



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ποιοτικός έλεγχος και βιωσιμότητα στα έξυπνα εργοστάσια

υπό

Απόστολου Κοζανίτη

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2025

© 2025 Απόστολος Κοζανίτης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Παντελής Δημήτριος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Λυμπερόπουλος Γεώργιος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Κουκούμιαλος Στυλιανός Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα καθηγητής, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων , Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Παντελή Δημήτριο , για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύντροφο μου και την οικογένειά μου για την ανεκτίμητη υποστήριξη τους σε αυτό το ταξίδι .

Περίληψη

Ανέκαθεν, κάθε βιομηχανική επανάσταση ερχόταν ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής ανάπτυξης της εποχής. Από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση, με την εισαγωγή της μηχανής ατμού, μέχρι την τρίτη, με την έλευση της αυτοματοποίησης και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η τεχνολογία πάντα αποτελούσε τον βασικό κινητήριο μοχλό για την εξέλιξη των παραγωγικών διαδικασιών και την αύξηση της παραγωγικότητας. Η 4η βιομηχανική επανάσταση φέρνει την εισαγωγή και την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η ρομποτική, τα μεγάλα δεδομένα (Big Data) και η υπολογιστική στο νέφος (Cloud computing), οι οποίες αλλάζουν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι βιομηχανίες λειτουργούν και αλληλοεπιδρούν. Παράλληλα, η διαχείριση ποιότητας η οποία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό για την αύξηση της ανταγωνιστικότητας, της παραγωγικότητας, της κερδοφορίας και της βιωσιμότητας των βιομηχανιών, ως φυσικό επακόλουθο, συμπαρασύρεται και αυτή στις τεχνολογικές εξελίξεις, οι οποίες βρίσκουν τις παραδοσιακές μεθόδους βελτίωσης ποιότητας όπως η Λιτή Παραγωγή, τα 6 Σίγμα και άλλες να μην μπορούν να ανταποκριθούν πλήρως. Συνεπώς, νέες μέθοδοι βελτίωσης ποιότητας έρχονται στο προσκήνιο όπως η ZDM (Zero Defect Manufacturing) η οποία χρησιμοποιεί πλήρως τις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει ο τεχνολογικός μετασχηματισμός της βιομηχανίας 4.0 και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της αγοράς καθώς και στην ανάγκη για μεγαλύτερη βιωσιμότητα στην παραγωγή.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της εξέλιξης της ποιότητας στην βιομηχανία, την ανάλυση των παραδοσιακών μεθόδων συνεχούς βελτίωσης, την ανάλυση των τεχνολογιών στο πλαίσιο των έξυπνων εργοστασίων και τέλος δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (CNNs) στην έξυπνη επιθεώρηση ποιότητας με απώτερο σκοπό την εφαρμογή νέων μεθόδων συνεχούς βελτίωσης στην παραγωγή, όπως η ZDM, η οποία μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην απόδοση της βιωσιμότητας των βιομηχανιών.

Λέξεις κλειδιά : Βιομηχανία 4.0, Μέθοδοι συνεχούς βελτίωσης ποιότητας, Συνελκτικά Νευρωνικά δίκτυα, έξυπνη επιθεώρηση ποιότητας, ZDM, βιωσιμότητα παραγωγής

Abstract

Traditionally, every industrial revolution has come as a result of the technological development of the time. From the first industrial revolution, with the introduction of the steam engine, to the third, with the advent of automation and computers, technology has always been the main driving force behind the evolution of production processes and the increase in productivity. The 4th industrial revolution brings the introduction and integration of advanced technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), robotics, Big Data and cloud computing, which are radically changing the way industries operate and interact. At the same time, quality management, which is a key feature for increasing the competitiveness, productivity, profitability and sustainability of industries, as a natural consequence, is also being swept along by technological developments, which find traditional quality improvement methods such as Lean Manufacturing, 6 Sigma and others increasingly unable to fully meet these new demands. Consequently, new methods of quality improvement are emerging, such as Zero-Defect Manufacturing (ZDM), which fully leverages the technological transformation of Industry 4.0 to meet market requirements and address the need for greater sustainability in production.

This work provides a literature review on the evolution of quality in industry, an analysis of traditional methods of continuous improvement, an examination of technologies within the context of smart factories, and particular emphasis on the application of Convolutional Neural Networks (CNNs) in smart quality inspection. The ultimate goal is to implement new methods of continuous improvement in production, such as ZDM, which can significantly enhance the sustainability performance of industries.

Key words: Industry 4.0, quality improvement methods, convolutional neural networks, smart quality inspection, ZDM, sustainability in the production.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2 : Ποιότητα και τα συστήματα διαχείρισης της.....	4
Ιστορική αναδρομή	4
Πρότυπα διαχείρισης ποιότητας-Στρατηγικές συνεχούς βελτίωσης	10
Το πρότυπο ISO-9000	10
Πολιτική Ποιότητας 6 σίγμα (6 sigma).....	11
Λιτή παραγωγή (Lean Manufacturing)	13
Lean Six Sigma	14
Η θεωρία των περιορισμών (Theory of Constraints -TOC)	16
Συνεισφορά των Πρακτικών Διαχείρισης Ποιότητας στην Απόδοση Βιωσιμότητας των Επιχειρήσεων.....	18
Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs)	18
Το Πρότυπο ISO 14001.....	19
Βιώσιμη Ανάπτυξη.....	20
Ποιότητα εναντίον Βιωσιμότητας	21
Πώς το TQM Μπορεί να Συμβάλλει στην Επίτευξη της Βιώσιμης Ανάπτυξης	22
Κεφάλαιο 3 : Η Βιομηχανία 4.0 –Έξυπνα Εργοστάσια	23
Μια ανασκόπηση του πως φτάσαμε εδώ	23
Ανάλυση των τεχνολογιών των έξυπνων εργοστασίων	27
IoT (Internet of Things)	27
Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων, IIoT (Industrial Internet of Things).....	28
Κυβερνο-ασφάλεια (Cyber security)	28
Κυβερνο-φυσικά συστήματα (Cyber -physical systems)	30
Big Data (Μεγάλα Δεδομένα) και data analytics (ανάλυση δεδομένων).....	30
Υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing)	32
Μηχανική μάθηση ,βαθιά μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη (Machine learning, deep learning, artificial intelligence)	34
Additive manufacturing – 3D printing.....	37
Ψηφιακά δίδυμα – Digital twins (DTs)	40
Βιομηχανικά ρομπότ και έξυπνα ρομπότ (Industrial Robots and intelligent robots).41	
Βιομηχανική επαυξημένη πραγματικότητα (Industrial Augmented Reality).....	43
Κεφάλαιο 4: Ποιοτικός έλεγχος στην βιομηχανία 4.0.....	44
Επίβλεψη υγείας εξοπλισμού.....	44
Έξυπνη επιθεώρηση ποιότητας - Smart Quality Inspection	45
Οπτική επιθεώρηση ποιότητας με χρήση βαθιάς μάθησης.....	45

Επιθεώρηση ελέγχου με χρήση συνεργατικών ρομπότ.....	48
Περιπτώσεις χρήσης έξυπνης επιθεώρησης ποιότητας	49
Zero Defect Manufacturing – ZDM.....	56
Σύγκριση της ZDM με τις παραδοσιακές μεθόδους συνεχούς βελτίωσης.....	61
ZDM και βιωσιμότητα.....	64
Κεφάλαιο 5: Επίλογος	66
Συμπεράσματα Εργασίας.....	66
Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	67
Βιβλιογραφία	69

Περιεχόμενο εικόνων :

Εικόνα 1. [1] Διαγράμματα ελέγχου του Shewhart.....	6
Εικόνα 2. Από την επιθεώρηση ποιότητας στην ολική διαχείριση της	9
Εικόνα 3. : Διάγραμμα 6σ [2]	12
Εικόνα 4. Σχέση μεταξύ DPMO και της διαδικασίας σίγμα θεωρώντας κανονική κατανομή [3].....	13
Εικόνα 5. Διάγραμμα λιτής σκέψης [4]	14
Εικόνα 6. SDG's [5]	19
Εικόνα 7. Ετήσια διεθνή παραγωγή δεδομενων [6]	31
Εικόνα 8. Οι υποκατηγορίες της τεχνητής νοημοσύνης. [7]	36
Εικόνα 9. Διάγραμμα της διεργασίας 3D printing . [8]	38
Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση των ψηφιακών δίδυμων . [9]	41
Εικόνα 11. Τα έξυπνα ρομποτικά συστήματα σε εναρμόνιση με τους εργαζομένους σε ένα έξυπνο εργοστάσιο . [10]	42

Εικόνα 12. Η μεθοδολογία του Transfer Learning	46
Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική CNN για εξαγωγή χαρακτηριστικών από εικόνες επιφάνειας καλωδίου	47
Εικόνα 14. Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) στην επιθεώρηση ποιότητας . [11].	48
Εικόνα 15. Χρήση Συνεργατικού ρομπότ για επιθεώρηση σωλήνων . [12].....	49
Εικόνα 16. Το οπτικό σύστημα επιθεώρησης δυο καμερών [13]	50
Εικόνα 17. Φυσική επιθεώρηση των παξιμαδιών συγκόλλησης από τους εργαζομένους [13].....	51
Εικόνα 18. Η τοποθέτηση των καμερών και σωστού φωτισμού σε κάθε γραμμή παραγωγής [14].....	52
Εικόνα 19. Παραδείγματα φωτογραφιών αποδεκτής ποιότητας πλακών . [14]	52
Εικόνα 20. Το αντικείμενο προς κατηγοριοποίηση [15]	53
Εικόνα 21. Οι κατηγορίες ελαττωμάτων στο λάστιχο που επιλέχθηκαν . [15]	54
Εικόνα 22. Η εικόνα με τις έξι παραλλαγές φωτισμού . [15]	56
Εικόνα 23. Οι δυο προσεγγίσεις για την επίτευξη του ZDM [16].....	61

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ διαχείρισης ποιότητας, βιώσιμης ανάπτυξης και των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0, καθώς και η κατανόηση της επίδρασής τους στη σύγχρονη βιομηχανία. Η εργασία εξετάζει τη συμβολή σύγχρονων μεθόδων και εργαλείων διαχείρισης ποιότητας, όπως το πρότυπο ISO-9000, τα 6 Σίγμα και η λιτή παραγωγή, στην ενίσχυση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των επιχειρήσεων. Παράλληλα, αναλύεται ο ρόλος των αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως το Internet of Things (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη, τα ψηφιακά δίδυμα και τα μεγάλα δεδομένα (big data, data analytics), η εικονική πραγματικότητα στην υλοποίηση της έννοιας των έξυπνων εργοστασίων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNNs) στο πλαίσιο της βαθιάς μάθησης τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην επιθεώρηση της ποιότητας αλλά και στην πλειοψηφία των εφαρμογών στην ψηφιοποίηση των βιομηχανιών. Στην εργασία αναλύονται διάφορες περιπτώσεις χρήσεων τους σε πραγματικά προβλήματα σε βιομηχανίες που έχουν σκοπό να αποδείξουν στον αναγνώστη και στις βιομηχανίες που δεν έχουν ενστερνιστεί τον ψηφιακό μετασχηματισμό στην χώρα μας ότι είναι κάτι πλέον απολύτως εφικτό και ίσως λιγότερο δύσκολο από ότι μπορεί να περιμένουν και ότι τα πλεονεκτήματα στην απόδοση και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας των συστημάτων τους ποικίλουν. Μέσω της εκτενούς ανάλυσης και επεξήγησης των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0 και της εφαρμογής τους στην διαχείριση της ποιότητας, η εργασία επιδιώκει να προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα του μέλλοντος της παραγωγής, των δυνατοτήτων της και της αδήριτης ανάγκης για την άμεση υιοθέτηση της από τις βιομηχανίες για ένα βιώσιμο μέλλον. Η έρευνα τέλος εστιάζει στη μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους βελτίωσης ποιότητας προς πιο καινοτόμες προσεγγίσεις, όπως η Παραγωγή Μηδενικών Ελαττωμάτων (Zero Defect Manufacturing - ZDM), η οποία μπορεί να επωφεληθεί από το πλήρες δυναμικό των τεχνολογιών που προσφέρει η Βιομηχανία 4.0

Οργάνωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια και βασίζεται σε μια εκτενή μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας πάνω στο κομμάτι της συσχέτισης του ποιοτικού ελέγχου με τις τεχνολογίες της βιομηχανίας 4.0 και την ανάδειξη της σημαντικότητας της εφαρμογής του από τις σύγχρονες επιχειρήσεις.

Πιο συγκεκριμένα ,στο **κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο και τον σκοπό της εργασίας αυτής ,παρέχοντας στον αναγνώστη έναν σαφή οδηγό για το τι επρόκειτο να αναλυθεί .

