιοθέτηση και τη διευκόλυνση της βιωσιμότητας μέσω πράσινων διαδικασιών σε όλες τις επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν τεχνολογίες Industry 4.0. Είναι εννοιολογική και θεωρητική προετοιμασία για την εμπειρική επαλήθευση της διασύνδεσης μεταξύ αυτών των διαφόρων εννοιών.

Για περαιτέρω κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας, είναι σημαντικό οι περιορισμοί αυτής της μελέτης να λαμβάνονται υπόψη στις επόμενες αναλύσεις των αρνητικών επιπτώσεων των αποτελεσμάτων της βιωσιμότητας. Αυτή η πτυχή θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα σε σύγκριση με μελλοντικές μελέτες. Άλλα ζητήματα και προκλήσεις που δεν αναφέρονται ή που δεν εμφανίζονται συχνά (για παράδειγμα, πρόσθετες τεχνολογίες όπως εικονική πραγματικότητα, επαυξημένη πραγματικότητα, αυτόνομα οχήματα, άλλες πράσινες διαδικασίες, κ.λπ.) θα πρέπει να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν σε μελλοντική ανάλυση και σύνθεση [27].

4.2 Μελλοντικές Προοπτικές και Εκτιμήσεις για το Μέλλον

Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε και τις σημερινές απαιτήσεις του κατασκευαστικού κλάδου για ελαχιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων ποσοτήτων ενέργειας, πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για την έρευνα που αναμένεται να διεξαχθεί στα επόμενα χρόνια είναι οι εξής:

4.2.1 Βελτίωση της βιωσιμότητας

4.2.1.1 Ανάπτυξη δείκτη κατανάλωσης ενέργειας

Η ενεργειακή απόδοση των εργαλειομηχανών είναι μια σημαντική πτυχή στη φάση του σχεδιασμού. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να αναπτυχθεί ένας δείκτης κατανάλωσης ενέργειας και να προστεθεί στα δεδομένα τεχνικών προδιαγραφών εργαλειομηχανών για σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης των διαφόρων εργαλειομηχανών. Ένας τέτοιος δείκτης θα μπορεί να βοηθήσει τους επαγγελματίες να επιλέξουν την πλέον κατάλληλη εργαλειομηχανή με βάση τις απαιτήσεις τους. Επίσης, απαιτείται έρευνα για τη συγκριτική αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας για τυπικές διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας για την καλύτερη διαχείριση ενέργειας και το βέλτιστο σχεδιασμό διεργασιών. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται παράλληλα και περισσότερη έρευνα για την κατανόηση των απαιτήσεων των πελατών και τη διαχείριση της ζήτησης. Αυτό θα βοηθήσει στην αποφυγή του υπερβολικού σχεδιασμού των εργαλειομηχανών, της αναποτελεσματικής φόρτωσης ηλεκτροκινητήρων και σπατάλης ενέργειας σε μη παραγωγικούς χρόνους.

4.2.1.2. Ενεργειακή μοντελοποίηση έως μικροεπίπεδο

Η ποσοτικοποίηση της ροής ενέργειας σε μικροεπίπεδο βελτιώνει την ενεργειακή διαφάνεια για την παραγωγική διαδικασία. Η ενεργειακή μοντελοποίηση με βάση το Therbligs βοηθά στο να δει κάποιος τη ροή ενέργειας κατεργασίας σε μικροεπίπεδο και να λαμβάνει καλύτερες πληροφορίες σχετικά με τα ενεργειακά hotspot. Η βασική χρήση οποιουδήποτε χάρτη ροής αξίας είναι να παρέχει μια καλειδοσκοπική άποψη της υπό ανάλυση αλυσίδας αξίας, έτσι ώστε οι δυνατότητες βελτίωσης να αντικατοπτρίζονται οπτικά. Σε μελλοντικές μελέτες, θα πρέπει να αναπτύσσονται βελτιωμένοι χάρτες ροής αξίας για την οπτικοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών άνθρακα σε μικροεπίπεδο, ενώ θα πρέπει να προστίθενται περισσότεροι στόχοι διεργασιών στους χάρτες ροής αξίας οι οποίοι θα πρέπει να επεκτείνονται και στις υπόλοιπες διαδικασίες παραγωγής.

4.2.1.3 Επιλογή στόχων βελτιστοποίησης από ενέργεια και περιβαλλοντικές προοπτικές

Σύμφωνα με την έκθεση Fraunhofer IZM, η πιο σημαντική παράμετρος κατά την πώληση μιας εργαλειομηχανής είναι η παραγωγικότητα ακολουθούμενη από την ποιότητα, την ακρίβεια και την τιμή. Η κατανάλωση ενέργειας, ο σχεδιασμός και το κόστος του κύκλου ζωής δεν θεωρούνται σημαντικές παράμετροι κατά την πώληση σύμφωνα με τη συγκεκριμένη έκθεση. Πλέον όμως η βαρύτητα έχει μετατοπιστεί προς τις ενεργειακά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας. Επιπλέον, η επιλογή των στόχων και των περιορισμών της κάθε διαδικασίας δεν είναι τυποποιημένη. Οπότε οι μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να στοχεύουν προς την παροχή πιο πρακτικών προσεγγίσεων για την επιλογή των στόχων βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών και περιβαλλοντικών προοπτικών [71].

4.2.2 Αναλύσεις δεδομένων και εφαρμογές AI (Artificial Intelligence-Τεχνητή Νοημοσύνη)

4.2.2.1 Αναλύσεις ενεργειακών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Οι περισσότερες από τις ερευνητικές μελέτες στην ενεργειακή ανάλυση μιας οποιασδήποτε μηχανουργικής κατεργασίας επικεντρώνονται στην ανάλυση δεδομένων εκτός σύνδεσης, όπου τα ενεργειακά δεδομένα αναλύονται μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας και λαμβάνονται μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας για μελλοντικές διεργασίες. Ωστόσο, η απόδοση των εργαλειομηχανών αλλάζει με το χρόνο, την εξέλιξη της φθοράς του εργαλείου και την απόκλιση στις παραμέτρους της διαδικασίας. Η παρακολούθηση

δεδομένων σε πραγματικό χρόνο διευκολύνεται με τη χρήση αισθητήρων και την ανάλυση δεδομένων. Η χρήση τέτοιων τεχνολογιών αποτελεί πρόκληση για τις βιομηχανίες και τις επιχειρήσεις, ιδιαίτερα τις μικρομεσαίες, λόγω του υψηλού επενδυτικού κόστους και της πολυπλοκότητάς τους. Οπότε η μελλοντική έρευνα καλό θα ήταν να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη αισθητήρων χαμηλού κόστους, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες πέρα από τις παραδοσιακές για την απόκτηση δεδομένων και την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

4.2.2.2 Χρήση ενεργειακών δεδομένων για παρακολούθηση κατάστασης και προγνωστική συντήρηση

Τα εύκολα διαθέσιμα ηλεκτρονικά (τρέχοντα) δεδομένα σε πραγματικό χρόνο παρέχουν χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις τεχνικές προδιαγραφές και την κατάσταση λειτουργίας των εργαλειομηχανών. Οι απότομες αλλαγές στο ενεργειακό προφίλ μπορεί να υποδηλώνουν κάποια ανωμαλία στην απόδοση της εργαλειομηχανής. Εάν αναλυθούν σωστά, τα ενεργειακά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο είναι δυνατό να χρησιμεύσουν ως βάση για την ηλεκτρονική παρακολούθηση της κατάστασης των εργαλειομηχανών. Η χρήση εργαλειομηχανών που αξιοποιεί σύγχρονα εργαλεία και την άμεση επεξεργασία δεδομένων μπορεί να παρέχει προγνωστική παρακολούθηση της καλής λειτουργίας τους, η οποία όχι μόνο μπορεί να μειώσει το χρόνο διακοπής λειτουργίας αλλά και να προβλέψει την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής της εργαλειομηχανής και των εξαρτημάτων της. Για αυτό το σκοπό μπορούν επίσης να αναπτυχθούν στρατηγικά χρονοδιαγράμματα συντήρησης που επίσης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους.

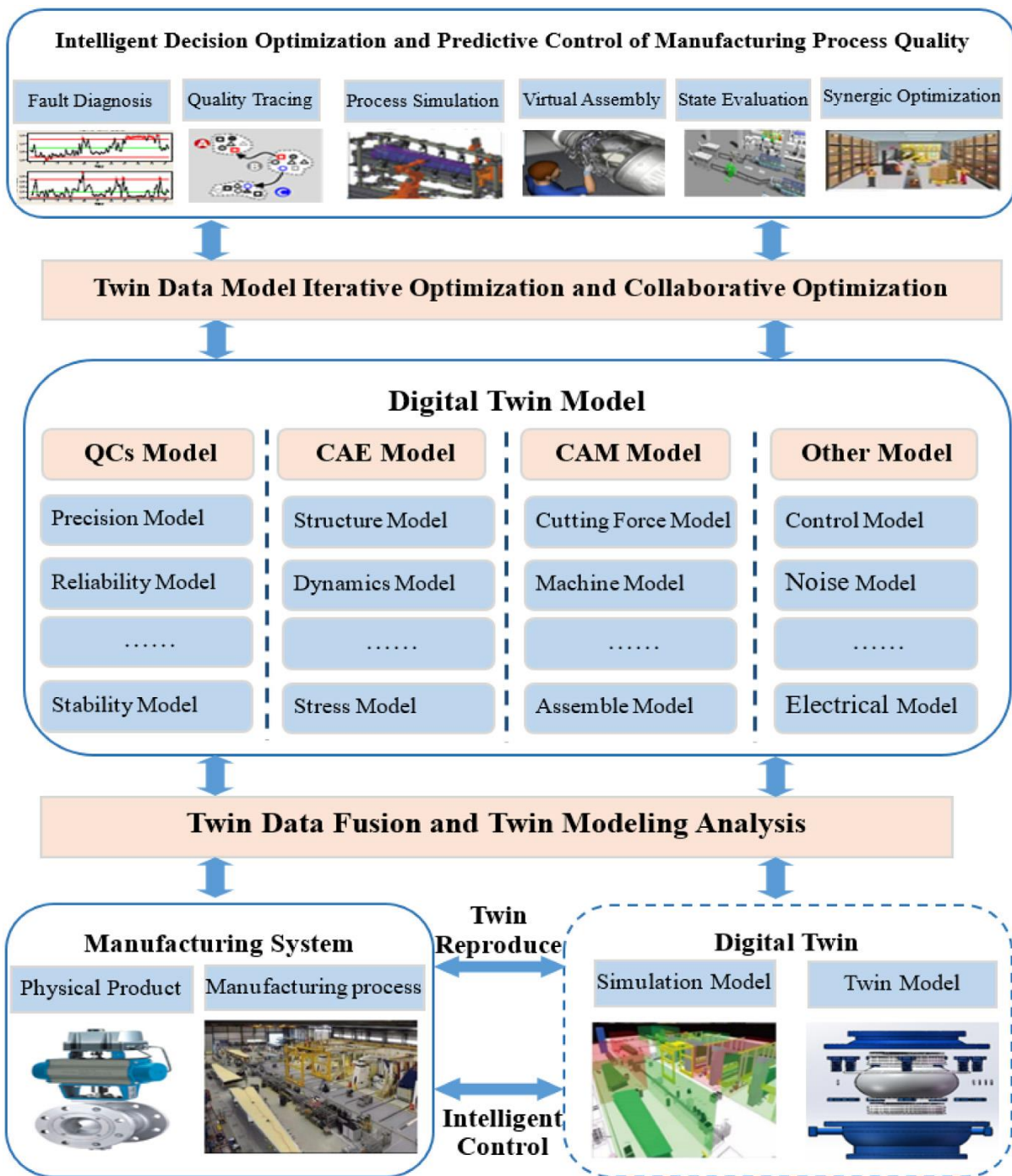
4.2.3 Ενοποίηση με εφαρμογές 4^{ης} βιομηχανίας