Η ανάλυση ξεκινά στο **κεφάλαιο 2** με την ιστορική εξέλιξη της ποιότητας ξεκινώντας από την εποχή της απλής επιθεώρησης ποιότητας με οπτικό έλεγχο μέχρι την εποχή της ολικής διαχείρισης ποιότητας που διανύουμε σήμερα . Στην συνέχεια , παρουσιάζονται τα πρότυπα ISO-9000, οι στρατηγικές συνεχούς βελτίωσης 6 Σίγμα , Lean Manufacturing, Lean Six Sigma, καθώς και η θεωρία των περιορισμών (TOC) και η συμβολή τους στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας. Έπειτα ,η εργασία εστιάζει στη σύνδεση της διαχείρισης ποιότητας με τη βιωσιμότητα, μέσω της ανάλυσης πρακτικών όπως το TQM (Total Quality Management) και του προτύπου ISO 14001, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs).

Στο **κεφάλαιο 3** εξετάζεται η εξέλιξη των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), τα Κυβερνο-φυσικά συστήματα, το Cloud Computing, και τα Big Data. Παρουσιάζονται οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης, της μηχανικής και της βαθιάς μάθησης, της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing), των ψηφιακών διδύμων (Digital Twins), καθώς και η χρήση βιομηχανικών ρομπότ και επαυξημένης πραγματικότητας. Η εστίαση είναι στη συμβολή αυτών των τεχνολογιών στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ποιότητας στις βιομηχανίες .

Στο **κεφάλαιο 4** αναλύονται σύγχρονες πρακτικές ποιοτικού ελέγχου, όπως η έξυπνη επιθεώρηση ποιότητας, η οπτική επιθεώρηση με βαθιά μάθηση και η χρήση συνεργατικών ρομπότ. Η μελέτη περιλαμβάνει εκτενή ανάλυση περιπτώσεων χρήσης συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (CNNs) σε πραγματικά βιομηχανικά προβλήματα δίνοντας έμφαση στην μεθοδολογία του «transfer learning» και στην σωστή αξιοποίηση και δημιουργία των δεδομένων .Παράλληλα τονίζεται η σημασία της παρακολούθησης της υγείας του εξοπλισμού προκειμένου την αποτροπή ελαττωματικών προϊόντων και τέλος δίνεται έμφαση στην καινοτόμα προσέγγιση της «Παραγωγής μηδενικών ελαττωμάτων» ή

αλλιώς «ZDM», η σύγκριση της με τις παραδοσιακές μεθόδους συνεχούς βελτίωσης και η ανάδειξη της σημαντικότητας και της υιοθέτησης της στην σημερινή εποχή .

Τέλος η εργασία ολοκληρώνεται με το **κεφάλαιο 5** να αποτελεί τη διατύπωση συμπερασμάτων σχετικά με την αλληλεπίδραση ποιότητας, τεχνολογίας και βιωσιμότητας, καθώς και με προτάσεις για μελλοντική έρευνα, επικεντρωμένες στη βελτιστοποίηση της εφαρμογής των αναδυόμενων τεχνολογιών στα έξυπνα εργοστάσια.

Κεφάλαιο 2 : Ποιότητα και τα συστήματα διαχείρισης της

Ιστορική αναδρομή

Επιθεώρηση Ποιότητας (Quality Inspection)

Εποχή : 1900-1920

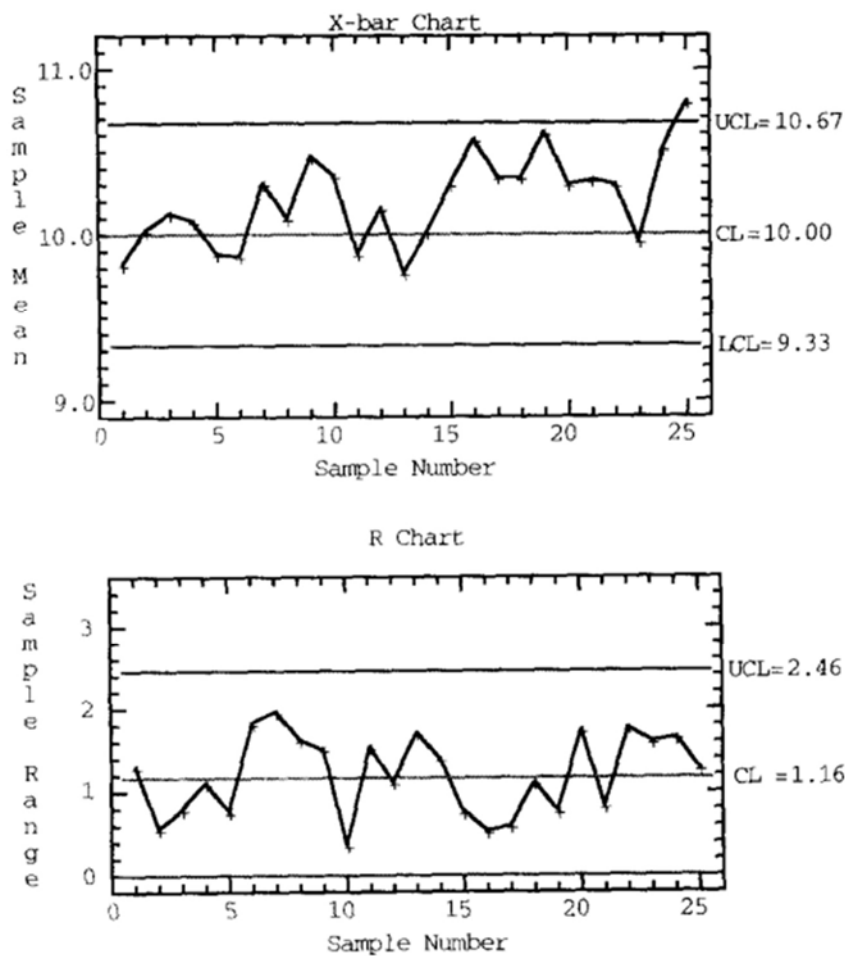
Στις αρχές του 1900 η διαχείριση ποιότητας εστίαζε κυρίως στην επιθεώρηση (inspection) των παραγόμενων προϊόντων, η οποία γινόταν κατά κύριο λόγο με φυσικό οπτικό έλεγχο και με μετρήσεις διάφορων παραμέτρων χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία. Η διαδικασία αυτή επικεντρωνόταν κατ'εξοχήν στον εντοπισμό ελαττωμάτων και αποκλίσεων από τις προδιαγραφές, στοχεύοντας έτσι στην αποτροπή διάθεσης προϊόντων χαμηλής ποιότητας στην αγορά και την διαφύλαξη της φήμης των εταιρειών. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, η ικανοποίηση των πελατών ως προς την ποιότητα του προϊόντος που τους παρέχεται κατείχε το κατώτερο επίπεδο στην πυραμίδα των προτεραιοτήτων της εταιρίας, αφού σύμφωνα με την φιλοσοφία και την αντίληψη των διοικήσεων της εποχής η ποιότητα ερχόταν ως εμπόδιο στην μείωση του κόστους παραγωγής και πολλές φορές ως ένα αναγκαίο κακό. Η επιθεώρηση των προϊόντων αποτελούσε το μοναδικό στάδιο για την επίτευξη της ποιότητας της εκάστοτε εταιρίας και γινόταν αποκλειστικά με τον οπτικό έλεγχο του τελικού προϊόντος από τους εργαζομένους και η ηγεσία δεν είχε την παραμικρή ανάμειξη σε αυτήν, πάρα μόνο της εντολής για ανάθεση εργασιών στους εργαζομένους.

Έλεγχος Ποιότητας (Quality Control)

Εποχή : 1920-1950

Τη δεκαετία του 1930, η στατιστική ανάλυση και ο έλεγχος της ποιότητας εξελίχθηκαν σημαντικά με τον ερχομό του έργου του Walter Shewhart, ο οποίος εισήγαγε τον ορό της

στατιστικής διαδικασίας ελέγχου ποιότητας (SQC) στις βιομηχανίες . Η τότε πρωτοποριακή του προσέγγιση επέτρεψε στις επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν στατιστικά εργαλεία για την βελτίωση της ποιότητας στην παραγωγική διαδικασία , με μείωση των ελαττωμάτων και αύξηση της αποδοτικότητας. Η συμβολή του αυτή , έθεσε τα θεμέλια για τις σύγχρονες μεθόδους διαχείρισης ποιότητας και άνοιξε τον δρόμο για περαιτέρω επιστημονικές προσεγγίσεις στον έλεγχο ποιότητας. Οι ιδέες του Shewhart χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από το επιστημονικό κοινό και εξελίχθηκαν σε διάφορες προσεγγίσεις όπως αυτή της δειγματοληψίας αποδοχής. Στην απλοϊκή μορφή της, η δειγματοληψία αποδοχής περιλαμβάνει την τυχαία επιλογή αντικειμένων από μια παρτίδα προϊόντων, αποδεχόμενη την παρτίδα ως ικανοποιητική εάν ο αριθμός των ελαττωματικών αντικειμένων είναι μικρός και απορρίπτοντας την παρτίδα σε κάθε άλλη περίπτωση. Έπειτα ,τη δεκαετία του 1940, τα Bell Laboratories ανέπτυξαν επιπλέον τεχνικές δειγματοληψίας, όπως τα Αποδεκτά Επίπεδα Ποιότητας (AQL) και το Μέσο Όριο Εξερχόμενης Ποιότητας (AOQL). Πιο συγκεκριμένα , τα Αποδεκτά Επίπεδα Ποιότητας (AQL) αναφέρονται στο μέγιστο ποσοστό ελαττωματικών προϊόντων που θεωρείται αποδεκτό σε μια παρτίδα κατά την επιθεώρηση, ενώ από την άλλη, το Μέσο Όριο Εξερχόμενης Ποιότητας (AOQL) είναι η μέγιστη μέση ποιότητα των εξερχόμενων προϊόντων που μπορεί να επιτευχθεί όταν εφαρμόζεται ένα συγκεκριμένο σχέδιο δειγματοληψίας. Αυτή η προσέγγιση έγινε η κύρια λειτουργία των τμημάτων ελέγχου ποιότητας ή, αργότερα, διασφάλισης ποιότητας, τα οποία σχεδόν πάντα βρίσκονταν σε σύγκρουση με τμήματα όπως η παραγωγή και οι πωλήσεις. Η αντίληψη δηλαδή της σχέσης ποιότητας και κόστους παρέμεινε αδιάλλακτη και σε αυτήν την περίοδο , με την διαφορά ότι η ηγεσία πρόσθεσε στην φιλοσοφία της απλής εντολής έναν επιπλέον έλεγχο , συνδέοντας την επιθεώρηση ποιότητας από τους εργαζομένους με τον περεταίρω έλεγχο της ποιότητας της κάθε παρτίδας .Μια τέτοια προσέγγιση στατιστικού ελέγχου όπως είναι φανερό θα μπορούσε να ευδοκιμήσει μόνο σε μια παραδοσιακή ιεραρχική οργάνωση και στην πραγματικότητα επιδείκνυε τα προβλήματα που ήταν ήδη εγγενή σε αυτούς τους οργανισμούς.



Εικόνα 1. [1] Διαγράμματα ελέγχου του Shewhart

Διασφάλιση Ποιότητας (Quality Assurance)

Εποχή : 1950-1980

Ο W. Edwards Deming ήταν ένθερμος θαυμαστής και υπέρμαχος των ιδεών του Shewhart και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εισαγωγή τους στην Ιαπωνία το 1950 και αργότερα. Εκεί , στο αναπτυσσόμενο περιβάλλον ολικής ποιότητας , ο στατιστικός έλεγχος του Shewhart βρήκε άμεση αποδοχή και διαδραμάτισε κυρίαρχο ρόλο σε αυτήν την ανάπτυξη. Η περίοδος της διασφάλισης ποιότητας ήταν ουσιαστικά η πρώτη φορά μετά την εισαγωγή της γενικότερης εννοίας της ποιότητας στην βιομηχανία όπου η εστίαση στο τελικό προϊόν μεταβιβάστηκε κατά κύριο λόγο στην εστίαση των προτύπων ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας .Επιπλέον οι διορθωτικές δράσεις που χαρακτήριζαν την στρατηγική για βελτίωση της ποιότητας κατά τις προηγούμενες περιόδους που αναφέρθηκαν , εξελίχθηκαν σε μια κουλτούρα πρόληψης παραγωγής κακής ποιότητας προϊόντων

χρησιμοποιώντας εργαλεία όπως τα διαγράμματα ελέγχου του Shewhart ,τον κύκλο « Plan-Do-Check-Act » ο οποίος αφορά τον σχεδιασμό στόχων και διαδικασιών (Σχέδιο) , την εφαρμογή του σε μικρή κλίμακα (Εκτέλεση) , τον έλεγχο και την μελέτη των αποτελεσμάτων και απόδοσης (Έλεγχος) και την διόρθωση και εφαρμογή του σχεδίου σε μεγαλύτερη κλίμακα (Δράση) ,τα διαγράμματα αίτιας και αποτελέσματος (Ishikawa / Fishbone Diagram) καθώς και μέθοδοι όπως «Kanban» και «Just-In-Time» όπου με την παραγωγή μόνο για κάλυψη της ζήτησης και την ελαχιστοποίηση των αποθεμάτων βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα των προϊόντων .Επιπρόσθετα στην εποχή της διασφάλισης ποιότητας η κατανόηση και καταγραφή των αναγκών και απαιτήσεων των πελατών ενσωματώθηκε στη διαδικασία ποιότητας, καθιστώντας τον πελάτη επίκεντρο των στρατηγικών βελτίωσης και η διοίκηση αναπροσαρμόστηκε, υιοθετώντας πιο στρατηγικές και οργανωμένες μεθόδους διαχείρισης ποιότητας, συνδυάζοντας στοιχεία σχεδιασμού και ελέγχου, εισάγοντας σιγά σιγά και τους προμηθευτές στην διασφάλιση της ποιότητας .

Ολικός Ποιοτικός Έλεγχος (Total Quality Control)

Εποχή : 1960-1990

Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί την περίοδο του Ολικού ποιοτικού ελέγχου σημαντικά σε σχέση με τις μέχρι τότε προηγούμενες είναι το ιαπωνικό «Kaizen» , το οποίο μεταφράζεται ως συνεχή βελτίωση μικρής κλίμακας σε διαδικασίες με την ενεργό συμμετοχή όλων των εργαζομένων που απαρτίζουν μια επιχείρηση. Στην εποχή αυτή λοιπόν ,η ποιότητα ενσωματώνεται σε όλες τις λειτουργίες ενός οργανισμού, από τους απλούς εργαζομένους και την διοίκηση μέχρι και τους προμηθευτές . Παράλληλα , η ομαδική εργασία έγινε ο ακρογωνιαίος λίθος του TQC, με την ευρεία χρήση εργαλείων και τεχνικών ποιότητας, όπως τα διαγράμματα αίτιου-αποτελέσματος , οι αναλύσεις Pareto και φυσικά τα στατιστικά διαγράμματα ελέγχου που συνέχιζαν να αποτελούν σημαντικότατο εργαλείο μέχρι και τότε . Η ποιότητα πλέον θεωρήθηκε ως συνεχής διαδικασία που στόχευε όχι μόνο στην κάλυψη, αλλά και στην υπέρβαση των προσδοκιών των πελατών ,οι οποίοι ήταν άμεσα συνδεδεμένοι και συμμετοχοί στην διασφάλιση της ποιότητας που οι ίδιοι προσδοκούν .Σημαντικό γεγονός επίσης ,το οποίο συντέλεσε στην αλλαγή της κουλτούρας ως προς την ποιότητα ήταν η εισαγωγή του προτύπου ISO στους οργανισμούς όπου με την πάροδο του χρόνου υιοθετήθηκε σε πληθώρα επιχειρήσεων ,γεγονός που αύξησε τον ανταγωνισμό και τις προσδοκίες των πελατών .Συμπερασματικά

λοιπόν , η εποχή του TQC έθεσε τις βάσεις για τη σύγχρονη φιλοσοφία ποιότητας, εστιάζοντας στη συνολική συμμετοχή, την προληπτική δράση, τη συνεχή βελτίωση και τη βαθιά κατανόηση των αναγκών του πελάτη.

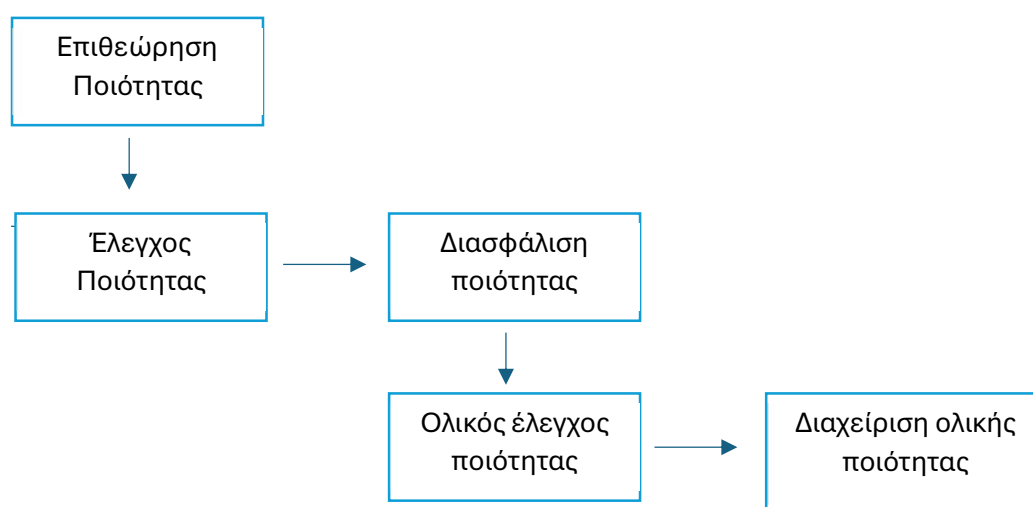
Διαχείριση Ολικής Ποιότητας (Total Quality Management)

Εποχή : 1980 – σήμερα

Η διοίκηση ολικής ποιότητας (Total Quality Management) αποτελεί περισσότερο μια φιλοσοφία παρά πολιτική, έτσι οπού πολλές φορές αναγράφεται στην βιβλιογραφία, η οποία εστιάζει σε μια γενικότερη κουλτούρα διασφάλισης της ποιότητας σε έναν οργανισμό . Αποτελεί δηλαδή μια νοοτροπία κατά την οποία όλα τα μέλη μέσα στον οργανισμό , από τους εργάτες ,μέχρι την ανώτερη διοίκηση , ανεξάρτητα από τις υποχρεώσεις που τους έχουν ανατεθεί ,είναι επίσης υποχρεωμένοι να δίνουν τον καλύτερο τους εαυτό ώστε να διασφαλιστούν τα υψηλά πρότυπα ποιότητας που έχουν τεθεί .Στόχος της φιλοσοφίας αυτής είναι η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων σε όλα τα στάδια της παραγωγής και η βελτίωση της εμπειρίας τόσο των πελατών , όσο και των εργαζομένων . Για την επίτευξη του TQM απαιτείται αφοσίωση στους εξής τρεις τομείς: οργανωτική δομή ,ηγεσία διαχείρισης και προσανατολισμός στον πελάτη .Πιο αναλυτικά η προσέγγιση της ολικής ποιότητας προωθεί μια επίπεδη οργανωτική δομή για να διευκολύνει τη δυσλειτουργική δραστηριότητα, την επικοινωνία, τη συνεργασία και την ομαδική εργασία. Φόρουμ διαχείρισης εργατικού δυναμικού και στρατηγικές συνεργασίες με προμηθευτές ή πελάτες μπορούν να ευδοκιμήσουν μόνο σε πιο λιτές και επίπεδες οργανώσεις. Επομένως, οι εταιρείες πρέπει να απομακρυνθούν από τις ιεραρχικές δομές και να στραφούν προς τη «οριζόντια διαχείριση». Στη συνέχεια , για να επιτευχθεί ένα περιβάλλον ολικής ποιότητας, η διοίκηση πρέπει να υιοθετήσει ένα νέο στυλ ηγεσίας. Οι διευθυντές χρειάζεται να αναπτύξουν ένα όραμα για την εταιρεία και να το επικοινωνήσουν σε όλο τον οργανισμό. Ένα βασικό στοιχείο είναι η δημιουργία μιας εταιρικής κουλτούρας όπου η διοίκηση εμπιστεύεται τους εργαζομένους, αναθέτει αρμοδιότητες και εξουσίες και αναδιανέμει την ισχύ εντός της εταιρείας .Τέλος ο προσανατολισμός στον πελάτη περιλαμβάνει την αναγνώριση τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών πελατών, την αξιολόγηση των αναγκών τους, την ικανοποίηση ή την υπέρβαση αυτών των αναγκών, καθώς και την παρακολούθηση της ικανοποίησής τους. Η έννοια του εσωτερικού πελάτη κατέστησε σαφές στους οργανισμούς την προσέγγιση της ολικής ποιότητας ότι είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται πως κανένα ελαττωματικό προϊόν

ή διαδικασία δεν μεταβιβάζεται στην επόμενη φάση και για τους εξωτερικούς πελάτες, η ολική ποιότητα δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη σχέσεων μεταξύ προμηθευτών και πελατών, επεκτείνοντας αυτές τις σχέσεις σε στρατηγικές συνεργασίες που ενισχύουν τη συνεργασία και την αμοιβαία υποστήριξη. Καταληκτικά όπως ανέφερε ο Ishikawa για να επιτύχει η ολική διαχείριση ποιότητας (TQM), θα πρέπει αυτή να θεωρείται ως μια «επανάσταση στη σκέψη της διοίκησης», αλλά και ως μια επανάσταση στη συμπεριφορά των ανθρώπων μέσα σε έναν οργανισμό .

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει μια μετάβαση από μια κουλτούρα ανάθεσης ευθυνών και εξάρτησης κατά την διάρκεια του έλεγχου (inspection) , μέσω της εισαγωγής τεχνικών, ελέγχων και συστημάτων που εντοπίζουν προβλήματα, σε ένα στάδιο TQM όπου η έμφαση δίνεται στην συμμετοχή, την επίλυση προβλημάτων, τη δημιουργία σχέσεων με τους προμηθευτές και τη λειτουργία με βάση τον εξ αρχής σωστό και προληπτικό σχεδιασμό.



Εικόνα 2. Από την επιθεώρηση ποιότητας στην ολική διαχείριση της .

Πρότυπα διαχείρισης ποιότητας-Στρατηγικές συνεχούς βελτίωσης .

Το πρότυπο ISO-9000

Τα πρότυπα συστημάτων διαχείρισης (Management System Standards), που ονομάζονται επίσης Meta-Standards , έχουν υιοθετηθεί από έναν αυξανόμενο αριθμό οργανισμών ανά τον κόσμο. Αυτά τα πρότυπα παρέχουν ένα πλαίσιο κατευθυντήριων γραμμών και διαδικασιών που βοηθούν τις επιχειρήσεις να βελτιώσουν τη συνολική διαχείριση, την ποιότητα και την απόδοσή τους, εξασφαλίζοντας παράλληλα συμμόρφωση με διεθνείς κανονισμούς και βέλτιστες πρακτικές.

Για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση της βελτίωσης της ποιότητας από διεθνή προοπτική, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) ιδρύθηκε το 1987 με μέλη από 163 χώρες. Ο οργανισμός παρέχει το ISO 9000 ως μια οικογένεια προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών για τη διαχείριση ποιότητας, για να διασφαλίσει την ποιότητα προϊόντων και υπηρεσιών των οργανισμών. Το ISO 9001 (2015) βασίζεται στις εξής επτά αρχές διαχείρισης ποιότητας: εστίαση στον πελάτη, ηγεσία, συμμετοχή των ανθρώπων, προσέγγιση μέσω διαδικασιών, βελτίωση, λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων και διαχείριση σχέσεων.

Σήμερα, πολλές χώρες είτε έχουν υιοθετήσει το ISO 9000 είτε το έχουν χρησιμοποιήσει ως βάση για τα εθνικά τους συστήματα πιστοποίησης ποιότητας. Η σειρά προτύπων ISO 9000 είναι πλέον ευρέως αποδεκτή ως το ελάχιστο πρότυπο για ένα σύστημα ποιότητας για τις επιχειρήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πιστοποίηση ISO 9000 δεν διασφαλίζει από μόνη της την ποιότητα, αλλά επικεντρώνεται στη συνέπεια των διαδικασιών, οι οποίες ακολουθούν μια νοοτροπία διοίκησης και ελέγχου.