Οι μεταποιητικές βιομηχανίες επενδύουν σε εφαρμογές της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης καθώς και του Industrial Internet of Things (IIOT) για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, την παραγωγικότητα και την ανταγωνιστικότητα των επιχειρήσεων. Η ενσωμάτωση της ανάλυσης ενεργειακών δεδομένων με την εφαρμογή εργαλείων της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης μπορεί να βοηθήσει στην παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας της κάθε εργαλειομηχανής σε πραγματικό χρόνο από μια απομακρυσμένη τοποθεσία και στην αποστολή της κατάστασής της ή της ειδοποίησης του κατάλληλου ατόμου αν κάτι δεν πηγαίνει καλά. Μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως πλατφόρμα για τη διαχείριση και τον έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας για τη βελτιωμένη απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας, επιτρέποντας προληπτικές και έγκαιρες αποφάσεις [71].

4.2.4 Μια μελέτη περίπτωσης

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία ποιοτικού ελέγχου αναπτύσσεται όλο και πιο γρήγορα και ο παραδοσιακός ποιοτικός έλεγχος έχει εξελιχθεί στον τρέχοντα ευφυή προγνωστικό έλεγχο. Ως νέο παράδειγμα εφαρμογής ολοκληρωμένου συστήματος, αυτήν την ενότητα εφαρμόστηκε σε σφαιρικές βαλβίδες για παρακολούθηση ποιοτικού ελέγχου (QC) της διαδικασίας κατασκευής βιομηχανικών βαλβίδων CPS στην πόλη Wenzhou, επαρχία Zhejiang, Κίνα. Με προηγμένο εξοπλισμό δοκιμών και τέλειες μεθόδους λήψης αποφάσεων, έχει διαμορφωθεί ένα ιδανικό σύστημα ποιοτικού ελέγχου από τον έξυπνο σχεδιασμό του προϊόντος μέχρι την κατασκευή. Ως σημαντικό μέρος της μεταφοράς του αγωγού, η αξιόπιστη λειτουργία του σώματος της βαλβίδας παίζει ζωτικό ρόλο σε ολόκληρη τη μεταφορά του αγωγού.

Από την άλλη πλευρά, το σύστημα ελέγχου ποιότητας του σώματος βαλβίδας περιλαμβάνει μεθόδους ποιοτικού ελέγχου προϊόντων, ποιοτική επιθεώρηση και επίβλεψη και οδηγίες διασφάλισης ποιότητας. Με βάση τον αλγόριθμο νευρωνικών δικτύων στο CPS, αναλύονται τα δεδομένα του συστήματος απόκτησης και επεξεργασίας, γεγονός που βελτιώνει την ακρίβεια ελέγχου του ευφυούς συστήματος ποιότητας προϊόντος. Επιπλέον, στο πραγματικό σύστημα ελέγχου διεργασιών, η εφαρμογή της έξυπνης τεχνολογίας λήψης αποφάσεων μπορεί κάλλιστα να πραγματοποιήσει γρήγορο και ακριβή διαδικτυακό (online) εντοπισμό σφαλμάτων. Η πρακτική δείχνει ότι το σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων βελτιώνει την ποιότητα του προϊόντος στη διαδικασία παραγωγής του παραδοσιακού εξοπλισμού. Μετά από μια περίοδο λειτουργίας, το σύστημα λειτουργεί σταθερά και αξιόπιστα, διασφαλίζοντας κανονική παραγωγή οπτάνθρακα, βελτιώνοντας την ποιότητα του προϊόντος και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το σύστημα ελέγχου ποιότητας προϊόντος βάσει δεδομένων της διαδικασίας κατασκευής σφαιρικής βαλβίδας στο CPS φαίνεται στο Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων με βάση τα δεδομένα της διαδικασίας παραγωγής στο CPS.

4.2.4.1 Αρχή μοντελοποίησης για σύστημα ποιοτικού ελέγχου που βασίζεται σε νευρωνικό δίκτυο BP

Το πρώτο βήμα είναι να φτιαχτούν οι κόμβοι εισόδου και εξόδου του νευρωνικού δικτύου BP. Η ρύθμιση των κόμβων εισόδου επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα εκπαίδευσης και την ακρίβεια της δομής του δικτύου BP. Πάρα πολλοί κόμβοι θα οδηγούσαν σε πολύ περίπλοκη δομή δικτύου, πολύ λίγοι κόμβοι θα μείωναν την εισαγωγή σχετικών πληροφοριών. Επομένως, η ρύθμιση των κόμβων πρέπει να προσδιορίζεται σύμφωνα με το έργο του συστήματος ποιοτικού προγνωστικού ελέγχου. Σύμφωνα με το προηγούμενο περιεχόμενο αυτής της εργασίας, μπορεί να προσδιοριστεί ότι η αστοχία του σώματος βαλβίδας της σφαιρικής βαλβίδας σχετίζεται με τη ροπή στελέχους N , ο ρυθμός ροής του σώματος της βαλβίδας είναι L/s , η ποσότητα διαρροής είναι L όταν εφαρμόστηκε η πίεση ,

και η ποσότητα διαρροής του σώματος της βαλβίδας είναι I. Συνεπώς, υποθέτουμε ότι ο αριθμός των κόμβων με ποσότητα εισόδου είναι 4 και ο συνολικός αριθμός τύπων σφαλμάτων σώματος βαλβίδας είναι 5, επομένως η ποσότητα εξόδου έχει επιβεβαιωθεί ως 5 κόμβοι.

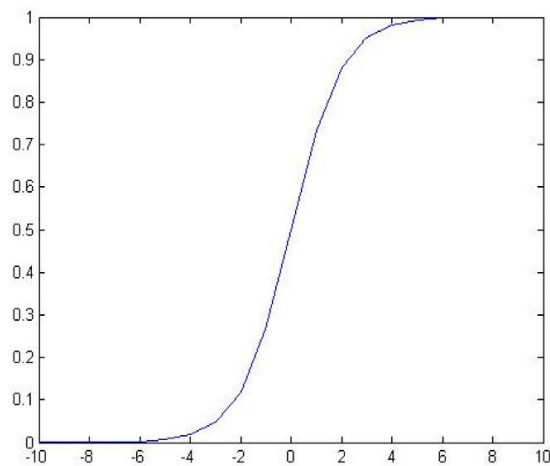
Το δεύτερο βήμα είναι να διαμορφωθούν κρυφά επίπεδα και κόμβοι. Δεδομένου ότι ο αριθμός των κρυφών επιπέδων σχετίζεται στενά με τον αριθμό των κόμβων, όσο περισσότερα κρυφά επίπεδα, τόσο πιο καλή προσέγγιση στην πραγματική συνάρτηση, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια της διάγνωσης και του ελέγχου. Επομένως, ο αριθμός των κόμβων μπορεί να μειωθεί μειώνοντας τον ρυθμό σύγκλισης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μόλις προσδιοριστεί ο αριθμός των κρυφών επιπέδων, ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται ώστε να ταιριάζει με την πραγματική συνάρτηση και η ακρίβεια της προσαρμογής της συνάρτησης να βελτιωθεί.

Ωστόσο, εάν ο αριθμός των κόμβων είναι πολύ μεγάλος, η ταχύτητα σύγκλισης θα μειωθεί απότομα. Ο αριθμός των επιπέδων και των κόμβων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πλήρως και να μειώνεται ο αριθμός των κόμβων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των συναρτήσεων. Ακόμα, ο αριθμός των κρυφών επιπέδων και κόμβων σχετίζεται με τις παραμέτρους εξαγωγής χαρακτηριστικών του επιπέδου εισόδου και τον τύπο σφάλματος ποιότητας του επιπέδου εξόδου. Όταν τα μοτίβα εισαγωγής είναι εντελώς διαφορετικά, πρέπει να προστεθεί ένα ενδιάμεσο στρώμα. Εάν υπάρχουν αρκετά ενδιάμεσα επίπεδα, το μοτίβο εισόδου μπορεί πάντα να μετατραπεί σε κατάλληλο μοτίβο εξόδου δημιουργώντας ένα δίκτυο τριών επιπέδων για να ληφθούν καλά αποτελέσματα. Επομένως, αυτή η παράγραφος επιλέγει να χρησιμοποιήσει ένα νευρωνικό δίκτυο τριών επιπέδων στρώματος εισόδου, κρυφού στρώματος και στρώματος εξόδου.

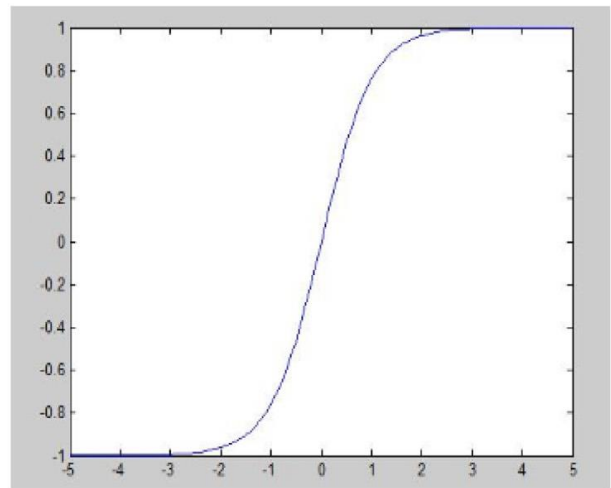
Μετά τον καθορισμό των παραμέτρων εκπαίδευσης, μπορεί να προσδιοριστεί σύμφωνα με τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο ως $i=\sqrt{mn}$, i είναι ο αριθμός των κόμβων στο κρυφό επίπεδο, m είναι ο αριθμός των κόμβων στο επίπεδο εισόδου και n είναι ο αριθμός των κόμβων στο επίπεδο εξόδου. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί καλύτερα η διάγνωση σφαλμάτων για το σύστημα ποιοτικού ελέγχου του σώματος της βαλβίδας, αυτή η ενότητα επιλέγει συγκριτικά 13 κόμβους και 16 κόμβους.

Το τρίτο βήμα είναι στην πραγματικότητα η ανάπτυξη της επιλογής της συνάρτησης ενεργοποίησης των νευρώνων του δικτύου BP. Δεδομένου ότι το δίκτυο BP είναι ένα δίκτυο πολλαπλών επιπέδων, οι συναρτήσεις μεταφοράς που χρησιμοποιούνται συνήθως για τους νευρώνες περιλαμβάνουν τη συνάρτηση λογαριθμικού σιγμοειδούς τύπου, τη συνάρτηση tan-σιγμοειδούς και τη γραμμική συνάρτηση του Purelin, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 4.2.

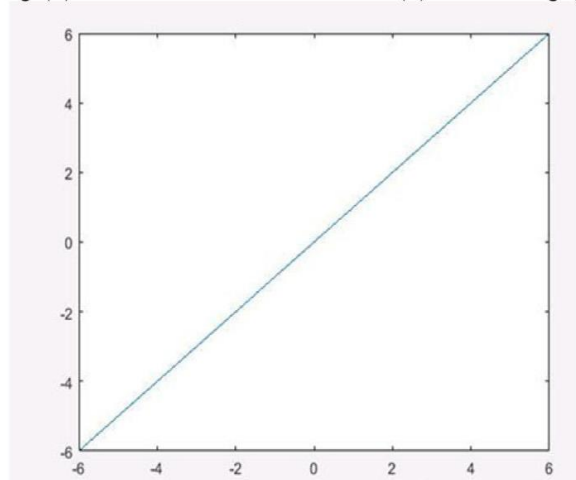
Το σχήμα της καμπύλης της σιγμοειδούς συνάρτησης μεταφοράς είναι τύπου S και οι ίδιες αρχές ισχύουν για τις λογαριθμικές σιγμοειδείς και σιγμοειδείς συναρτήσεις. Η σιγμοειδής συνάρτηση τύπου S και η συνάρτηση τύπου S του νευρικού δικτύου έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:



(a) $a = \text{Logsig}(n)$



(b) $a = \text{Tansig}(n)$



(c) $a = \text{Purelin}(n)$

Εικόνα 4.2: Λειτουργίες μεταφοράς δικτύου BP.

- 1) Όταν η τιμή εισόδου του δικτύου BP είναι μικρή, υπάρχει επίσης μια συγκεκριμένη τιμή εξόδου που αντιστοιχεί σε αυτήν. Εάν το σήμα εισόδου στον νευρώνα είναι αδύναμο, ο νευρώνας έχει επίσης έξοδο, ώστε να μην χάσει την ανάκλαση μικρής πληροφορίας.
- 2) Όταν η τιμή εισόδου του δικτύου BP είναι μεγάλη, οι προσεγγίσεις εξόδου είναι σταθερές και δεν εμφανίζονται μηδενικές.
- 3) Οποιοδήποτε δίκτυο BP έχει καλά διαφορικά χαρακτηριστικά.

Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων, η συνάρτηση τύπου S χρησιμοποιήθηκε ευρέως ως η συνάρτηση ενεργοποίησης των νευρώνων. Σε αυτήν την παράγραφο, τόσο το επίπεδο εισόδου όσο και η συνάρτηση ενεργοποίησης του κρυφού στρώματος υιοθετούν τη συνάρτηση τύπου S διπλής εφαπτομένης.

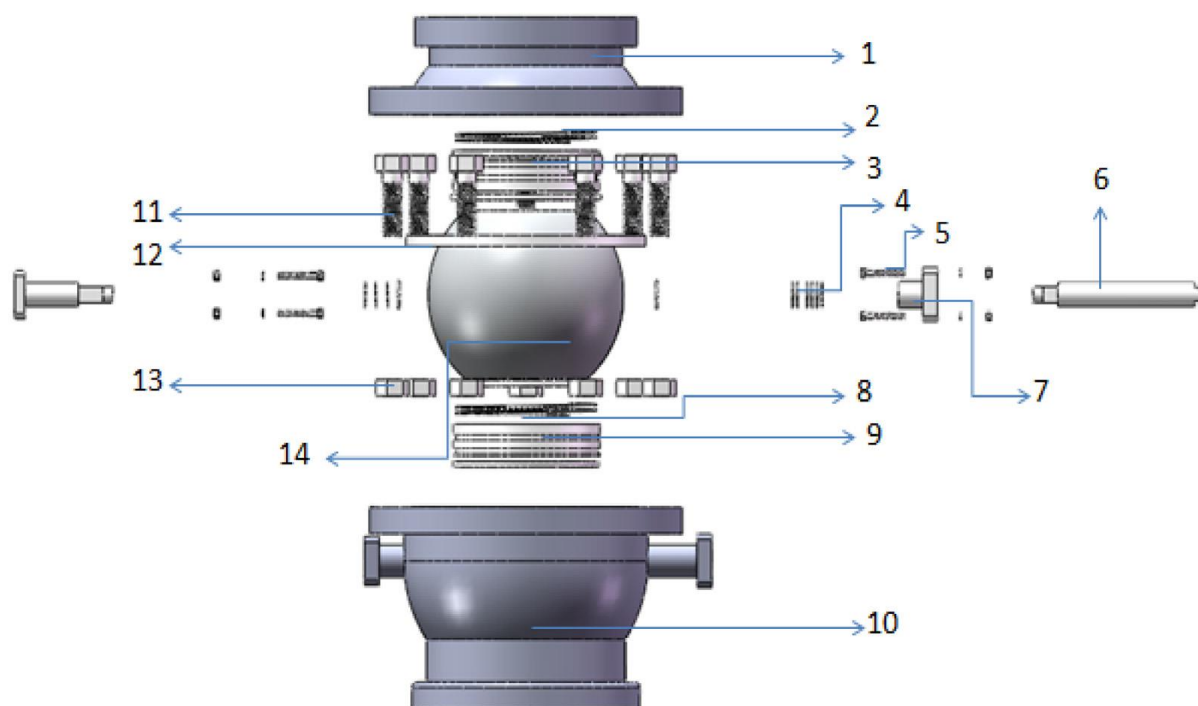
Το επίπεδο εξόδου του δικτύου BP υιοθετεί μια σιγμοειδή συνάρτηση μεταφοράς και η έξοδος του δικτύου BP περιορίζεται στην περιοχή $[-1, +1]$. Ωστόσο, εάν μια γραμμική συνάρτηση *Purelin* χρησιμοποιείται ως συνάρτηση μεταφοράς του επιπέδου εξόδου, οι μεταβλητές και οι συναρτήσεις εξόδου μπορούν να λάβουν αυθαίρετες τιμές. Επομένως, χρησιμοποιείται η σιγμοειδής συνάρτηση για να μεταφέρει τα ενδιάμεσα αποτελέσματα στο κρυφό στρώμα και τα αποτελέσματα εξόδου επεκτείνονται στο τελικό στρώμα εξόδου αυτού του χαρτιού μέσω της συνάρτησης γραμμικής μεταφοράς *Purelin*.

Για το λόγο αυτό, οι παράμετροι νευρωνικών δικτύων είναι πιο επιστημονικές από ό,τι τυχαία επιλεγμένες εμπειρικά. Επιπλέον, ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt (LM)

χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, ο οποίος βελτιώνει την ταχύτητα σύγκλισης του δικτύου, μειώνει το σφάλμα εκπαίδευσης και βελτιώνει την απόδοση του δικτύου.

4.2.4.2 Μοντέλο δικτύου BP συστήματος ποιοτικού ελέγχου στο CPS

Αυτή η μελέτη απεικονίζει την εφαρμογή του συστήματος ποιοτικού ελέγχου CPS σε προϊόντα βαλβίδων μέσω παραδειγμάτων, τα οποία μπορούν να παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες επιλογής, αξιολόγησης και προγνωστικού ελέγχου για τη διαχείριση της επιχείρησης. Συχνά συμβαίνουν διάφορες αστοχίες κατά τη διαδικασία κατασκευής βαλβίδων. Προκειμένου να βελτιωθεί η διάγνωση σφαλμάτων και ο ποιοτικός έλεγχος των προϊόντων βαλβίδας, ταξινομούνται οι τύποι σφαλμάτων των βαλβίδων στη διαδικασία συναρμολόγησης, οι οποίοι εκδηλώνονται συγκεκριμένα στους ακόλουθους τύπους βλαβών: σφάλμα εμφάνισης, διαρροή σώματος βαλβίδας, αστοχία ροπής, διαμπερές σώμα βαλβίδας, αστοχία διαρροής σύνδεσης και ποσότητα της διαρροής που υπερβαίνει το τυπικό (πρότυπο). Οι κατασκευαστές σφαιρικών βαλβίδων πρέπει να ολοκληρώσουν όλα τα μέρη της εργοστασιακής διαδικασίας, τη συναρμολόγηση, τη δοκιμή και τη συσκευασία. Η διαμόρφωση προϊόντος της σφαιρικής βαλβίδας φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Σύμφωνα με τη σχέση περιορισμού του γραφήματος, τα εξαρτήματα-μέρη του σώματος της βαλβίδας στη διαδικασία συναρμολόγησης αναγράφονται στον Πίνακα 4.1.



Εικόνα 4.3: Σχηματικό διάγραμμα εξαρτημάτων για σφαιρική βαλβίδα.

| Serial Number | Εξάρτημα | Serial Number | Εξάρτημα |
|---------------|----------------------------|---------------|--------------------|
| 1 | Άνω σώμα βαλβίδας | 8 | Ελατήριο |
| 2 | Ελατήριο | 9 | Κάτω έδρα βαλβίδας |
| 3 | Στεγανοποιητικός δακτύλιος | 10 | Κάτω σώμα βαλβίδας |
| 4 | Αύλακα στεγανοποίησης | 11 | Μπουλόνι |
| 5 | Στήριγμα διπλού άκρου | 12 | Πάνω έδρα βαλβίδας |

| | | | |
|----------|------------------------|-----------|--------------------------|
| 6 | Ράβδος βαλβίδας | 13 | Παξιμάδι βίδας |
| 7 | Φλάντζα | 14 | Στοιχείο βαλβίδας |

Πίνακας 4.1: Εξαρτήματα-μέρη του σώματος βαλβίδας στη διαδικασία συναρμολόγησης.