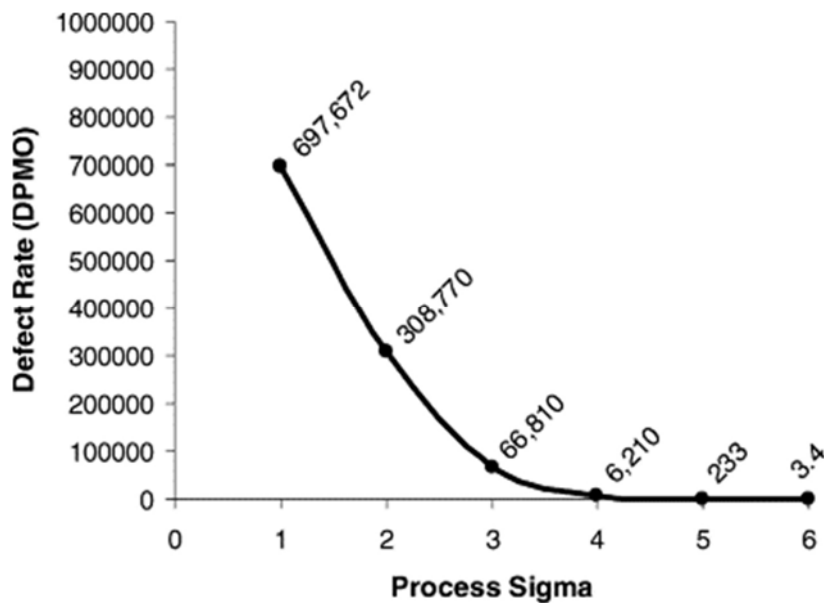
Πολιτική Ποιότητας 6 σίγμα (6 sigma)

Το Six Sigma συνιστά μια συστηματική μεθοδολογία που στοχεύει στην επιχειρησιακή αριστεία μέσω της συνεχούς βελτίωσης των διαδικασιών .Το Six Sigma έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε παγκόσμιο επίπεδο για πάρα πολλά χρόνια, επιφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην κερδοφορία πολλών μεγάλων αλλά και μικρών οργανισμών .Η Motorola ήταν η πρώτη εταιρία που εισήγαγε την έννοια του Six Sigma στα μέσα της δεκαετίας του 1980 ως μια ισχυρή επιχειρηματική στρατηγική για τη βελτίωση της ποιότητας και έπειτα απέκτησε παγκόσμια φήμη όταν εφαρμόστηκε με επιτυχία από τη General Electric τη δεκαετία του 1990, υπό τη διοίκηση του Jack Welch. Η φιλοσοφία του Six Sigma βασίζεται στην ενεργή συμμετοχή της ανώτατης διοίκησης σε όλες τις διαδικασίες και στην πλήρη δέσμευση του προσωπικού σε όλα τα επίπεδα της εταιρείας, προσεγγίζοντας τη διαχείριση ποιότητας από την κορυφή προς τη βάση. Μείζονας στόχος της πολιτικής αυτής είναι η μείωση της διακύμανσης στις διαδικασίες και η διαρκής βελτίωση της ποιότητας, με επίκεντρο τα κρίσιμα ποιοτικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τις επιχειρησιακές λειτουργίες. Το Six Sigma θεωρείται η πιο γνωστή μέθοδος βελτίωσης των διαδικασιών και χρησιμοποιείται έως και σήμερα σε πληθώρα επιχειρήσεων και εταιριών . Τα 6σ ουσιαστικά αναφέρονται στα 6 βήματα της μεθοδολογίας που απαιτούνται για την μείωση της διακύμανσης για μια μεταβλητή , τα οποία ξεκινούν αρχικά με τον ορισμό (definition) του έργου βελτίωσης ,έπειτα στην μέτρηση (measure) των παραμέτρων για την κατάλληλη συλλογή των δεδομένων ,την ανάλυση (analyze) αυτών των μετρήσεων που ουσιαστικά αποσκοπεί στην αναγνώριση προβλημάτων, την βελτίωση (improvement) των διαδικασιών όσο αυτό μπορεί να είναι εφικτό με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τέλος τον έλεγχο (control) μέσω παρακολούθησης των διαδικασιών με σκοπό να μπορέσουν διατηρηθούν οι βελτιώσεις . Η παραπάνω μεθοδολογία που αποτελεί τον πυρήνα του Six Sigma αναφέρεται στο «DMAIC» το οποίο αποτελείται από τα αρχικά γράμματα των βημάτων που αναφέρονται και φαίνονται στην παρακάτω φωτογραφία .



Εικόνα 3. : Διάγραμμα 6σ [2]

Επιπρόσθετα , τα 6σ είναι οντάς μια μεθοδολογία βασισμένη σε στατιστικές και επιστημονικές μεθόδους για την μείωση των ποσοστών ελαττωμάτων με βάση του ορισμού του πελάτη ,αξίζει να αναφερθεί πως αρχικά ήταν ένας τρόπος να μεταφραστεί ο στόχος ποιότητας στα 3.4 DPMO (Defects per Million Opportunities) . Η Motorola έθεσε αυτόν τον στόχο έτσι ώστε η μεταβλητότητα της διαδικασίας να είναι ± 6 τυπικές αποκλίσεις από τον μέσο όρο . Αυτός ο στόχος ήταν πολύ πέρα από τα φυσιολογικά επίπεδα ποιότητας και απαιτούσε εξαιρετικά επιθετικές προσπάθειες βελτίωσης. Για παράδειγμα, 3 σίγμα οδηγεί σε 66,810 DPMO ή 93.3% απόδοση διαδικασίας, ενώ το 6 σίγμα έχει μόνο 3.4 DPMO και 99.99966% απόδοση διαδικασίας (οι υπολογισμοί αυτοί υποθέτουν μετατόπιση 1.5 τυπικής απόκλισης στον μέσο όρο της διαδικασίας). Συνεπώς , ο κατάλληλος στόχος για κάθε διαδικασία εξαρτάται από τη στρατηγική σημασία της και το κόστος βελτίωσης σε σχέση με το όφελος. Για παράδειγμα, οι διαδικασίες στα επίπεδα δύο ή τρία σίγμα μπορούν να φτάσουν στο τέσσερα σίγμα σχετικά εύκολα και με χαμηλό κόστος, αλλά η επίτευξη πέντε ή έξι σίγμα απαιτεί περισσότερη προσπάθεια και πιο προηγμένα στατιστικά εργαλεία.



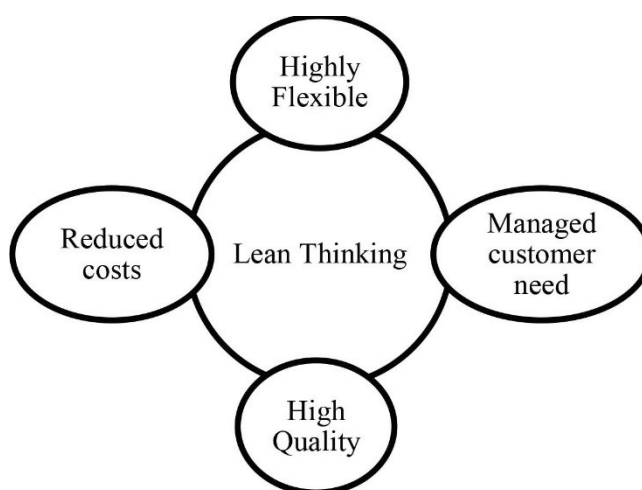
Εικόνα 4. Σχέση μεταξύ DPMO και της διαδικασίας σίγμα θεωρώντας κανονική κατανομή [3]

Λιτή παραγωγή (Lean Manufacturing)

Η λιτή παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί και αυτή ως μια μέθοδος συνεχούς βελτίωσης. Η θεωρία της λιτής παραγωγής είναι βασισμένη σε δυο κυρίους πυλώνες. Αυτοί είναι η εξασφάλιση καλής ποιότητας προϊόντος σε χαμηλό κόστος και η ικανοποίηση των πελατών. Επιπλέον, η λιτή παραγωγή θεωρείται ως μια τεχνική για τη μείωση των αποβλήτων στο ελάχιστο δυνατό. Έχουν εντοπιστεί επτά είδη σπατάλης/αποβλήτων : υπερπαραγωγή (παραγωγή υπερβολικής ποσότητας ή σε ακατάλληλο χρονισμό), απόθεμα (αποθήκευση πρώτων υλών, ημιτελών προϊόντων και τελικών προϊόντων), κίνηση (περιττή κίνηση του σώματος), ελαττωματικότητα (μη συμμορφούμενο προϊόν), μεταφορά (περιττή μετακίνηση προϊόντος), υπερεπεξεργασία (επεξεργασία πέρα από τις προσδοκίες του πελάτη) και αναμονή (χρόνος αναμονής πριν από την επόμενη δραστηριότητα). Η λιτή παραγωγή πρωτοεμφανίστηκε στις ιαπωνικές αυτοκινητοβιομηχανίες μετά τον πόλεμο λόγω της μεγάλης έλλειψης πόρων, χρημάτων και τεχνικού προσωπικού. Στην αυτοκινητοβιομηχανία Toyota, δύο σημαντικές προσωπικότητες, ο Eiji Toyoda και ο Taiichi Ohno, εισήγαγαν το «Σύστημα Παραγωγής της Toyota», το οποίο σήμερα είναι γνωστό ως «Λιτή Παραγωγή». Η λιτή παραγωγή

επικεντρώνεται κατά βάση στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων η οποία με τη σειρά της προσδίδει μια επιπλέον αξία στο προϊόν

Στο σημερινό ανταγωνιστικό περιβάλλον που επικρατεί, κάθε εταιρεία ή βιομηχανία προσπαθεί να προσφέρει προϊόντα υψηλής ποιότητας και μεγάλης ποσότητας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και η λιτή παραγωγή αποτελεί ένα από τα πιο κατανοητά και σημαντικά εργαλεία για την επίτευξη αυτού του στόχου. Επιδιώκει να εφαρμόσει διαδικασίες που επιτυγχάνουν υψηλή ποιότητα, ασφάλεια και αύξηση της ηθικής των εργαζομένων, ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος και τον χρόνο παράδοσης. Η βασική ιδέα είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος του προϊόντος σε όλη τη διάρκεια της παραγωγής, είτε πρόκειται για τον σχεδιασμό, την κατασκευή ή τη διαδικασία παραγωγής, αναλύοντας όσο είναι εφικτό τις «συμπεριφορές» των μηχανών από δεδομένα του παρελθόντος, ώστε να προβούμε σε διορθωτικές και προληπτικές κινήσεις.



Εικόνα 5. Διάγραμμα λιτής σκέψης [4]

Lean Six Sigma

Στο ολοένα και πιο ανταγωνιστικό περιβάλλον, είναι δύσκολο για τις επιχειρήσεις που δεν δίνουν προτεραιότητα στην αύξηση της παραγωγικότητας ως έναν από τους βασικούς στόχους τους να επιβιώσουν και να ανταγωνιστούν μακροπρόθεσμα. Αυτό οδηγεί σε εξασθένηση της παραγωγικότητας, καθώς και σε μείωση του μεριδίου αγοράς, των πωλήσεων και της κερδοφορίας της εταιρείας. Συνεπώς, η παραγωγικότητα πρέπει να θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους δείκτες απόδοσης μιας επιχείρησης. Η ποιότητα των προϊόντων πλέον μετριέται με το επίπεδο σφαλμάτων ανά εκατομμύριο. Αυτά τα αυστηρά κριτήρια ποιότητας δεν μπορούν να ικανοποιηθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου και επισκευής. Ολόκληρο το σύστημα, από το στάδιο του σχεδιασμού, πρέπει να διαμορφωθεί έτσι ώστε να σχεδιάζει και να παράγει σωστά από την πρώτη προσπάθεια. Η Λιτή Διαχείριση και το Six Sigma διαθέτουν το δικό τους σύνολο εργαλείων και τεχνικών που μπορούν να ενισχύσουν τους στόχους μιας εταιρείας για βελτίωση αξίας και κερδοφορίας. Αν και οι δύο φιλοσοφίες προσεγγίζουν κυρίως τις βελτιώσεις με διαφορετικό τρόπο και νοοτροπία, μοιράζονται τον κοινό στόχο της βελτιστοποίησης της απόδοσης των διαδικασιών, της ενίσχυσης της αξίας και της αύξησης της ικανοποίησης των πελατών. Ως αποτέλεσμα αυτής της αναγνώρισης από ορισμένες ομάδες, στις αρχές της δεκαετίας του 2000 άρχισαν να εκδίδονται επιστημονικά άρθρα και βιβλία σχετικά με τον συνδυασμό Lean και Six Sigma .

Το Six Sigma, το οποίο εφαρμόζεται από πολλές κορυφαίες οργανώσεις παγκοσμίως τα τελευταία 10 χρόνια, βοηθά τις επιχειρήσεις να αυξήσουν την κερδοφορία και την ανάπτυξή τους, καθιστώντας κάθε διαδικασία πιο αποδοτική. Ωστόσο, το Six Sigma επικεντρώνεται στην ποιότητα και όχι στην ταχύτητα. Η έλλειψη ταχύτητας που χαρακτηρίζει το Six Sigma αντιμετωπίζεται από τη Λιτή Διαχείριση (Lean Management). Η Λιτή Διαχείριση είναι πιο αποτελεσματική για τη βελτίωση της ταχύτητας και της ροής των διαδικασιών, παρά για τη βελτίωση της ποιότητας. Συνεπώς, τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν οι τεχνικές του Lean Management και του Six Sigma συνδυάζονται, υποστηρίζοντας η μία την άλλη . Το Lean Six Sigma, που προκύπτει από τον συνδυασμό των διαδικασιών Λιτής Παραγωγής του Henry Ford στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και του Six Sigma της Motorola, αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στην ιστορία της βελτίωσης της παραγωγής. Και οι δύο εφαρμογές στοχεύουν στην επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα, που σημαίνει την εφαρμογή αλλαγών που προσθέτουν αξία, την ορθή επεξεργασία από την πρώτη φορά και την ταχεία και αποτελεσματική δράση. Από την μια ,η Λιτή Διαχείριση επικεντρώνεται στην εξάλειψη των απωλειών στις διαδικασίες και στη μείωση της πολυπλοκότητας. Σκοπός της είναι η ανάπτυξη λύσεων με τη χρήση

ελάχιστων πόρων (ανθρώπινων, υλικών και κεφαλαίων) και η έγκαιρη παράδοση των προϊόντων στους πελάτες. Η Λιτή Διαχείριση μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τομείς και να αναδείξει ευκαιρίες για αύξηση της απόδοσης. Από την άλλη, το Six Sigma παρέχει φιλοσοφία ποιότητας και αποτελεί στατιστικό εργαλείο για την παρακολούθηση της απόδοσης των διαδικασιών. Στόχος του είναι η μείωση της μεταβλητότητας στη διαδικασία και η εξάλειψη των σφαλμάτων. Ενώ τα εργαλεία της Λιτής Διαχείρισης εντοπίζουν προβλήματα ροής και μη παραγωγικές δραστηριότητες, το Six Sigma αυξάνει την αποδοτικότητα κάθε βήματος που προσθέτει αξία και ενισχύει τη Λιτή Παραγωγή/Διαχείριση. Τέλος, η στρατηγική Lean Six Sigma μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε όλους τους επιχειρηματικούς τομείς, όπως παραγωγή, σχεδιασμός, πωλήσεις, μάρκετινγκ, υπηρεσίες και προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά περιλαμβάνουν: μείωση κόστους, μείωση χρόνου παράδοσης, μείωση επιπέδων αποθέματος, βελτίωση ικανοποίησης πελατών, μείωση κόστους προϊόντος.