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ένα μοντέλο δικτύου διάγνωσης σφαλμάτων και ποιοτικού ελέγχου σώματος βαλβίδας. Αναλύονται οι λόγοι σφάλματος των προαναφερθέντων διαφόρων φαινομένων σφαλμάτων ποιότητας προϊόντος και λαμβάνονται πέντε τύποι αιτιών σφάλματος. Σε αυτήν την παράγραφο, τα y_1 , y_2 , y_3 , y_4 και y_5 αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις πέντε αιτίες σφάλματος όπως, καμία βλάβη, σφάλμα ροπής, σφάλμα ελατηρίου, σφάλμα επεξεργασίας έδρας βαλβίδας και αποτυχία τραχώματος σώματος βαλβίδας. Λαμβάνοντας τις λειτουργίες αστοχίας $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ ως είσοδο, τα στοιχεία X κάθε λειτουργίας αστοχίας αντιπροσωπεύουν τη ροπή στελέχους βαλβίδας, τη ροή βαλβίδας, τη διαρροή πίεσης και τη διαρροή βαλβίδας, αντίστοιχα. Τα δεδομένα που συλλέγονται από κάθε στοιχείο της συνάρτησης σφάλματος χρησιμοποιούνται ως είσοδος του νευρικού δικτύου BP και αυτές οι αιτίες σφαλμάτων χρησιμοποιούνται ως έξοδος του νευρωνικού δικτύου για τη διάγνωση της λειτουργίας σφάλματος. Τα ερευνητικά δεδομένα προέρχονται κυρίως από βάσεις δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ποιότητα, προσομοίωση, τεχνολογία και μέθοδο των κατασκευαστών βαλβίδων κατά τη διαδικασία κατασκευής και λειτουργίας. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τη συσκευή αστοχίας σώματος βαλβίδας φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

| Τύπος σφάλματος | Ροπή στελέχους N | Ροή σώματος L/s | Διαρροή κατά πίεση L | Διαρροή την σώματος βαλβίδας l |
|---|---------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Χωρίς σφάλμα 1 | 95 | 246 | 5.1 | 0.02 |
| Χωρίς σφάλμα 2 | 100 | 245 | 5.4 | 0.01 |
| Χωρίς σφάλμα 3 | 96 | 244 | 5.0 | 0.03 |
| Χωρίς σφάλμα 4 | 90 | 245 | 5.1 | 0.05 |
| Χωρίς σφάλμα 5 | 94 | 243 | 5.2 | 0.02 |
| Αστοχία ροπής 1 | 104 | 231 | 5.0 | 0.02 |
| Αστοχία ροπής 2 | 100 | 249 | 5.0 | 0.08 |
| Αστοχία ροπής 3 | 101 | 210 | 5.4 | 0.04 |
| Αστοχία ροπής 4 | 95 | 250 | 5.7 | 0.03 |
| Αστοχία ροπής 5 | 100 | 240 | 5.2 | 0.02 |
| Σφάλμα ελατηρίου 1 | 95 | 255 | 5.1 | 0.02 |
| Σφάλμα ελατηρίου 2 | 100 | 245 | 5.0 | 0.03 |
| Σφάλμα ελατηρίου 3 | 105 | 265 | 7.1 | 0.05 |
| Σφάλμα ελατηρίου 4 | 112 | 288 | 6.8 | 0.10 |
| Σφάλμα ελατηρίου 5 | 111 | 270 | 6.0 | 0.04 |
| Σφάλμα επεξεργασίας έδρας βαλβίδας 1 | 102 | 245 | 7.0 | 0.10 |
| Σφάλμα επεξεργασίας έδρας βαλβίδας 2 | 96 | 249 | 6.9 | 0.12 |
| Σφάλμα επεξεργασίας έδρας βαλβίδας 3 | 100 | 252 | 6.9 | 0.11 |
| Σφάλμα επεξεργασίας έδρας βαλβίδας 4 | 110 | 260 | 7.0 | 0.13 |
| Σφάλμα επεξεργασίας | 91 | 242 | 6.6 | 0.03 |

| | | | | |
|-----------------------|----|-----|-----|------|
| έδρας βαλβίδας 5 | | | | |
| Αποτυχία τραχώματος 1 | 96 | 245 | 5.3 | 0.10 |
| Αποτυχία τραχώματος 2 | 91 | 241 | 5.0 | 0.08 |
| Αποτυχία τραχώματος 3 | 97 | 252 | 6.0 | 0.08 |
| Αποτυχία τραχώματος 4 | 92 | 250 | 5.0 | 0.04 |
| Αποτυχία τραχώματος 5 | 94 | 245 | 5.7 | 0.11 |

Πίνακας 4.2: Δεδομένα που συλλέχθηκαν για αστοχία σώματος βαλβίδας.

Λόγω ορισμένων παραγόντων που προκαλούνται από την τεχνολογία επεξεργασίας και τη διαδικασία συναρμολόγησης, το κατασκευαστικό λάθος στην ποιότητα του προϊόντος είναι αναπόφευκτο. Ορισμένες αντίστοιχες μέθοδοι ποιοτικού ελέγχου προτάθηκαν για τη βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος σύμφωνα με τους διάφορους τύπους βλαβών. Από τον Πίνακα 4.2, επιλέγουμε 20 ομάδες από τα 25 σύνολα δεδομένων ως δεδομένα εισόδου δείγματος. Στη συνέχεια, παίρνουμε 20 σετ δειγμάτων τιμών δεδομένων μέτρησης της ετικέτας 1, της ετικέτας 2, της ετικέτας 3 και της ετικέτας 4 ως δείγματα εκπαίδευσης και τα δεδομένα μέτρησης της ετικέτας 5, ως δείγματα, τα οποία δοκιμάστηκαν για τα πακέτα δεδομένων νευρωνικών δικτύων στο MATLAB για διάγνωση. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε το νευρωνικό δίκτυο για διαφορετικούς τύπους σφάλματος του σώματος βαλβίδας και ορίστηκε το διάνυσμα δείγματος εισόδου. Παρουσιάζεται το κύριο πρόγραμμα του MATLAB, για παράδειγμα, $p_{11} = [95 \ 246 \ 5.1 \ 0.02]'$, $p_{12} = [100 \ 245 \ 5.4 \ 0.01]'$.

Ομοίως λοιπόν, μπορούμε να πάρουμε την απλούστερη απάντηση στα παρακάτω.

$\rho = [\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{14}, \rho_{21}, \rho_{22}, \rho_{23}, \rho_{24}, \rho_{31}, \rho_{32}, \rho_{33}, \rho_{34}, \rho_{41}, \rho_{42}, \rho_{43}, \rho_{44}, \rho_{51}, \rho_{52}, \rho_{53}, \rho_{54}]$;

| Αριθμός | Τύπος σφάλματος | Διάνυσμα εξόδου |
|---------|---|-----------------|
| 1 | Κανονική κατάσταση | (1 0 0 0 0) |
| 2 | Αστοχία ροπής | (0 1 0 0 0) |
| 3 | Σφάλμα ελατηρίου | (0 0 1 0 0) |
| 4 | Αποτυχία επεξεργασίας έδρας βαλβίδας | (0 0 0 1 0) |
| 5 | Τράχωμα/Πόρος | (0 0 0 0 1) |

Πίνακας 4.3: Τύπος σφάλματος και διάνυσμα εξόδου.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του δικτύου BP για τον υπολογισμό και την ανάλυση των δεδομένων, κωδικοποιείται ο τύπος σφάλματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Στο επόμενο βήμα, τα αναμενόμενα δεδομένα εξόδου είναι ένα 5-διάστατο διάνυσμα και ένας τύπος σφάλματος bit αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο σφάλμα. Στη συνέχεια, το επιθυμητό διάνυσμα εξόδου μπορεί να οριστεί ως:

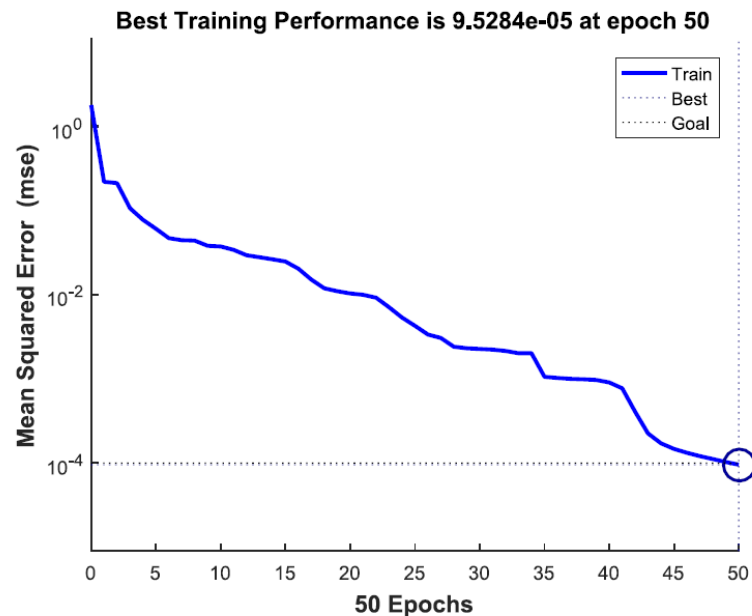
$t_{11} = [10000]'$; $t_{12} = [10000]'$; $t_{13} = [10000]'$; $t_{14} = [10000]'$;
 $t_{21} = [01000]'$; $t_{22} = [01000]'$; $t_{23} = [01000]'$; $t_{24} = [01000]'$;
 $t_{31} = [00100]'$; $t_{32} = [00100]'$; $t_{33} = [00100]'$; $t_{34} = [00100]'$;
 $t_{41} = [00010]'$; $t_{42} = [00010]'$; $t_{43} = [00010]'$; $t_{44} = [00010]'$;
 $t_{51} = [00001]'$; $t_{52} = [00001]'$; $t_{53} = [00001]'$; $t_{54} = [00001]'$;
 $t = [t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{24}, t_{31}, t_{32}, t_{33}, t_{34}, t_{41}, t_{42}, t_{43}, t_{44}, t_{51}, t_{52}, t_{53}, t_{54}]$;

| Αριθμός επιπέδων δικτύου | Αριθμός νευρώνων σε κάθε στιβάδα | Λειτουργία μεταφοράς | Αλγόριθμος εκπαίδευσης |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Τρία επίπεδα | [4,16,5] | {'Logsin', 'Purelin'} | 'Trainlm' |

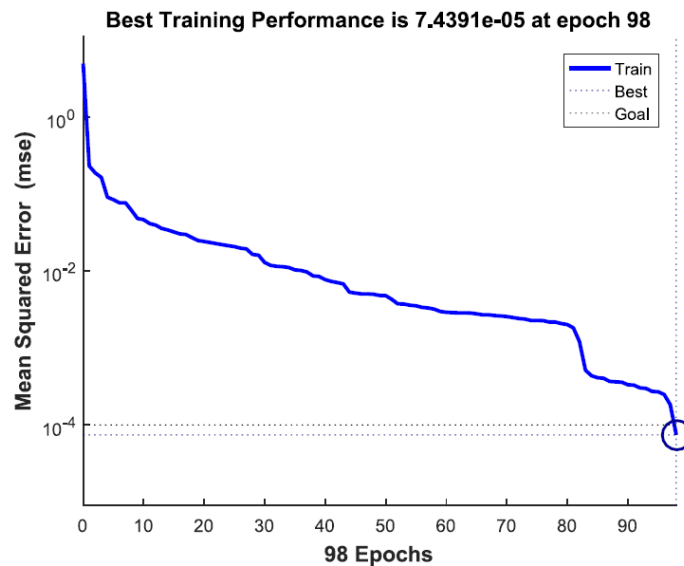
Πίνακας 4.4: Ρύθμιση παραμέτρων νευρωνικού δικτύου BP.

Σύμφωνα με την αρχή της επιλογής παραμέτρων με βάση την αρχή μοντελοποίησης του δικτύου BP, οι παράμετροι ορίζονται στον Πίνακα 4.4.

Αφού ο καθορισμός του νευρικού δικτύου BP εκπαιδεύτηκε, εφαρμόστηκαν τα διανύσματα δειγμάτων εισόδου και εξόδου και ο στόχος σφάλματος ορίστηκε ως 0.0001 (10^{-4}) για την εκπαίδευση του δικτύου. Μετά την εκτέλεση της παραπάνω εντολής του MATLAB, μπορεί να φανεί, στα παρακάτω γραφήματα, ότι ο αριθμός των κόμβων κρυφών επιπέδων είναι 13 και το επαναληπτικό δίκτυο έχει φτάσει τον αναμενόμενο στόχο σφάλματος κατά 50 φορές και το δίκτυο με 16 κόμβους κρυφού επιπέδου έχει φτάσει στον αναμενόμενο στόχο σφάλματος μέσω 98 επαναληπτικών δικτύων. Οι καμπύλες σφάλματος κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας με τον αριθμό των κρυφών κόμβων στρώματος 13 και 16 φαίνονται χωριστά στα Σχήματα 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη αλλαγής σφάλματος με τον αριθμό των κόμβων των 13 κρυφών επιπέδων.



Σχήμα 4.2: Καμπύλη αλλαγής σφάλματος με τον αριθμό των κόμβων των 16 κρυφών επιπέδων.

Με βάση το καθιερωμένο μοντέλο νευρωνικού δικτύου, επιλέγονται τα δείγματα σφάλματος σώματος βαλβίδας με διαφορετικά δεδομένα δειγμάτων εκπαίδευσης για τη διάγνωση σφαλμάτων του ποιοτικού ελέγχου του προϊόντος. Τα δεδομένα πέντε τρόπων αστοχίας βαλβίδας χρησιμοποιούνται ως δεδομένα διαγνωστικού δείγματος από το πείραμα. Τα αρχικά δεδομένα του δείγματος εισόδου κανονικοποιούνται και τα δεδομένα του δείγματος εισόδου φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

| Αριθμός δειγμάτων | <i>N</i> | <i>L/S</i> | <i>L</i> | <i>I</i> |
|----------------------|----------|------------|----------|----------|
| Δείγμα 1 | 100 | 249 | 5.6 | 0.02 |
| Δείγμα 2 | 100 | 240 | 5.3 | 0.01 |
| Δείγμα 3 | 102 | 263 | 5.7 | 0.03 |
| Δείγμα 4 | 102 | 254 | 7.1 | 0.03 |
| Δείγμα 5 | 101 | 254 | 5.8 | 0.12 |

Πίνακας 4.5: Δείγματα επικύρωσης.

Έτσι, ο αριθμός των κρυφών κόμβων στρώματος είναι 13 και τα αποτελέσματα εξόδου φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Ομοίως, ο αριθμός των κρυφών κόμβων στρώματος είναι 16 και η έξοδος φαίνεται στον Πίνακα 4.7.

| ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ | ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | | | | | ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ |
|-----------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
| ΤΥΠΟΣ 1 | 0.9934 | 0.0055 | 0.0037 | 0.0080 | 0.0016 | Τύπος 1 |
| ΤΥΠΟΣ 2 | 1.0043 | -0.0055 | -0.0036 | -0.0018 | 0.0002 | Τύπος 1 |
| ΤΥΠΟΣ 3 | 0.0019 | 0.00002 | 0.9990 | -0.0022 | 0.0002 | Τύπος 3 |
| ΤΥΠΟΣ 4 | 0.9998 | -0.0034 | 0.0011 | -0.0020 | 0.0003 | Τύπος 1 |
| ΤΥΠΟΣ 5 | 0.9997 | -0.0035 | 0.0024 | -0.0051 | -0.0005 | Τύπος 1 |

Πίνακας 4.6: Διαγνωστικά αποτελέσματα 13 κόμβων κρυφών επιπέδων.

| ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ | ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | | | | | ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ |
|-----------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
| ΤΥΠΟΣ 1 | 0.9984 | 0.0010 | -0.0016 | 0.0017 | 0.0003 | Τύπος 1 |
| ΤΥΠΟΣ 2 | -0.0066 | 1.0019 | -0.0023 | 0.0010 | 0.0041 | Τύπος 2 |
| ΤΥΠΟΣ 3 | 0.0012 | 0.0033 | 0.9954 | 0.0017 | -0.0009 | Τύπος 3 |
| ΤΥΠΟΣ 4 | 0.0020 | -0.0005 | -0.0004 | 0.9973 | 0.0020 | Τύπος 4 |
| ΤΥΠΟΣ 5 | -0.0019 | 0.0001 | -0.0004 | -0.0015 | 1.0019 | Τύπος 5 |

Πίνακας 4.7: Διαγνωστικά αποτελέσματα 16 κόμβων κρυφών επιπέδων.

Με βάση τους Πίνακες 4.6 και 4.7, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών συμπίπτουν με τα πειραματικά. Τα αποτελέσματα μοντελοποίησης ενός νευρώνα και 16 νευρώνων είναι ακριβή με πολλή εκπαίδευση. Έτσι, είναι προφανές ότι η δικτυακή διάγνωση 16 νευρώνων είναι πιο ακριβής. Μπορεί επίσης να φανεί ότι το αποτέλεσμα της διάγνωσης δικτύου μετά την εκπαίδευση είναι σωστό. Από την άλλη, επισημαίνεται ότι ο αριθμός των επιλεγμένων νευρώνων θα επηρεάσει και τη διαγνωστική απόδοση και τον ποιοτικό έλεγχο του κρυφού στρώματος του δικτύου BP. Με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής, υποστηρίζεται ότι το σύστημα ποιοτικού ελέγχου προϊόντων είναι ένα εφικτό μέσο για τη διαδικασία παραγωγής βιομηχανικών βαλβίδων στο CPS. Στην περίπτωση εύλογης ρύθμισης νευρώνων, το νευρωνικό δίκτυο BP μπορεί να πραγματοποιήσει διάγνωση σφαλμάτων της ποιότητας του προϊόντος χρησιμοποιώντας τα δεδομένα παρακολούθησης που συλλέγονται. Έτσι, τα βέλτιστα προγράμματα του νευρωνικού δικτύου BP μπορούν να έχουν νόημα στη μελλοντική εφαρμογή της πρόβλεψης της κατάστασης της ποιότητας του προϊόντος [24].

Παράρτημα - Επεξήγηση χρησιμοποιούμενων όρων

3R, Reduction, Reuse, Recycling - Μείωση, Επαναχρησιμοποίηση, Ανακύκλωση

6R, Reduction, Reuse, Recovery, Redesign, Reconstruction, Recycling –

Μείωση, Επαναχρησιμοποίηση, Ανάκτηση, Επανασχεδιασμός, Ανακατασκευή, Ανακύκλωση

OECD, Organization for Economic Co-operation and Development –

Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης,

Ενέργεια KPI, Key Performance Indicators ή αλλιώς Βασικοί Δείκτες Απόδοσης

Η ενέργεια KPI είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος επίβλεψης, ανάλυσης και βελτιστοποίησης κάθε είδους διαδικασίας σχετική με την ενέργεια. Ως επί τον πλείστον, αυτοί οι δείκτες απόδοσης χρησιμοποιούνται από προμηθευτές ενέργειας καθώς και από κατασκευαστές που χρειάζονται ενέργεια ως βασικό στοιχείο στη διαδικασία παραγωγής τους.

Lead and Cycle times- χρόνοι παράδοσης και κύκλου

Με λίγα λόγια, ο χρόνος κύκλου μετρά τον χρόνο που χρειάζεται μια ομάδα για να φτιάξει ένα προϊόν, ενώ ο χρόνος παράδοσης μετρά το χρόνο μεταξύ της παραγγελίας του πελάτη και της εκπλήρωσης της παραγγελίας. Ο χρόνος παράδοσης είναι πάντα μεγαλύτερος από τον χρόνο κύκλου, επειδή ο χρόνος κύκλου ταιριάζει στο χρονοδιάγραμμα του χρόνου παράδοσης.

CIP, διαδικασίας συνεχούς βελτίωσης ή continual improvement process

Μια διαδικασία συνεχούς βελτίωσης (συντομογραφία CIP ή CI) είναι μια συνεχής προσπάθεια βελτίωσης προϊόντων, υπηρεσιών ή διαδικασιών. Αυτές οι προσπάθειες μπορούν να επιδιώκουν «αυξητική» βελτίωση με την πάροδο του χρόνου ή «επαναστατική» βελτίωση ταυτόχρονα. Οι διαδικασίες παράδοσης (τιμές για τον πελάτη) αξιολογούνται και βελτιώνονται συνεχώς υπό το πρίσμα της αποδοτικότητας, της αποτελεσματικότητας και της ευελιξίας τους.

ICT, Information and Communication Technologies ή Τεχνολογία Πληροφοριών και Επικοινωνιών

Η τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών είναι ένας επεκτατικός όρος για την τεχνολογία πληροφοριών (IT) που τονίζει τον ρόλο των ενοποιημένων επικοινωνιών και την ενοποίηση των τηλεπικοινωνιών (τηλεφωνικές γραμμές και ασύρματα σήματα) και των υπολογιστών, καθώς και του απαραίτητου εταιρικού λογισμικού, του ενδιάμεσου λογισμικού, αποθήκευση και οπτικοακουστικό υλικό, που επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν πρόσβαση, αποθήκευση, μετάδοση, κατανόηση και χειρισμό πληροφοριών.

TPS, Toyota Production System ή Σύστημα Παράγωγής της Toyota

Πρόκειται για μια πρωτότυπη φιλοσοφία κατασκευής που στοχεύει στην εξάλειψη των απορριμμάτων και στην επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης – αυτό που συχνά αποκαλείται «Λιτό» ή «Just-In-Time» σύστημα.