Η θεωρία των περιορισμών (Theory of Constraints -TOC)

Η Θεωρία των Περιορισμών (TOC) είναι μια φιλοσοφία συνεχούς βελτίωσης που αναπτύχθηκε από τους Goldratt και Cox η οποία είναι βασισμένη στην ιδέα ότι ένα σύστημα παραγωγής υπόκειται σε περιορισμούς. Η ποιότητά του μετριέται μέσω της ροής παραγωγής (throughput), των αποθεμάτων (inventory) και των λειτουργικών εξόδων (operational expenses). Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ροής παραγωγής, ενώ μειώνονται τα αποθέματα και τα λειτουργικά έξοδα με στόχο την αύξηση των εσόδων και την ενίσχυση των ανταγωνιστικών πλεονεκτημάτων, όπως η τιμή/κόστος, η ποιότητα προϊόντος και η αξιοπιστία παράδοσης. Ο Goldratt υποστηρίζει ότι ο στόχος μιας επιχείρησης είναι η αύξηση των εσόδων στο παρόν αλλά και στο μακροχρόνιο και άμεσο μέλλον. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να αυξηθεί η παραγωγικότητα ενός συστήματος λειτουργίας, ενώ τα αποθέματα και τα λειτουργικά έξοδα να μειώνονται. Η απόδοση οποιουδήποτε συστήματος περιορίζεται από τον ρυθμό παραγωγικότητας στο πιο αδύναμο σημείο του συστήματος, γνωστό ως περιορισμός. Ο εντοπισμός και η εξάλειψη αυτού του περιορισμού είναι η βασική ιδέα της Θεωρίας των Περιορισμών (TOC). Όπως

φαίνεται, η θεωρία των περιορισμών εστιάζει στη συνεχή βελτίωση του συστήματος μέσω της αντιμετώπισης των περιορισμών και μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε κάθε τομέα και μέγεθος εταιρείας. Η TOC αποτελεί λοιπόν μια διαδικασία για την ταυτοποίηση και τη βελτιστοποίηση του περιορισμού ενός συστήματος. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται ως συνεχής βελτίωση μέσω μιας συστηματικής μεθόδου TOC η οποία αποτελεί την εφαρμογή των εξής πέντε σταδίων/βημάτων :

1. Αναγνώριση/Ταυτοποίηση του περιορισμού του συστήματος
2. Εκμετάλλευση του περιορισμού του συστήματος (βεβαιωνόμαστε ότι ο περιορισμός λειτουργεί στο μέγιστο των δυνατοτήτων του.
3. Υποταγή στον περιορισμό του συστήματος (Συντονισμός των υπολοίπων μελών του συστήματος για να υποστηρίξουν τον περιορισμό
4. Εξάλειψη του περιορισμού του συστήματος (Βελτίωση ή εξάλειψη του περιορισμού αυξάνοντας την ικανότητα του με οποίον δυνατό τρόπο γίνεται)
5. Επανάληψη της διαδικασίας, εάν κατά τη διάρκεια σπάσει κάποιος περιορισμός. Παρατηρεί κανείς λοιπόν πως τα τρία πρώτα βήματα της εφαρμογής της TOC στοχεύουν στην ανάλυση και τη διόρθωση του συστήματος. Τα δύο τελευταία, το βήμα 4 και το βήμα 5, είναι βήματα συνεχούς βελτίωσης που διασφαλίζουν την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως στο Lean Six Sigma ,υπάρχουν πολλοί ερευνητές που δουλεύουν στους συνδυασμούς των μεθόδων συνεχούς βελτίωσης. Όπως και στο Lean Six Sigma ,η θεωρία των περιορισμών μπορεί να συνεργαστεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά με τα έξι σίγμα . Επιπλέον ένα άρθρο που προτάθηκε από ερευνητές ασχολήθηκε επίσης με το συνδυαστικό σύστημα μεταξύ TOC, Lean και Six Sigma, που ονομάζεται "TLS". Στην έρευνα αυτή, 21 εργοστάσια κλήθηκαν να υιοθετήσουν κάθε πολιτική για τη

βελτίωση βασικών επιδόσεων της εταιρείας.11 εργοστάσια με SS, 4 με Lean και 6 με TLS. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης έδειξε ότι τα εργοστάσια με TLS διακρίθηκαν στη μείωση κόστους. Συνεπώς μπορεί κανείς στην βιβλιογραφία να βρει διάφορους συνδυασμούς των πολιτικών συνεχούς βελτίωσης και ανάλογα την εφαρμογή και την περίπτωση να συμφέρει διαφορετική πολιτική .

Συνεισφορά των Πρακτικών Διαχείρισης Ποιότητας στην Απόδοση Βιωσιμότητας των Επιχειρήσεων

Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs)

Οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), γνωστοί και ως παγκόσμιοι στόχοι, αποτελούν ένα σύνολο από 17 αλληλένδετους παγκόσμιους στόχους που έχουν σχεδιαστεί ως «οδηγός» για την επίτευξη ενός καλύτερου και πιο βιώσιμου μέλλοντος για την ανθρωπότητα . Οι στόχοι αυτοί αποσκοπούν στην αντιμετώπιση των πιο πιεστικών παγκόσμιων προκλήσεων, όπως η φτώχεια, η ανισότητα, η κλιματική αλλαγή, η περιβαλλοντική υποβάθμιση, η ειρήνη και η δικαιοσύνη. Τα SDGs υιοθετήθηκαν από όλα τα Κράτη-Μέλη των Ηνωμένων Εθνών το 2015, στο πλαίσιο της Ατζέντας 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη. Οι στόχοι αυτοί δεν περιορίζονται μόνο σε θέματα οικονομικής ανάπτυξης ή προστασίας του περιβάλλοντος. Αντιθέτως, προσφέρουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που ενσωματώνει κοινωνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια, θέτοντας στο επίκεντρο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής για όλους, σε κάθε γωνιά του κόσμου. Η παρακάτω εικόνα μας προσφέρει μια οπτικοποίηση των στόχων αυτών .



Εικόνα 6. SDG's [5]

Το Πρότυπο ISO 14001

Το περιβαλλοντικό σύστημα διαχείρισης ISO 14001 είναι ένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο που παρέχει ένα πλαίσιο για τις επιχειρήσεις και τους οργανισμούς να διαχειρίζονται τις περιβαλλοντικές τους ευθύνες με έναν συστηματικό και βιώσιμο τρόπο. Στόχος του ISO 14001 είναι να βοηθήσει τις επιχειρήσεις να μειώσουν τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο, να βελτιώσουν την αποδοτικότητα στη χρήση πόρων και να συμμορφωθούν με τις εκάστοτε νομοθετικές απαιτήσεις. Παρέχει τις αρχές και τις απαιτήσεις για τη δημιουργία και εφαρμογή ενός συστήματος διαχείρισης περιβάλλοντος (ΣΔΠ), το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες οποιουδήποτε τύπου οργανισμού, ανεξαρτήτως κλάδου ή μεγέθους.

Η εφαρμογή του ISO 14001 περιλαμβάνει τον εντοπισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί μια επιχείρηση, την αξιολόγηση και την παρακολούθησή τους με στόχο τη συνεχή βελτίωση. Ο οργανισμός που υιοθετεί το πρότυπο, ουσιαστικά δεσμεύεται να μειώσει τη ρύπανση που προκαλεί, να συμβάλει στην πρόληψη πιθανών περιβαλλοντικών βλαβών και τελικά να ελαχιστοποιεί τη σπατάλη των πόρων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της υλοποίησης συγκεκριμένων δράσεων και προγραμμάτων, της θέσπισης περιβαλλοντικών στόχων και της συχνής επιθεώρησης και μέτρησης των επιδόσεων σε όλους αυτούς τους τομείς που αναφέραμε.

Τέλος , το ISO 14001 λειτουργεί ως ένα στρατηγικό εργαλείο , αφού η περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί πλέον βασικό κομμάτι της εταιρικής στρατηγικής για πολλές επιχειρήσεις. Στη σημερινή εποχή, όπου η πίεση για πιο βιώσιμες πρακτικές αυξάνεται, οι επιχειρήσεις με πιστοποίηση ISO 14001 αποκτούν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, καθώς θεωρούνται πιο αξιόπιστες από τους πελάτες αλλά και από τους επενδυτές.

Βιώσιμη Ανάπτυξη

Η βιώσιμη ανάπτυξη είναι μια επιταχυνόμενη τάση που είναι σημαντική για όλη την ανθρωπότητα. Οι άνθρωποι απολαμβάνουν υψηλότερη ποιότητα ζωής λόγω της ταχείας οικονομικής ανάπτυξης, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να αντιμετωπίσουν την σοβαρή περιβαλλοντική υποβάθμιση (ρύπανση, παγκόσμια θέρμανση κ.λπ.) και τα κοινωνικά προβλήματα (ασθένειες ή ανισότητα).

Η έννοια της βιωσιμότητας, είτε σε στρατηγικό είτε σε επιχειρησιακό επίπεδο, αποτελείται από τρεις διαστάσεις : την κοινωνική διάσταση (άνθρωποι), την περιβαλλοντική διάσταση και την οικονομική διάσταση (κέρδος). Η κοινωνική διάσταση αναφέρεται στην ισότητα και την ποιότητα ζωής όλων των ανθρώπων, είτε εργάζονται για την οργάνωση είτε όχι. Η περιβαλλοντική πτυχή σχετίζεται με τις επιπτώσεις που έχει η οργάνωση στα "ζωντανά και μη ζωντανά φυσικά συστήματα", όπως το έδαφος, οι υδάτινοι πόροι, η ατμόσφαιρα και τα οικοσυστήματα. Η οικονομική διάσταση αναφέρεται τόσο στις χρηματοοικονομικές όσο και στις μη χρηματοοικονομικές αξίες που δημιουργεί η οργάνωση και ωφελούν όχι μόνο τους μετόχους, αλλά και τις ομάδες ενδιαφερόμενων. Για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας οι τρεις αυτές διαστάσεις πρέπει να εναρμονιστούν, να ενσωματωθούν και να ισορροπηθούν αποτελεσματικά.

Παρά ταύτα, η κερδοφορία εξακολουθεί να αποτελεί προτεραιότητα για τις περισσότερες οργανώσεις. Για να αυξήσουν τα οικονομικά οφέλη, πολλές οργανώσεις θυσιάσαν τις περιβαλλοντικές πτυχές. Η ευαισθητοποίηση σχετικά με τη "βιώσιμη ανάπτυξη" τους ώθησε να επιτύχουν μια αποτελεσματική ισορροπία ανάμεσα στους τρεις τομείς — οικονομικά, περιβάλλον και κοινωνία. Για να το πετύχουν, οι επιχειρήσεις θα πρέπει να εφαρμόσουν τη "διαχείριση βιωσιμότητας" (Sustainability management), η οποία ορίζεται ως η επιτάχυνση της υιοθέτησης των βέλτιστων αρχών διαχείρισης, μοντέλων και πρακτικών σε όλο το σύστημα λειτουργίας και η δυνατότητα του περιβάλλοντος να επιτύχει βιώσιμη ανάπτυξη.

Ποιότητα εναντίον Βιωσιμότητας

Συνολικά, η προσέγγιση του στατιστικού ελέγχου ποιότητας στις παλιές βιομηχανίες δεν είχε καμία σχέση με την έννοια της βιωσιμότητας, καθώς η κύρια εστίασή της ήταν αποκλειστικά στην ποιότητα των τελικών προϊόντων και όχι στη συνολική διαχείριση των πόρων, της ενέργειας ή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτή η μονοδιάστατη προσέγγιση οδήγησε σε πρακτικές που ήταν επιβλαβείς τόσο για τις επιχειρήσεις όσο και για το περιβάλλον.

Από τη μία πλευρά, η έλλειψη προσοχής στη μείωση των αποβλήτων και στη διατήρηση των φυσικών πόρων σήμαινε ότι οι παλιές βιομηχανίες συχνά λειτουργούσαν με υπερβολικά υψηλά επίπεδα σπατάλης, αυξάνοντας έτσι τα κόστη παραγωγής και μειώνοντας την αποδοτικότητά τους. Οι επιχειρήσεις κατανάλωναν περισσότερους πόρους από όσους χρειάζονταν πραγματικά, ενώ παράλληλα παρήγαγαν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων, τα οποία συχνά απορρίπτονταν ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον, επιδεινώνοντας τη ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους.

Από την άλλη πλευρά, αυτή η έλλειψη προνοητικότητας όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις υπονόμευσε τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των ίδιων των βιομηχανιών. Οι επιχειρήσεις που εστίαζαν αποκλειστικά στην παραγωγή χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον συχνά βρέθηκαν αντιμέτωπες με αυστηρούς κανονισμούς και πρόστιμα για περιβαλλοντικές παραβάσεις, ενώ ταυτόχρονα υπέστησαν σημαντική ζημία στη φήμη τους. Οι καταναλωτές και οι κοινωνίες άρχισαν να απαιτούν από τις βιομηχανίες να αναλάβουν μεγαλύτερη περιβαλλοντική ευθύνη, γεγονός που ανάγκασε πολλές επιχειρήσεις να αναθεωρήσουν τις πρακτικές τους ή να αντιμετωπίσουν την απώλεια πελατών και εσόδων.

Επιπλέον, η έλλειψη βιώσιμων πρακτικών είχε και κοινωνικές συνέπειες, όπως η αδιαφορία για την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων, καθώς και για την ποιότητα ζωής στις τοπικές κοινότητες που επηρεάζονταν από την εκτεταμένη ρύπανση. Η εστίαση στον άμεσο οικονομικό κέρδος, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μακροπρόθεσμες συνέπειες, δημιούργησε ένα μοντέλο ανάπτυξης που ήταν μη βιώσιμο, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από κοινωνική σκοπιά.

Αυτή η προσέγγιση, με την πάροδο του χρόνου, έδειξε τα όριά της, καθώς οι επιχειρήσεις που δεν ενσωμάτωσαν τη βιωσιμότητα στις διαδικασίες τους κατέληξαν να υπονομεύουν την ίδια τους τη μακροπρόθεσμη επιτυχία. Στις σημερινές συνθήκες, η σύνδεση της

ποιότητας με τη βιωσιμότητα είναι απαραίτητη, καθώς οι επιχειρήσεις αναγνωρίζουν πλέον ότι η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η ορθολογική διαχείριση των πόρων όχι μόνο προστατεύουν το περιβάλλον αλλά ενισχύουν και τη δική τους ανταγωνιστικότητα και ανθεκτικότητα σε βάθος χρόνου.

Πώς το TQM Μπορεί να Συμβάλλει στην Επίτευξη της Βιώσιμης Ανάπτυξης

Η διαχείριση ποιότητας (QM), πέρα από τον κύριο στόχο της να παρέχει ανώτερη αξία στους πελάτες μέσω της συνεχούς βελτίωσης της αποδοτικότητας των διαδικασιών, αναγνωρίζεται επίσης ότι μοιράζεται παρόμοιους στόχους και κοινά στοιχεία εφαρμογής με το σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η διαχείριση ποιότητας, με αυτή την έννοια, μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη προσέγγιση που συμβάλλει στην απόδοση βιωσιμότητας (SP). Συνεπώς, το ερώτημα για το πώς η εφαρμογή των πρακτικών διαχείρισης ποιότητας επηρεάζει την απόδοση βιωσιμότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικό .

Πολλοί επαγγελματίες και ακαδημαϊκοί έχουν ερευνήσει και ενσωματώσει τους τομείς ενδιαφέροντος τους στις λειτουργίες με τους στόχους βιωσιμότητας. Το σύστημα διαχείρισης ποιότητας αποτελεί μία από τις εφικτές πρακτικές για την επίτευξη βιωσιμότητας. Διάφορες αξίες του TQM, όπως η εστίαση στις διαδικασίες αυτές καθ' αυτές και η προοπτική των συστημάτων (system perspective), καθώς και οι αξίες της βιώσιμης ανάπτυξης, όπως η εστίαση στους μέτοχους (stakeholder focus), και η βιωσιμότητα, συζητούνται ως αξίες του συστήματος διαχείρισης TQM-SD.

Το TQM ως σύστημα διαχείρισης μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει στοιχεία της Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development , SD). Η προσήλωση του TQM στη βελτίωση της οικονομικής βιωσιμότητας αποτελεί έναν τομέα πιθανής συνέργειας. Εδώ αξίζει βέβαια να αναφέρουμε ότι ένα υγιές κέρδος είναι απαραίτητο για την οικονομική βιωσιμότητα, αλλά δεν αποτελεί το μοναδικό συστατικό της επιτυχίας . Το κέρδος πρέπει να συμπληρώνεται με προσπάθειες για τη μείωση των εσωτερικών απωλειών, οι οποίες συμβάλλουν σε μη βιώσιμες επιδόσεις. Ένας τρόπος αξιολόγησης αυτών των απωλειών είναι η χρήση θεωριών που βασίζονται στο κόστος της φτωχής ποιότητας (Cost of poor Quality, CPQ), με εστίαση στη βιωσιμότητα. Τα στοιχεία δείχνουν ότι το υψηλό CPQ αντιστοιχεί σε χαμηλή βιωσιμότητα. Συνεπώς , αυτό με τη σειρά του υποδηλώνει ότι η

αυξημένη έμφαση στη βελτίωση των διαδικασιών μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη βιωσιμότητα.

Τα εμπειρικά δεδομένα δείχνουν επιπλέον ότι οι επιχειρήσεις που εφαρμόζουν τη διαχείριση ποιότητας σε συνδυασμό με το περιβαλλοντικό σύστημα ISO 14001 έχουν μεγαλύτερα οφέλη από άλλες. Επίσης, ο ρόλος της «λιτής παραγωγής» στην περιβαλλοντική απόδοση έχει επίσης αποδειχθεί εμπειρικά, αφού εξ' ορισμού κιόλας η ιδιά αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων κατά την παραγωγική διαδικασία. Τέλος, είτε πρόκειται για συνολική διαχείριση ποιότητας είτε για συγκεκριμένες προσεγγίσεις, όπως η λιτή διαχείριση ή το σύστημα ISO 9001, υπάρχουν κοινά σημεία μεταξύ των αρχών διαχείρισης ποιότητας και της βιωσιμότητας.

Κεφάλαιο 3 : Η Βιομηχανία 4.0 – Έξυπνα Εργοστάσια

Μια ανασκόπηση του πως φτάσαμε εδώ

1^η Βιομηχανική Επανάσταση

Η πρώτη βιομηχανική εποχή ξεκίνησε τον 18ο αιώνα με την εισαγωγή της υδροκίνησης και της ενέργειας στην παραγωγή. Ήδη γνωρίζαμε τη λειτουργία της ατμομηχανής. Η μεγαλύτερη πρόοδος στην αύξηση της ανθρώπινης παραγωγικότητας ήταν η χρήση της για βιομηχανικούς σκοπούς. Οι ατμομηχανές χρησιμοποιούνταν για παροχή ενέργειας αντί για μυϊκά κινούμενους αργαλειούς. Καινοτομίες όπως το ατμόπλοιο ή (περίπου 100 χρόνια αργότερα) η ατμοκίνητη ατμομηχανή οδήγησαν σε μεγάλες βελτιώσεις. Καθώς οι άνθρωποι και τα εμπορεύματα μπορούσαν να ταξιδεύουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε λιγότερο χρόνο, η βιομηχανική εποχή στη Βρετανία ολοκληρώθηκε στα τέλη του 18ου αιώνα (1760-1840), εισάγοντας τη χρήση μηχανημάτων. Αυτή η μετάβαση περιλάμβανε την αλλαγή από χειροκίνητη μηχανική στη χρήση ατμοκινήτων και υδροκίνησης ως πηγές ενέργειας. Το 1784 κατασκευάστηκε ο πρώτος μηχανοκίνητος αργαλειός.

Με την αύξηση της απόδοσης και του όγκου παραγωγής, οι μικρές εταιρείες μεγάλωσαν, εξυπηρετώντας περισσότερους πελάτες και εξελίχθηκαν σε μεγαλύτερες οργανώσεις που αντιπροσώπευαν μεγαλύτερο αριθμό ιδιοκτητών, διευθυντών και εργαζομένων. Η

εποχή αυτή, γνωστή ως Business 1.0, μπορεί να θεωρηθεί η αρχή της εταιρικής φιλοσοφίας που βασίζεται εξίσου στην αποτελεσματικότητα, την κερδοφορία και το μέγεθος. Επίσης, ανέδειξε την εξέλιξη της επιχειρηματικής κουλτούρας, ενσωματωμένη στη διαχείριση της εποχής, για να αυξήσει την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων παραγωγής.

Οι βασικές διαδικασίες απλοποιήθηκαν μέσω πολλών μεθόδων διαχείρισης εργοστασίων, όπως η διαίρεση της εργασίας, η παραγωγή "just-in-time" και οι πρακτικές λιτής παραγωγής, που συνέβαλαν στη βελτίωση της παραγωγής και της απόδοσης.

2^η Βιομηχανική Επανάσταση

Ξεκινώντας από τον 19ο αιώνα, το φαινόμενο του ηλεκτρισμού εισήχθη ως η κύρια πηγή ενέργειας. Ένα από τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρισμού σε σύγκριση με τον ατμό και το νερό ήταν η ευκολία χρήσης του. Αυτό το χαρακτηριστικό έκανε αυτήν την πηγή ενέργειας χρησιμοποιήσιμη σε ειδικές μηχανές και διαφορετικά περιβάλλοντα. Εκτός από την εμφάνιση του ηλεκτρισμού, τα εργαλεία διαχείρισης σημείωσαν επίσης σημαντική πρόοδο κατά την περίοδο αυτή και βελτίωσαν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των βιομηχανιών. Η διαίρεση της εργασίας είναι ένα χαρακτηριστικό αυτής της περιόδου που αύξησε τα κέρδη. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δημιουργήθηκαν η μαζική παραγωγή και οι γραμμές συναρμολόγησης, ενώ άνθρωποι όπως ο Frederick Taylor μελέτησαν τις εργασίες και την παραγωγικότητα των εργαζομένων. Ως αποτέλεσμα, εισήχθησαν οι έννοιες και οι αρχές της ευέλικτης και λιτής παραγωγής, και η αύξηση της ποιότητας και της ποσότητας παραγωγής ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα των παραγωγών.

3^η Βιομηχανική Επανάσταση

Η Βιομηχανία 3.0 ξεκίνησε με την είσοδο της των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο προσκήνιο της τεχνολογίας, στα μέσα του 20ού αιώνα. Αυτή η τεχνολογική πρόοδος επέτρεψε την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων παραγωγής στα εργοστάσια, αλλάζοντας ριζικά τον τρόπο με τον οποίο εκτελούνταν οι εργασίες. Η αυτοματοποίηση

των διαδικασιών παραγωγής μείωσε δραματικά τις απαιτήσεις για χειρωνακτική εργασία , απλοποίησε τα καθήκοντα των εργαζομένων, ενώ παράλληλα ενίσχυσε την αποδοτικότητα και τη συνέπεια στις παραγωγικές διαδικασίες.

Με την αυτοματοποίηση, οι βιομηχανίες ήταν σε θέση να αυξήσουν την ταχύτητα και τον όγκο παραγωγής, φέρνοντας στο προσκήνιο τη μαζική παραγωγή σε νέες κλίμακες. Αυτό επέτρεψε στις επιχειρήσεις να μειώσουν το κόστος παραγωγής και να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων. Η Βιομηχανία 3.0 καθιέρωσε τη χρήση των ρομποτικών συστημάτων και των αυτοματοποιημένων μηχανών, που μπορούσαν να εκτελούν επαναλαμβανόμενες εργασίες με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, δίνοντας ώθηση στην παραγωγικότητα και μειώνοντας όσο ήταν δυνατό τα σφάλματα. Η μετάβαση αυτή δεν άλλαξε μόνο τις βιομηχανικές διαδικασίες αλλά και τη δομή των επιχειρήσεων, καθώς η εξάρτηση από την ανθρώπινη εργασία μειώθηκε σημαντικά και οι τεχνικές γνώσεις έγιναν πιο απαραίτητες από ποτέ.

Τα συστήματα PLC (Programmable Logic Circuits) έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη Βιομηχανία 3.0. Τα PLC είναι ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την παρακολούθηση μηχανημάτων και διαδικασιών στις βιομηχανίες μέχρι και σήμερα. Αναπτύχθηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1960 για να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου που βασίζονταν σε μηχανικούς διακόπτες και ρελέ. Τα PLC επέφεραν επανάσταση στη βιομηχανία, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία, ακρίβεια και ταχύτητα στον έλεγχο των μηχανημάτων.

Με την έλευση της Βιομηχανίας 3.0, τα PLC εξελίχθηκαν σε ένα βασικό εργαλείο για τη βιομηχανική αυτοματοποίηση. Αυτά τα συστήματα ήταν προγραμματιζόμενα και μπορούσαν να εκτελούν πολύπλοκες λειτουργίες, όπως ο έλεγχος της ροής παραγωγής, η παρακολούθηση αισθητήρων και η διαχείριση ενεργειών των μηχανημάτων με βάση τις δεδομένες συνθήκες.