CPS, Cyber-physical systems ή Κυβερνοφυσικά Συστήματα

Ένα cyber-physical system ή ένα ευφυές σύστημα είναι ένα σύστημα υπολογιστή στο οποίο ένας μηχανισμός ελέγχεται ή παρακολουθείται από αλγόριθμους που βασίζονται σε υπολογιστή. Στα κυβερνοφυσικά συστήματα, τα φυσικά στοιχεία και τα στοιχεία λογισμικού είναι βαθιά συνυφασμένα, ικανά να λειτουργούν σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες, να επιδεικνύουν πολλαπλές και ξεχωριστές συμπεριφορικές μεθόδους και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τρόπους που αλλάζουν ανάλογα με το πλαίσιο. Ο έλεγχος της διαδικασίας αναφέρεται συχνά ως ενσωματωμένα συστήματα. Στα ενσωματωμένα συστήματα, η έμφαση τείνει να δίνεται περισσότερο στα υπολογιστικά στοιχεία και λιγότερο σε

μια έντονη σύνδεση μεταξύ των υπολογιστικών και των φυσικών στοιχείων. Το CPS είναι επίσης παρόμοιο με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), που μοιράζεται την ίδια βασική αρχιτεκτονική. Ωστόσο, το CPS παρουσιάζει υψηλότερο συνδυασμό και συντονισμό μεταξύ φυσικών και υπολογιστικών στοιχείων.

QC, Quality Characteristics ή Ποιοτικά Χαρακτηριστικά

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά είναι οι ιδιότητες ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας που απαιτούνται για την ικανοποίηση των πελατών. Μπορούν να σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά που περιμένουν ή απαιτούν οι πελάτες από την υπηρεσία.

DT, Digital Twin ή Ψηφιακό δίδυμο

Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, διαδικασίας ή υπηρεσίας. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να είναι ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός αντικειμένου στον φυσικό κόσμο, όπως ένας κινητήρας τζετ ή αιολικά πάρκα, ή ακόμη μεγαλύτερα αντικείμενα όπως κτίρια ή ακόμα και ολόκληρες πόλεις. Εκτός από τα φυσικά περιουσιακά στοιχεία, η ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή διεργασιών με σκοπό τη συλλογή δεδομένων για την πρόβλεψη της απόδοσής τους. Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι, στην ουσία, ένα πρόγραμμα υπολογιστή που χρησιμοποιεί δεδομένα πραγματικού κόσμου για να δημιουργήσει προσομοιώσεις που μπορούν να προβλέψουν την απόδοση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας. Αυτά τα προγράμματα μπορούν να ενσωματώσουν το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Industry 4.0), την τεχνητή νοημοσύνη και τα αναλυτικά στοιχεία λογισμικού για τη βελτίωση της απόδοσης. Με την πρόοδο της μηχανικής μάθησης και παραγόντων όπως τα μεγάλα δεδομένα, αυτά τα εικονικά μοντέλα έχουν γίνει βασικό στοιχείο της σύγχρονης μηχανικής για την προώθηση της καινοτομίας και τη βελτίωση της απόδοσης. Εν ολίγοις, η δημιουργία ενός μπορεί να επιτρέψει την ενίσχυση των στρατηγικών τάσεων της τεχνολογίας, να αποτρέψει δαπανηρές αστοχίες σε φυσικά αντικείμενα και επίσης, χρησιμοποιώντας προηγμένες αναλυτικές, εποπτικές και προγνωστικές ικανότητες, διαδικασίες και υπηρεσίες δοκιμών. (<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-digital-twin>)

RFID,

Το RFID είναι τα αρχικά του όρου Radio Frequency Identification, η απόδοση του στα ελληνικά ορίζεται ως «ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων». Τα συστήματα RFID αποτελούν ένα υποσύνολο των Συστημάτων Αυτόματου Προσδιορισμού (Automatic Identification Systems). Ειδικότερα λειτουργεί ως γενικός όρος των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για να προσδιορίσουν αυτόματα ανθρώπους ή αντικείμενα και αποτελεί την τεχνολογική εξέλιξη των ραβδωτών κωδίκων (barcodes).

CE, Circular Economy - Κυκλική Οικονομία

Η κυκλική οικονομία είναι ένα παραγωγικό και καταναλωτικό μοντέλο που αποσκοπεί στην αύξηση της αποδοτικότητας των πρώτων υλών, μέσω της χρήσης των υλικών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με παράλληλη ελαχιστοποίηση της χρήσης φυσικών πόρων.

SGI 4.0

Το πλαίσιο Sustainability Green Industry (SGI) 4.0 αποτυπώνει τις σχέσεις του Industry 4.0, των πράσινων διαδικασιών και της βιωσιμότητας στην κατασκευή. Το πλαίσιο διαρθρώνεται σε τρία κατακόρυφα επίπεδα: τεχνολογικό, διαδικασία και αναπτυξιακό, ενσωματωμένα μέσω της κυκλικής οικονομίας.

MRR, Material Removal Rate ή αλλιώς ρυθμός αφαίρεσης υλικού

Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR) είναι η ποσότητα υλικού που αφαιρείται ανά μονάδα χρόνου (συνήθως ανά λεπτό) κατά την εκτέλεση εργασιών μηχανικής

κατεργασίας, όπως η χρήση τόννου ή φρέζας. Όσο περισσότερο υλικό αφαιρείται ανά λεπτό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Το MRR είναι ένας μοναδικός αριθμός που επιτρέπει να γίνει αυτό.

CO₂PE!, Cooperative Effort in Process Emission ή Συνεταιριστική Προσπάθεια στη Διεργασία Εκπομπών

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι ελλείψεις, μια παγκόσμια κοινοπραξία πανεπιστημίων και ερευνητικών ιδρυμάτων ξεκίνησε την πρωτοβουλία CO₂PE! Η πρωτοβουλία αυτή έχει ως στόχο το συντονισμό των διεθνών προσπάθειών με στόχο την τεκμηρίωση και ανάλυση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ένα ευρύ φάσμα διαθέσιμων και αναδυόμενων παραγωγικών διαδικασιών όσον αφορά τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές και την παροχή κατευθυντήριων γραμμών για τη βελτίωση αυτών των διαδικασιών. Εκτός από την ανάλυση του κύκλου ζωής, η σε βάθος ανάλυση διεργασιών παρέχει επίσης πληροφορίες για επιτεύξιμα μέτρα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προς τους κατασκευαστές μηχανών και συστάσεις οικολογικού σχεδιασμού για τους προγραμματιστές προϊόντων.

Run-time operations ή αλλιώς λειτουργίες χρόνου εκτέλεσης

Στον προγραμματισμό υπολογιστών, ένα σύστημα χρόνου εκτέλεσης ή ένα περιβάλλον χρόνου εκτέλεσης είναι ένα υποσύστημα που υπάρχει τόσο στον υπολογιστή όπου δημιουργείται ένα πρόγραμμα, όσο και στους υπολογιστές όπου πρόκειται να εκτελεστεί το πρόγραμμα. Το όνομα προέρχεται από τη διαίρεση χρόνου μεταγλώττισης και χρόνου εκτέλεσης από μεταγλωττισμένες γλώσσες, η οποία διακρίνει ομοίως τις διεργασίες του υπολογιστή που εμπλέκονται στη δημιουργία ενός προγράμματος (μεταγλώττιση) και στην εκτέλεσή του στο μηχάνημα προορισμού (χρόνος εκτέλεσης). Με την Έξυπνη Διαχείριση, μπορεί κανείς να διαχειριστεί πολύπλοκες λειτουργίες του συστήματος με εργαλεία οπτικοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Η σταδιακά ελεγχόμενη εφαρμογή αυτόνομων δυνατοτήτων βοηθά να στην μείωση του κόστους διαχείρισης πόρων.

Jog

Η λειτουργία JOG ονομάζεται επίσης λειτουργία τζόκινγκ. Σε αυτή τη λειτουργία, η μηχανή CNC χρησιμοποιείται για χειροκίνητη λειτουργία. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται για να κάνει τη μηχανή CNC πολύ πιο γρήγορη. Δηλαδή, είναι μια λειτουργία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετακινηθεί ο άξονας με έναν καθορισμένο ρυθμό τροφοδοσίας. Συχνά υπάρχουν κουμπιά ειδικά για κάθε άξονα.

Καρουζέλ

Το CAROUSEL είναι μια αυτόματη οριζόντια κοπή με περιστρεφόμενο τραπέζι. Μπορεί να κόψει φύλλα οποιουδήποτε πάχους γρήγορα και αυτόματα. Το τραπέζι διαθέτει σύστημα κενού και ειδική επίστρωση για μέγιστο κράτημα ακόμα και στην υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής και κάθε κύκλος κοπής μπορεί να προγραμματιστεί πλήρως.

SEC, specific energy consumption ή αλλιώς ειδική κατανάλωση ενέργειας

Το SEC ορίζεται ως ο λόγος της kWh ενέργειας που καταναλώνεται προς τη μονάδα βάρους του προϊόντος που παράγεται από αυτήν την κατανάλωση ενέργειας. Αντιπροσωπεύεται από κιλοβατώρα ανά κιλό (kWh/kg) ή κιλοβατώρα ανά λίβρα (kWh/lb).

Υπολογιστικές τεχνικές ANN, SVM, NN

ANN (Artificial neural networks)

NN (neural networks)

SVM (Support Vector Machine)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs), που συνήθως ονομάζονται απλά νευρωνικά δίκτυα (NNs) ή, πιο απλά, νευρωνικά δίκτυα, είναι υπολογιστικά συστήματα εμπνευσμένα από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα που αποτελούν τους εγκεφάλους των ζώων.

Το ANN είναι μια τεχνική μοντελοποίησης εμπνευσμένη από το ανθρώπινο νευρικό σύστημα που επιτρέπει τη μάθηση με παράδειγμα από αντιπροσωπευτικά δεδομένα που περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο ή μια διαδικασία λήψης αποφάσεων. Τα ANN αποτελούνται από ένα στρώμα κόμβων εισόδου και στρώμα κόμβων εξόδου, που συνδέονται με ένα ή περισσότερα στρώματα κρυφών κόμβων.

Το Support Vector Machine (SVM) ή αλλιώς Υποστήριξη Διανυσματικής Μηχανής είναι ένας εποπτευόμενος αλγόριθμος μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται τόσο για ταξινόμηση όσο και για παλινδρόμηση. Αν και λέμε προβλήματα παλινδρόμησης, είναι επίσης το καλύτερο για ταξινόμηση. Ο στόχος του αλγορίθμου SVM είναι να βρει ένα υπερ-επίπεδο σε έναν χώρο N-διάστατο που ταξινομεί ευδιάκριτα τα σημεία δεδομένων.

Δίκτυο BP (Back Propagation ή αλλιώς αλγόριθμο οπισθοδρομικής διάδοσης)

Ο αλγόριθμος νευρωνικών δικτύων *οπισθοδρομικής διάδοσης* (BP) είναι ένα δίκτυο πολλαπλών επιπέδων τροφοδοσίας που εκπαιδεύεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο αντίστροφης διάδοσης σφαλμάτων και είναι ένα από τα πιο ευρέως εφαρμοσμένα μοντέλα νευρωνικών δικτύων.