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των PLC ήταν η δυνατότητα τους να προσαρμόζονται γρήγορα σε αλλαγές στη διαδικασία παραγωγής, χωρίς να χρειάζονται εκτεταμένες τροποποιήσεις στον εξοπλισμό. Οι προγραμματιστές μπορούσαν να αναβαθμίσουν ή να αλλάξουν τις λειτουργίες των PLC απλά μέσω αλλαγών στο λογισμικό, καθιστώντας τα ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση των συνεχών αλλαγών στις απαιτήσεις της παραγωγής.

Τέλος, τα PLC παρείχαν υψηλή αξιοπιστία και ήταν ανθεκτικά σε σκληρά περιβάλλοντα παραγωγής, γεγονός που τα έκανε ιδανικά για χρήση σε διάφορες βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η ενέργεια .

4^η Βιομηχανική επανάσταση

Ανέκαθεν, κάθε βιομηχανική επανάσταση ερχόταν ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής ανάπτυξης της εποχής. Από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση, με την εισαγωγή της μηχανής ατμού, μέχρι την τρίτη, με την έλευση της αυτοματοποίησης και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η τεχνολογία πάντα αποτελούσε τον βασικό κινητήριο μοχλό για την εξέλιξη των παραγωγικών διαδικασιών και την αύξηση της παραγωγικότητας. Κάθε νέα ανακάλυψη ή καινοτομία οδηγούσε σε ριζικές αλλαγές στις βιομηχανίες, δημιουργώντας νέα πρότυπα παραγωγής, επαναπροσδιορίζοντας τις αγορές και δίνοντας ώθηση στην οικονομική ανάπτυξη.

Όπως συνέβαινε στις προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις, έτσι και σήμερα, στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0), η τεχνολογία είναι η κύρια δύναμη που κινεί την επανάσταση. Η 4η βιομηχανική επανάσταση φέρνει την εισαγωγή και την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η ρομποτική, τα μεγάλα δεδομένα (Big Data) και η υπολογιστική στο νέφος (Cloud computing), οι οποίες αλλάζουν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι βιομηχανίες λειτουργούν και αλληλοεπιδρούν.

Η βασική διαφορά αυτής της επανάστασης από τις προηγούμενες είναι η άρτια σύνδεση μεταξύ των φυσικών και ψηφιακών συστημάτων, μέσω των δικτύων . Αυτό οδηγεί στη δημιουργία «έξυπνων» εργοστασίων, όπου η παραγωγή γίνεται αυτοματοποιημένη, προσαρμόσιμη και σε μεγάλο βαθμό αυτορρυθμιζόμενη. Η τεχνολογία δεν είναι απλώς ένα εργαλείο για τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας· είναι πλέον ο πυρήνας της λειτουργίας των επιχειρήσεων. Η Βιομηχανία 4.0 ορίζεται ως ένα νέο επίπεδο οργάνωσης και ελέγχου σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας του κύκλου ζωής των προϊόντων, με στόχο την ικανοποίηση των όλο και πιο εξατομικευμένων απαιτήσεων των πελατών

Ανάλυση των τεχνολογιών των έξυπνων εργοστασίων

IoT (Internet of Things)

Ο όρος "Internet of Things" (IoT) επινοήθηκε από τον Kevin Ashton κατά τη διάρκεια μιας παρουσίασης στην εταιρεία Procter & Gamble το 1999, με τον ορό "thing" να μπορεί να είναι οποιαδήποτε συσκευή με οποιοδήποτε τύπο αισθητήρα ενσωματωμένο με δυνατότητα συλλογής δεδομένων και μετάδοσης τους μέσω του δικτύου χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση. Ο Ashton είναι ένας από τους ιδρυτές του Εργαστηρίου Αυτόματης Αναγνώρισης του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT). Πρωτοστάτησε στην τεχνολογία RFID (η οποία χρησιμοποιείται στους ανιχνευτές barcodes) στον τομέα της διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας και ίδρυσε την εταιρεία Zensi, που κατασκευάζει τεχνολογίες ανίχνευσης και παρακολούθησης ενέργειας. Το Internet of Things αποτελεί ένα αναδυόμενο ζήτημα τεχνικής, κοινωνικής και οικονομικής σημασίας. Καταναλωτικά προϊόντα, διαρκή αγαθά, αυτοκίνητα και φορτηγά, βιομηχανικά εξαρτήματα και εγκαταστάσεις, αισθητήρες και άλλα καθημερινά αντικείμενα συνδυάζονται και ενσωματώνονται με τη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο και τις ισχυρές δυνατότητες ανάλυσης δεδομένων, κάτι που υπόσχεται να μεταμορφώσει τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε. Μια σημαντική αλλαγή στις καθημερινές μας συνήθειες είναι ήδη εμφανής με την ευρεία εφαρμογή των συσκευών και τεχνολογιών IoT. Το IoT βρίσκεται παντού, αν και πολλές φορές δεν το βλέπουμε ή δεν γνωρίζουμε ότι μια συσκευή είναι μέρος του.

Για τους καταναλωτές, νέα προϊόντα IoT, όπως οι συσκευές με δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο, τα συστήματα αυτοματισμού σπιτιών και οι συσκευές διαχείρισης ενέργειας, μας οδηγούν στη δημιουργία του "έξυπνου σπιτιού", το οποίο προσφέρει μεγαλύτερη ασφάλεια και ενεργειακή αποδοτικότητα.

Το Internet of Things (IoT) με λίγα λόγια συνιστά ένα πλαίσιο όπου όλα τα αντικείμενα έχουν μια αναπαράσταση και παρουσία στο διαδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, αποσκοπεί στην παροχή νέων εφαρμογών και υπηρεσιών, γεφυρώνοντας τον φυσικό και ψηφιακό κόσμο. Σε αυτό το πλαίσιο, οι επικοινωνίες Μηχανής-προς-Μηχανή (M2M) αποτελούν τη βασική επικοινωνία που επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ των αντικειμένων και των εφαρμογών στο cloud.

Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων, IIoT (Industrial Internet of Things)

Η βιομηχανική εφαρμογή του Internet of Things (IoT) καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συνδέσεων μεταξύ αντικειμένων, τόσο εντός όσο και εκτός της βιομηχανικής μονάδας. Εντός των μονάδων, πολλές εφαρμογές IoT περιλαμβάνουν έξυπνες λύσεις αυτοματοποίησης και ελέγχου, όπως παρακολούθηση της παραγωγής, χρήση φορητών συσκευών και επαυξημένης πραγματικότητας στους χώρους εργασίας, καθώς και απομακρυσμένο έλεγχο PLC ή αυτοματοποιημένα συστήματα ποιοτικού ελέγχου. Πολλές μελέτες δείχνουν ότι οι κύριοι παράγοντες για τους κατασκευαστές OEM (Original Equipment Manufacturers) προκειμένου να υιοθετήσουν λύσεις IoT είναι η μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας (idle time) και φυσικά ως επακόλουθο, η εξοικονόμηση κόστους.

Η αρχιτεκτονική του IoT έχει αναδειχθεί ως ένας δημοφιλής και ισχυρός τρόπος παρακολούθησης της χρήσης των μηχανημάτων, στέλνοντας πολύτιμα δεδομένα απόδοσης στους χειριστές μέσω ταμπλό. Με αυτόν τον τρόπο, οι χειριστές ενημερώνονται για το ποια μηχανήματα λειτουργούν πιο αποδοτικά από άλλα, κάτι που μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της παραγωγής, κυρίως εξαλείφοντας τα σημεία συμφόρησης που οφείλονται σε μηχανήματα με χαμηλή απόδοση και τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση της απόδοσης συσκευών σε ένα ή περισσότερα εργοστάσια. Στη συνέχεια θα δούμε πως το IoT με τον ερχομό των υπολοίπων τεχνολογιών της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι του «παζλ». Έχοντας αυτή την βάση της επικοινωνίας μεταξύ μηχανημάτων, οι τεχνολογίες όπως τεχνητή νοημοσύνη και κυβερνο-φυσικά συστήματα, cloud computing έρχονται ουσιαστικά να κουμπώσουν με το IoT, έτσι ώστε να δημιουργήσουν αυτό που αναφερόμαστε ως έξυπνο εργοστάσιο.

Κυβερνο-ασφάλεια (Cyber security)

Η κυβερνο-ασφάλεια αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την υιοθέτηση του Βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων (IIoT) λόγω της αυξημένης συνδεσιμότητας και της

ενσωμάτωσης συσκευών, συστημάτων και δικτύων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η διασυνδεδεμένη φύση του IIoT εκθέτει τις βιομηχανίες σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών κυβερνο-απειλών, συμπεριλαμβανομένων παραβιάσεων δεδομένων, μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και ακόμα και σαμποτάζ κρίσιμων υποδομών. Επομένως, η διασφάλιση της ασφάλειας αυτών των συστημάτων συνιστά υψίστης σημασίας για την προστασία των λειτουργιών, την ασφάλεια ευαίσθητων δεδομένων και τη διατήρηση της εμπιστοσύνης των ενδιαφερόμενων μερών.

Τα περιβάλλοντα IIoT συχνά διαχειρίζονται μεγάλα ποσά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, κρίσιμες διαδικασίες παραγωγής και αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου, γεγονός που τα καθιστά ελκυστικούς στόχους για κυβερνο-εγκληματίες. Μια επιτυχημένη επίθεση θα μπορούσε να οδηγήσει σε διακοπή λειτουργιών, οικονομική ζημιά, κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας ή ακόμη και φυσική βλάβη σε εξοπλισμό και προσωπικό. Ως εκ τούτου, η διασφάλιση αυτών των συστημάτων είναι απαραίτητη για την αποφυγή τέτοιων κινδύνων και απειλών.

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των συστημάτων IIoT, τα οποία περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό παλαιότερων υποδομών και νέων τεχνολογιών, καθιστά το τοπίο της κυβερνο-ασφάλειας ακόμα πιο περίπλοκο. Οι βιομηχανικοί πάροχοι πρέπει να εφαρμόσουν ολοκληρωμένες στρατηγικές κυβερνο-ασφάλειας που να αντιμετωπίζουν αδυναμίες σε ολόκληρο το οικοσύστημα του IIoT — από τους αισθητήρες έως τις πλατφόρμες που βασίζονται στο cloud και τα συστήματα ανάλυσης δεδομένων. Αυτό απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει ανίχνευση απειλών, συνεχή παρακολούθηση, τακτικές ενημερώσεις λογισμικού και συνεργασία με ειδικούς στην κυβερνο-ασφάλεια, για να διασφαλιστεί ότι τα βιομηχανικά συστήματα παραμένουν ανθεκτικά απέναντι στις αναδυόμενες απειλές.

Συμπερασματικά, ενώ το IIoT προσφέρει σημαντικά οφέλη όσον αφορά την αποδοτικότητα και την καινοτομία, η επιτυχής υιοθέτησή του εξαρτάται από την αντιμετώπιση του κρίσιμου αυτού ζητήματος της κυβερνοασφάλειας. Οι βιομηχανίες θα πρέπει να δίνουν προτεραιότητα στην ανάπτυξη ισχυρών πλαισίων ασφαλείας για την προστασία των συστημάτων τους και τη διασφάλιση της συνεχούς ανάπτυξης και επιτυχίας των τεχνολογιών IIoT.

Κυβερνο-φυσικά συστήματα (Cyber -physical systems)

Ένα κυβερνο-φυσικό σύστημα (CPS) συνιστά μια ενσώματη υπολογιστική και φυσικών συστημάτων. Οι ενσωματωμένοι υπολογιστές παρακολουθούν και ελέγχουν τις φυσικές διεργασίες, συνήθως με βρόχους ανάδρασης, όπου οι φυσικές διεργασίες επηρεάζουν τους υπολογισμούς και το αντίστροφο.