DMU 60P,

Αυτό το Universal Machining Center DECKEL MAHO DMU 60P κατασκευάστηκε το 1999 στη Γερμανία. Μετρά συνολικά 40810 ώρες παραγωγής. Λειτουργεί μέσω μονάδας ελέγχου Heidenhain MillPlus V410 (πρόγραμμα). Αυτό το μηχάνημα μπορεί να λειτουργήσει με ταχύτητα άξονα έως 8000 rpm. Περιλαμβάνει 25 θήκες εργαλείων.

Δίκτυο Petri (CTOPN– Colored Timed Object-Petri Net)

Ένα δίκτυο Petri, γνωστό και ως δίκτυο τόπου/μετάβασης (PT), είναι μία από τις πολλές γλώσσες μαθηματικής μοντελοποίησης για την περιγραφή καταναμημένων συστημάτων. Είναι μια κατηγορία διακριτών δυναμικών συστημάτων συμβάντων. Ένα δίκτυο Petri είναι ένα κατευθυνόμενο διμερές γράφημα που έχει δύο τύπους στοιχείων, θέσεις και μεταβάσεις, που απεικονίζονται ως λευκοί κύκλοι και ορθογώνια, αντίστοιχα.

Ένα χρονισμένο έγχρωμο δίκτυο Petri είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που είναι κατάλληλο για τη μοντελοποίηση διακριτών δυναμικών συστημάτων.

PSS, Product-service systems

Τα συστήματα προϊόντων-υπηρεσιών (PSS) είναι επιχειρηματικά μοντέλα που παρέχουν συνεκτική παράδοση προϊόντων και υπηρεσιών. Τα μοντέλα PSS αναδεικνύονται ως μέσο για τη συλλογική κατανάλωση τόσο προϊόντων όσο και υπηρεσιών, με στόχο τα ευνοϊκά για το περιβάλλον αποτελέσματα.

MQL, Minimum quantity lubrication - Ελάχιστη ποσότητα λίπανσης

Η MQL είναι μια καθαρή τεχνική κατασκευής η οποία είναι επίσης γνωστή ως σχεδόν ξηρή μηχανική κατεργασία. Στο MQL, μια δραστικά μειωμένη ποσότητα υγρού κοπής ψεκάζεται στη ζώνη κοπής. Ένας ρυθμός ροής στην περιοχή από 10-100 mL/h εφαρμόζεται συνήθως για τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές

Εργαλειομηχανές Mori Seiki,

Η Mori Seiki ασχολείται με Τόρνοι CNC, Κέντρα Οριζόντιας Κατεργασίας CNC, Κέντρα Κατακόρυφης Κατεργασίας CNC και άλλους τύπους μηχανημάτων CNC.

Αυτή η μάρκα διαθέτει μια τεράστια συλλογή μηχανημάτων CNC που κυμαίνονται από τόνους 2 αξόνων έως τόνους CNC πολλαπλών αξόνων έως κέντρα κατεργασίας CNC πολλαπλών αξόνων.

TBL, Triple Bottom Line ή ελληνικά, τριπλό αποτέλεσμα

Το TBL είναι ένα λογιστικό πλαίσιο που ενσωματώνει τρεις διαστάσεις απόδοσης: κοινωνική, περιβαλλοντική και οικονομική. Αυτό διαφέρει από τα παραδοσιακά πλαίσια αναφοράς, καθώς περιλαμβάνει οικολογικά (ή περιβαλλοντικά) και κοινωνικά μέτρα που μπορεί να είναι δύσκολο να οριστούν κατάλληλα μέσα μέτρησης. Οι διαστάσεις TBL ονομάζονται επίσης (τρία) 3Ps: άνθρωποι (people), πλανήτη (planet) και κέρδη (profits). Ένα TBL επιδιώκει να μετρήσει το επίπεδο δέσμευσης μιας εταιρείας για την εταιρική κοινωνική ευθύνη και τον αντίκτυπό της στο περιβάλλον με την πάροδο του χρόνου.

Εφαρμογές AI (Artificial Intelligence ή αλλιώς Τεχνητή Νοημοσύνη)

Η τεχνητή νοημοσύνη είναι η προσομοίωση των διαδικασιών ανθρώπινης νοημοσύνης από μηχανές, ειδικότερα συστήματα υπολογιστών. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης περιλαμβάνουν έμπειρα συστήματα, επεξεργασία φυσικής γλώσσας, αναγνώριση ομιλίας και μηχανική όραση.

Βιβλιογραφία

- [1] Chryssolouris G. Manufacturing Systems: Theory and Practice 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, 2006.
- [2] EIA, 2012. Annual Energy Review 2011, DOE/EIA-0384.
- [3] Int. Energy Agency (IEA), 2008. Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency, Key Insights from IEA Indicator Analysis.
- [4] Fysikopoulos A., Papacharalampopoulos A., Pastras G., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Energy Efficiency of Manufacturing Processes : A Critical Review, Greece, 2013.
- [5] Olukorede Tijani A., Khumbulani M., Ramatsetse Innocent B. Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0., South Africa, 2019.
- [6] Lenz J, Kotschenreuther J, Westkaemper E. Energy Efficiency in Machine Tool Operation by Online Energy Monitoring Capturing and Analysis, 2017.
- [7] Thoben K.D, Wiesner S, Wuest T. Industrie 4.0 and Smart Manufacturing. A Review of Research Issues and Application, 2017.
- [8] Commission Staff Working Document, accompanying the document “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Industrial Policy – Communication Update: A Stronger European Industry for Growth and Economic Recovery”. Brussels, 2012.
- [9] Fysikopoulos A. Energy Efficiency in Manufacturing Systems, Greece, 2014.
- [10] WWF (2010) Living planet report.
- [11] Fysikopoulos A., Pastras G., Alexopoulos T., Chryssolouris G. On a generalized approach to manufacturing energy efficiency, 2014.
- [12] The World Commission on Environment and Development (1987) Our common future.
- [13] International Trade Administration (2007) How does commerce define sustainable manufacturing? U.S. Department of Commerce.
- [14] Abdelaziz EA, Saidur R, Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
- [15] IEA (2009) World Energy Outlook. IEA Publications, France.
- [16] IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions. France.
- [17] EC (2009a) European SMEs under Pressure. Annual Report on EU Small and Medium Sized Enterprises 2009.
- [18] The Economist Intelligence Unit (2013) Intelligent manufacturing: targeting better energy efficiency. ABB.
- [19] Dombrowski Uwe, Richter T., Krankel P., TU Braunschweig, Germany, 2017
- [20] VDI 2870: Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung, 2012.
- [21] Glass, R.; Seifermann, S.; Metternich, J.: The Spread of Lean Production in the Assembly, Process and Machining Industry, 2016.
- [22] Staufen AG: 25 Jahre Lean Management. Lean Gestern, Heute und Morgen, 2015.
- [22] H.A. Kholidy. Autonomous mitigation of cyber risks in the cyber-physical systems, 2021.
- [23] A. Abdelwahab, W. Lucia, A. Youssef. Covert channels in cyber-physical systems, 2021.

- [24] Jihong Pang, Nan Zhang, Quan Xiao, Faqun Qi, Xiaobo Xue. A new intelligent and data-driven product quality control system of industrial valve manufacturing process in CPS. China, 2021.
- [25] N. Aguila-Camacho, M.A. Duarte-Mermoud, M.E. Orchard. Fractional order controllers for throughput and product quality control in a grinding mill circuit, 2020.
- [26] K.T. Park, J. Lee, H.-J. Kim, S. Noh. Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production, 2020.
- [27] Jaroslav Vrchota, Martin Pech, Ladislav Rolinek, Jiri Bednar. Sustainability Outcomes of Green Processes in Relation to Industry 4.0 in Manufacturing: Systematic Review. Czech Republic, 2020.
- [28] Ghobakhloo M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability, 2020.
- [29] Couckuyt D., Van Looy A. Green BPM as a Business-Oriented Discipline: A Systematic Mapping Study and Research Agenda, 2019.
- [30] Couckuyt D., Van Looy A. A systematic review of Green Business Process Management, 2019.
- [31] Kolb M.V. Green Organic Chemistry and Its Interdisciplinary Applications. Taylor Francis: Boca Raton, FL, USA, 2017.
- [32] Mendoza-Fong R.J., García-Alcaraz L.J., Díaz-Reza R.J., Jiménez-Macías E., Blanco-Fernández J. The Role of Green Attributes in Production Processes as Well as Their Impact on Operational, Commercial, and Economic Benefits, 2019.
- [33] Shi Q., Lai X.D. Identifying the underpin of green and low carbon technology innovation research: A literature review from 1994 to 2010, 2013.
- [34] Schiederig T., Tietze F., Herstatt C. Green innovation in technology and innovation management-an exploratory literature review, 2012.
- [35] Shaikh Z. Towards Sustainable Development: A Review of Green Technologies, 2017.
- [36] Xie X., Huo J., Zou H. Green process innovation, green product innovation, and corporate financial performance: A content analysis method, 2019.
- [37] Singh R., Kumar S. Green Technologies and Environmental Sustainability, Berlin, Germany, 2017.
- [38] Purohit D., Malvi B. Review on Green Technology for Sustainable Development, 2019.
- [39] Sivaparthipan C.B., Karthikeyan N., Karthik S. Designing statistical assessment healthcare information system for diabetics analysis using big data, 2020.
- [40] Chu W.-S., Chun D.-M., Ahn S.-H. Research advancement of green technologies, 2014.
- [41] Boccella A.R., Centobelli P., Cerchione R., Murino T., Riedel R. Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0, 2020.
- [42] Zambon I., Cecchini M., Egidi G., Saporito M.G., Colantoni A. Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. Processes, 2019.
- [43] Mehrpouya M., Dehghanghadikolaei A., Fotovvati B., Vosooghnia A., Emamian S.S., Gisario A. The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review, 2019.
- [44] Li D., Landström A., Fast-Berglund Å., Almström P. Human-Centred Dissemination of Data, Information and Knowledge in Industry 4.0, 2019.
- [45] Buer S.-V., Strandhagen J.O., Chan F.T.S. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda, 2018.

- [46] Arshad R., Zahoor S., Shah M.A., Wahid A., Yu H. Green IoT: An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond. IEEE, 2017.
- [47] Paul I.D., Bhole G.P., Chaudhari J.R. A Review on Green Manufacturing: It's Important, Methodology and its Application, 2014.
- [48] Gandhi N.S., Thanki S.J., Thakkar J.J. Ranking of drivers for integrated lean-green manufacturing for Indian manufacturing, 2018.
- [49] Cherrafi A., Garza-Reyes J.A., Kumar V., Mishra N., Ghobadian A., Elfezazi S. Lean, green practices and process innovation: A model for green supply chain performance, 2018.
- [50] Loiseau E., Saikku, L., Antikainen R., Droste N., Hansjürgens B., Pitkänen K., Leskinen P., Kuikman P., Thomsen M. Green economy and related concepts: An overview, 2016.
- [51] Bina O. The Green Economy and Sustainable Development: An Uneasy Balance? Environ. Plann. C Gov. Policy 2013.
- [52] Slaper T.F., Krause R.A. The Green Economy: What Does Green Mean? Indiana, 2009.
- [53] Gasparatos A., Doll C.N.H., Esteban M., Ahmed A., Olang T.A. Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy, 2017.
- [54] Borel-Saladin J.M., Turok I.N. The Green Economy: Incremental Change or Transformation?: The Green Economy: Incremental Change or Transformation? Env. Pol. Gov. 2013.
- [55] Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, 2017.
- [56] Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular Economy: The Concept and its Limitations, 2018.
- [57] Searcy C. Corporate Sustainability Performance Measurement Systems: A Review and Research Agenda, 2012.
- [58] Dyllick T., Hockerts K. Beyond the business case for corporate sustainability, 2002.
- [59] Asimwe M.M., de Kock, I.H. An Analysis of the Extent to Which Industry 4.0 has been considered in sustainability or socio-technical transitions. S. Afr. J. Ind. Eng. 2019.
- [60] Bonilla S.H., Silva H.R.O., da Silva M.T. Goncalves R.F., Sacomano J.B. Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges, 2018.
- [61] Beier G., Ullrich A., Nieho S., Reissig M., Habich M. Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes-A literature review, 2020.
- [62] Sartal A., Bellas R., Mejias A.M., Garcia-Collado A. The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review, 2020.
- [63] Tirabeni L., De Bernardi P., Forliano C., Franco M. How Can Organisations and Business Models Lead to a More Sustainable Society? A Framework from a Systematic Review of the Industry 4.0. Sustainability, 2019.
- [64] Porter M.E. The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance, New York, USA, 1998.
- [65] Trianni A., Cagno E., Neri A., Howard, M. Measuring industrial sustainability performance: Empirical evidence from Italian and German manufacturing small and medium enterprises, 2019.

- [66] Kamble S.S., Gunasekaran A., Gawankar S.A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives, 2018.
- [67] Raut R.D., Mangla S.K., Narwane V.S., Gardas B.B., Priyadarshinee P., Narkhede B.E. Linking big data analytics and operational sustainability practices for sustainable business management, 2019.
- [68] Sangwan S.R., Bhatia M.P.S. Sustainable Development in Industry 4.0. In A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development, Anand N., Akshi K., Eds. Advances in Science, Technology & Innovation, Switzerland, 2020.
- [69] Varela L., Araujo A., Avila P., Castro H., Putnik G. Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability, 2019.
- [70] G.Y. Zhao, Z.Y. Liu, Y. He, H.J. Cao, Y.B. Guo. Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy, China, USA, 2017.
- [71] Nitesh Sihag, Kuldeep Singh Sangwan. A systematic literature review on machine tool energy consumption. India, 2020.
- [72] Dietmair A, Verl A. Energy consumption forecasting and optimisation for tool machines, 2009.
- [73] Peng T., Xu X.. An interoperable energy consumption analysis for system for CNC machining, 2017.
- [74] O' driscoir E., Kelly K., Cusack D.O., O' donnell G.E. Characterising the energy consumption of machine tool actuator components using pattern recognition, 2013.
- [75] Avram O.I., Xirouchakis P. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system, 2011.
- [76] Li W., Zein A., Kara S., Herrmann C., An investigation into fixed energy consumption of machine tools, 2011.
- [77] European Commission. (2010) Energy – Yearly statistics 2008, Eurostat Statistical Books. ISSN 1830-7833.
- [78] European Commission. Energy – Yearly statistics 2008, Eurostat Statistical. ISSN 1830-7833, 2010.
- [79] Joost R. Duflou, Karel Kellens, Renaldi, Yansong Guo, Wim Dewulf. Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes. Belgium, 2012
- [80] Branham M., Gotowski T.G., Jones A., Sekulic D.P. A Thermodynamic Framework for Analyzing and Improving Manufacturing Processes. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2008.
- [81] Kalla D., Twomey J., Overcash M. MR4 Turning Process UPLCI & MR3 Milling Process UPLCI, 2009.
- [82] WNT Deutschland GmbH, Cutting Tool Catalogue – Turning and Milling, 2011.
- [83] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M. Overview and Methodology, Ecoinvent Report No. 1. Swiss Centre for LCI, Dübendorf, 2007.
- [84] Oliveira M., Santos J.P., Almeida F.G., Reis A., Pereira J.P., Rocha A.B. Impact of Laser-based Technologies in the Energy-Consumption of Metal Cutters: Comparison Between Commercially Available Systems, Leuven, 2011.
- [85] Duflou J.R., Kellens K., Devoldere T., Deprez W., Dewulf W. Energy related environmental impact reduction opportunities in machine design: case study of a laser cutting machine, 2010.
- [86] Naranjo A., del Pilar Noriega M., Sierra J.D., Sanz J.R. Injection Molding Processing Data, 2001.

- [87] Thiriez A. An Environmental Analysis of Injection Molding. Cambridge, USA, 2006.
- [88] Ribeiro I., Peças P., Henriques E. Environmental Impact of Plastic Injection Mould, Gent, 2008.
- [89] O Cleirigh B. Plastics Industry—A Contribution Towards Ireland's Kyoto Targets, Plastics Ireland, 2005.
- [90] Kanungo A., Swan E. All Electric Injection Molding Machines: How Much Energy Can You Save? New Orleans, 2008.
- [91] Duflou J.R., Sutherland J.W., Dornfeld D., Herrmann C., Jeswiet J., Kara S., Hauschild M., Kellens K. Towards Energy and Resource Efficient Manufacturing: A Process and Systems Approach, 2012.
- [92] Ι. Γιαννατσής, Β. Δεδούσης, Β. Κανελλίδης. Σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής με τη βοήθεια Η/Υ. Αθήνα, 2015.
- [93] Peklenik J., Jerele A. Some basic relationships for identification of the machine processes, 1992.
- [94] Zhao G., Hou C., Qiao J., Cheng X. Energy consumption characteristics evaluation method in turning, 2016.
- [95] Li T., Yuan C. Numerical modeling of specific energy consumption in machining process. Wisconsin, USA, 2013.
- [96] ISO (International Organization for Standardization), 2014. ISO 14955-1. Machine Tools – Environmental Evaluation of Machine Tools – Part 1: Design Methodology for Energy-Efficient Machine Tools.
- [97] Balogun V.A., Mativenga P.T. Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes, 2013.
- [98] He Y., Wu T., Zhong F.P., Peng B. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining, 2012b.
- [99] Zhou L., Li J., Li F., Mendis G., Sutherland J.W. Optimization parameters for energy efficiency in end milling, 2018.
- [100] Lv J., Tang R., Jia S. Therbling-based energy supply modeling of computer numerical control machine tools, 2014.
- [101] Jia S., Tang R., Lv J. Machining activity extraction and energy attributes inheritance method to support intelligent energy estimation of machining process, 2016a.
- [102] Jia S., Tang R., Lv J., Yuan Q., Peng T. Energy consumption modeling of machining transient states based on finite state machine, 2017a.
- [103] Jia S., Yuan Q., Lv J., Liu Y., Ren D., Zhang Z. Therbling-embedded value stream mapping method for lean energy machining, 2017b.
- [104] Kong D., Choi S., Yasui Y., Pavanaskar S., Dornfeld D., Wright P. Software-based tool path evaluation for environmental sustainability, 2011.
- [105] Draganescu F., Gheorghe M., Doicin C.V. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy, 2003.
- [106] Li W., Kara S. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process, 2011.
- [107] Li L., Yan J.H., Xing Z.W. Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modeling, 2013.
- [108] Xie D., Chen G.R., Shi J.L. Research on CNC machine tool cutting energy consumption based on BP neural network. Mach Tool Hydraulics 2012.
- [109] Al-Hazza M.H.F., Adesta E.Y.T., Ali A.M. Energy cost modeling for high speed hard turning, 2011.
- [110] Quintana G., Ciurana J., Ribatallada J. Modelling power consumption in ball-end milling operations, 2011.

- [111] Yoon H.S., Moon J.S., Pham M.Q., Lee G.B. Control of machining parameters for energy and cost savings in micro-scale drilling of PCBs, 2013.
- [112] Liu Z.Y., Guo Y.B., Sealy M.P., Liu Z.Q. Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression, 2016.
- [113] Zhou X.N, Liu F., Cai W. An energy-consumption model for establishing energy consumption allowance of a workpiece in a machining system, 2016.
- [114] Dietmair A., Verl A. A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimization in manufacturing, 2009.
- [115] Li Y.F, He Y., Wang Y., Wang Y.L., Yan P., Lin S.L. A modeling method for hybrid energy behaviors in flexible machining systems, 2015
- [116] He Y., Liu B., Zhang X.D., Gao H., Liu X.H. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system, 2012.
- [117] Giret A., Trentesaux D., Prabhu V. Sustainability in manufacturing operations scheduling: a state of the art review, 2015.
- [118] Gahm C., Denz F., Dirr M., Tuma A. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: a review and research framework, 2016.
- [119] Fadi S., Joaquin O.M., Alvaro G.S., Miguel O.M. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs, 2014.
- [120] Fang K, Uhan N, Zhao F, Sutherland JW. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction, 2011.
- [121] Dai M, Tang DB, Giret A, Salido MA, Li WD. Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm, 2013.
- [122] Tang D.B., Dai M., Salido M.A., Giret A. Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization, 2016.
- [123] Fang K., Uhan N., Zhao F., Sutherland J.W. A new shop scheduling approach in support of sustainable manufacturing, Berlin, 2011.
- [124] He Y., Li Y.F., Wu T., Sutherland JW. An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops, 2015.
- [125] Liu Y., Dong H.B., Lohse N., Petrovic S. A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance, 2016.
- [126] Oda Y, Mori M, Ogawa K, Nishida S, Fujishima M, Kawamura T. Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination, 2012.
- [127] Li W, Winter M, Kara S, Herrmann C. Eco-efficiency of manufacturing processes: a grinding case, 2012.
- [128] Hanafi I, Khamlichi A, Cabrera FM, Almansa E, Jabbouri A. Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools, 2012.
- [129] Yan J, Li L. Multi-objective optimization of milling parameters - the trade-offs between energy, production rate and cutting quality, 2013.
- [130] Bhushan RK. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites, 2013.
- [131] Hu SH, Liu F, He Y, Hu T. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools, 2012.
- [132] Oda Y, Kawamura Y, Fujishima M. Energy consumption reduction by machining process improvement. In: 3rd CIRP conference on process machine interactions. Nagoya, Japan, 2012.
- [133] Liang M, Yeap T, Hermansyah A, Rahmati S. Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining, 2003.

- [134] Department of Trade and Industry of United Kingdom. Meeting the energy challenge. Government White Paper on Energy, 2007.
- [135] Gutowski T., Dahmus J., Thiriez A. Electrical energy requirements for manufacturing processes. Lueven, 2016.