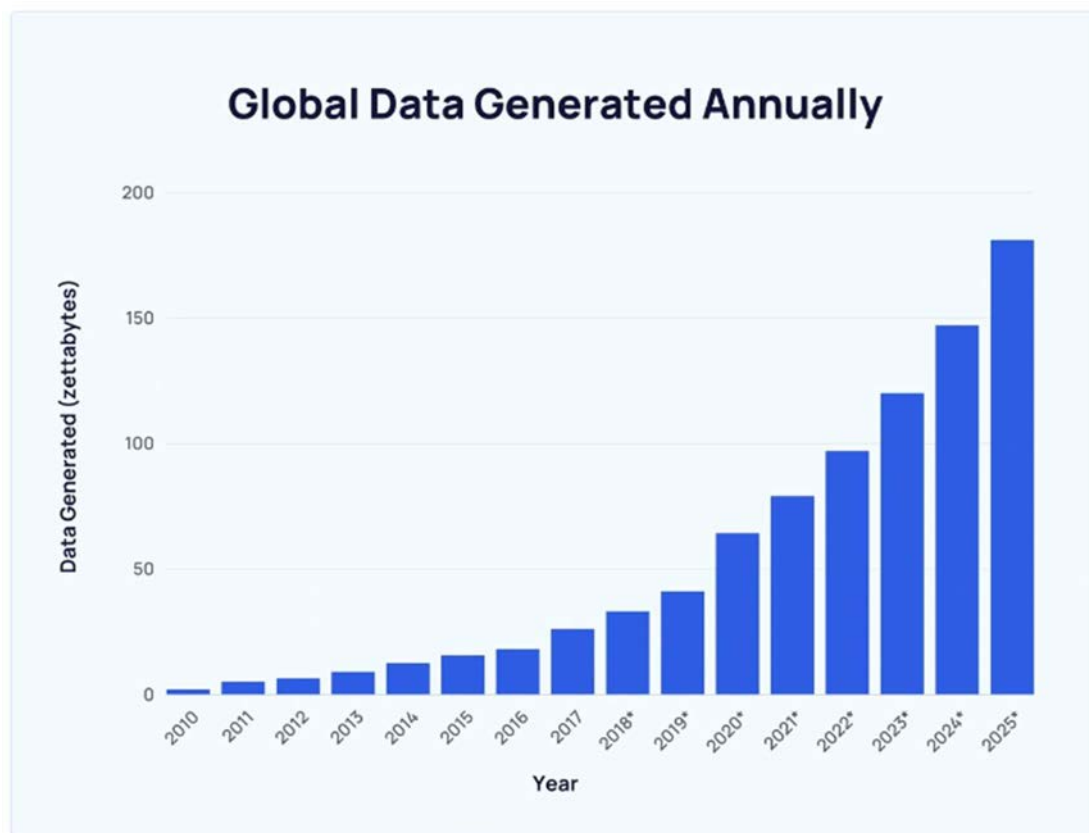
Οι εφαρμογές του CPS περιλαμβάνουν συστήματα αυτοκινήτων, κατασκευή, ιατρικές συσκευές, στρατιωτικά συστήματα, υποβοηθούμενη διαβίωση, έλεγχος και ασφάλεια κυκλοφορίας, έλεγχος διεργασιών, παραγωγή και διανομή ενέργειας, εξοικονόμηση ενέργειας, HVAC (θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός), αεροσκάφη, όργανα, συστήματα διαχείρισης νερού, τρένα, διαχείριση περιουσιακών στοιχείων και κατανεμημένη ρομποτική (τηλεϊατρική).

Το CPS συνδυάζει μοντέλα μηχανικής και μεθόδους από τη μηχανολογική, περιβαλλοντική, πολιτική, ηλεκτρική, βιοϊατρική, χημική, αεροναυπηγική και βιομηχανική μηχανική με τα μοντέλα και τις μεθόδους της επιστήμης των υπολογιστών. Ο όρος «κυβερνο-φυσικά συστήματα» εμφανίστηκε γύρω στο 2006, όταν επινοήθηκε από την Helen Gill στο Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ο σχετικός όρος «κυβερνοχώρος» αποδίδεται στον William Gibson, ο οποίος χρησιμοποίησε τον όρο στο μυθιστόρημα *Neuromancer*, αλλά οι ρίζες του όρου CPS είναι παλαιότερες και βαθύτερες. Θα ήταν πιο ακριβές να δούμε τους όρους «κυβερνοχώρος» και «κυβερνοφυσικά συστήματα» ως προερχόμενοι από την ίδια ρίζα, «κυβερνητική» (cybernetics), που επινοήθηκε από τον Norbert Wiener, έναν Αμερικανό μαθηματικό που είχε τεράστιο αντίκτυπο στην ανάπτυξη της θεωρίας των συστημάτων ελέγχου. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, ο Wiener πρωτοστάτησε στην τεχνολογία για την αυτόματη σκόπευση και εκτόξευση αντιαεροπορικών όπλων. Αν και οι μηχανισμοί που χρησιμοποίησε δεν αφορούσαν ψηφιακούς υπολογιστές, οι αρχές που εμπλέκονται είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα σε συστήματα ελέγχου ανάδρασης που βασίζονται σε υπολογιστή. Ο Wiener πήρε τον όρο από την ελληνική λέξη «κυβερνήτης».

Big Data (Μεγάλα Δεδομένα) και data analytics (ανάλυση δεδομένων)

Η εξέλιξη λοιπόν του IoT και του CPS που έχει ως αποτέλεσμα την απολυτή συνδεσιμότητα όλων των αντικειμένων του φυσικού κόσμου με το διαδίκτυο αλλά και μεταξύ τους, συνεπάγεται με την γέννηση σε κάθε πραγματική στιγμή τεράστιων ποσών δεδομένων. Τέτοια δεδομένα μπορούν να μας μεταφέρουν ότι είδους πληροφορία μπορούμε να φανταστούμε όπως, αριθμούς, ημερομηνίες, ώρες, λεπτά, δευτερόλεπτα, κείμενα, , εικόνες, βίντεο, γεωγραφικές συντεταγμένες και ούτω κάθε εξής. Εμείς ως απλοί χρήστες τα αντιλαμβανόμαστε με την πληροφορία που εμπεριέχουν, ωστόσο για να μπορέσουν αυτά τα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά στην επιστήμη των υπολογιστών χρησιμοποιείται η έννοια της δομής δεδομένων (data structure). Η δομή δεδομένων αντικατοπτρίζει τους δυνατούς τρόπους οργάνωσης, και αποθήκευσης τους σε βάσεις δεδομένων (databases).

Τα δεδομένα ουσιαστικά ερχόμενα ως απόρροια της ανάπτυξης των υπολοίπων τεχνολογιών, από μόνα τους δεν μας προσδίδουν καμία αξία. Εκτός και αν γνωρίζουμε πως να επωφεληθούμε από αυτά.



Εικόνα 7. Ετήσια διεθνή παραγωγή δεδομένων [6]

Οι τεράστιες αυτές ποσότητες δεδομένων (big data) δημιούργησαν την ανάγκη για την εισαγωγή μιας νέας επιστήμης , που είναι γνωστή ως επιστήμη των δεδομένων (data science). Η επιστήμη αυτή ασχολείται με την αποθήκευση, επεξεργασία και χειραγώγηση δεδομένων κάθε είδους με σκοπό την εύρεση ζωτικής σημασίας συμπερασμάτων και πληροφοριών (insights) για τους κάτοχους τους. Τέτοιες έννοιες ήταν ήδη γνωστές στην στατιστική και τα μαθηματικά και οι εταιρίες επιστράτευαν ομάδες αναλυτών για να μπορέσουν να εκμεταλλευτούν τα πολύτιμα τους δεδομένα . Ωστόσο με την ραγδαία εξέλιξη σε υπολογιστικά εργαλεία χειραγώγησης δεδομένων όπως το excel και διάφορες ανοιχτού κώδικα (open source) γλώσσες προγραμματισμού όπως η SQL (structured query language) και η python ,πλέον η θεωρία καθίσταται πιο εφικτή και πιο εύκολη από ποτέ να εφαρμοστεί στην πράξη. Τα δεδομένα δίνουν στους επιχειρηματίες ολοένα και περισσότερες ευκαιρίες για βελτιστοποίηση σε μια πληθώρα διεργασιών σε όλο το μήκος της επιχειρηματικής τους δραστηριότητας, όπως το μάρκετινγκ , η παραγωγή , οι πωλήσεις ,οι αγορές ,η εφοδιαστική αλυσίδα συντήρηση εξοπλισμού με άμεσα αποτελέσματα στα κέρδη . Έτσι ο 21ς αιώνας βρίσκει τις εταιρίες κάθε είδους να κάνουν μαζικές προσλήψεις εξειδικευμένου προσωπικού με ρόλους όπως, αναλυτές δεδομένων (data analyst) , επιστήμονες δεδομένων (data scientist) και μηχανικούς δεδομένων (data engineer) .

Τα δεδομένα είναι η βάση για όλες σχεδόν τις δραστηριότητες που εκτελούνται σήμερα, είτε πρόκειται για τον τομέα της εκπαίδευσης, έρευνας, υγειονομικής περίθαλψης, τεχνολογίας, λιανικό εμπόριο ή οποιαδήποτε άλλη βιομηχανία. Ο προσανατολισμός των επιχειρήσεων έχει αλλάξει από την εστίαση στα προϊόντα (product -based) , στην εστίαση των δεδομένων τους (data-based) και οι αποφάσεις που λαμβάνει πλέον ένας οργανισμός για την βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη στρατηγική του είναι πλέον οδηγούμενη από την πληροφορία που εξάγεται από την αποτελεσματική χρήση των δεδομένων τους (data driven decisions).

Υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing)

Όπως είναι φανερό , ο τεράστιος αυτός όγκος των δεδομένων και πληροφοριών έχει δημιουργήσει την ανάγκη πρώτον για την ασφαλή αποθήκευση τους και δεύτερον για την

εκτεταμένη και ολοένα αυξανόμενη υπολογιστική δύναμη που απαιτείται για την ανάλυση τους. Η αποθήκευση των δεδομένων που παράγει μια μεγάλου σκέλους εταιρία σε σκληρούς δίσκους πλέον καθίσταται αντιπαραγωγική, μη πρακτική ,μη ασφαλής και σε πολλές ακόμα περιπτώσεις πρακτικά αδύνατη . Επιπρόσθετα , διάφορες αναλύσεις που χρησιμοποιούν τεχνικές μηχανικής μάθησης, βαθιάς μάθησης και τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης , όπου απαιτείται εκπαίδευση των μοντέλων , έχουν εκτοξεύσει την ανάγκη για γρήγορη και αποδοτική υπολογιστική δύναμη και σε πάρα πολλές πλέον περιπτώσεις οι απλοί επεξεργαστές (CPU) δεν αρκούν , πάρα την συνεχή τους εξέλιξη .

Οι επιχειρήσεις προκειμένου να καλύψουν τις αποθηκευτικές τους ανάγκες , πρέπει να αγοράζουν φυσικούς διακομιστές και μια πληθώρα δομών .Τα αποθηκευτικά αυτά συστήματα απαιτούν έναν φυσικό χώρο, συνήθως ένα εξειδικευμένο δωμάτιο με επαρκή ισχύ και ψύξη και εξειδικευμένο προσωπικό για την αποδοτική διαχείριση τους .

Αυτή η μακρά διαδικασία είναι δύσκολο να κλιμακωθεί όταν αυξάνεται η ζήτηση ή επεκτείνεται η επιχείρηση και με λίγα λόγια προσδίδει τεράστια κόστη . Το cloud computing ,έρχεται να καλύψει όλες αυτές τις ανάγκες. Το cloud computing είναι μια υπηρεσία η οποία μας προσφέρει διαδικτυακό χώρο αποθήκευσης και διαδικτυακούς υπολογιστικούς χώρους . Στην πραγματικότητα οι εταιρίες που προσφέρουν υπηρεσίες cloud έχουν επενδύσει σε μεγάλες εγκαταστάσεις που εκτείνονται σε χιλιάδες στρέμματα γης,σε χώρες με φτηνή ενέργεια και εργατικό δυναμικό και δίνουν την δυνατότητα στους οργανισμούς να μοιράζονται τις εγκαταστάσεις αυτές εξ' αποστάσεως με την χρήση του διαδικτύου .Οι πιο δημοφιλείς εταιρίες παροχής υπηρεσιών δημοσίου cloud (public cloud) είναι η Amazon Web Services (AWS) , η Microsoft με το Microsoft Azure , η Google Cloud Platform, η IBM cloud , oracle cloud και η κινεζική Alibaba cloud .Οι τύποι των μοντέλων cloud είναι τρεις .Το δημόσιο cloud (public cloud), το ιδιωτικό(private cloud)στο οποίο τα ιδρύματα επενδύουν στα δικά τους data centers και το υβριδικό (hybrid cloud) μοντέλο το οποίο αποτελεί μια μίξη από τα προηγούμενα δυο . Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την χρήση του υπηρεσιών cloud ποικίλλουν και αναφέρω μερικά από αυτά παρακάτω :

- Οι υπηρεσίες cloud προσδίδουν **ευελιξία** στις επιχειρήσεις . Λόγω της αρχιτεκτονικής τους η χρήστες έχουν πρόσβαση στα δεδομένα τους από κάθε γωνιά του πλανήτη με μια απλή σύνδεση στο ιντερνέτ .

- Οι εταιρίες μπορούν να αναπτύσσονται με **αποδοτικούς** ρυθμούς δημιουργώντας νέα τμήματα , νέα εργοστάσια , νέες εφαρμογές έτοιμες για παραγωγή χωρίς να ανησυχούν για τις υποδομές υποστήριξης τους .
- Οι βάσεις δεδομένων στο cloud προσδίδουν **ασφάλεια** .Παλαιότερα μια φυσική καταστροφή ή ένα ατύχημα που συντελούσε σε καταστροφή των σκληρών δίσκων είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια όλων των αποθηκευμένων δεδομένων της επιχείρησης . Ωστόσο με την χρήση cloud τα δεδομένα είναι πάντα προσβάσιμα και ασφαλή . Επιπρόσθετα , είναι αποδεδειγμένο πλέον ότι οι κίνδυνοι που αφορούν την κυβερνο-ασφαλεία των δεδομένων είναι μικρότερη από την παραδοσιακές αποθηκευτικές μεθόδους .
- Η υιοθέτηση τεχνολογιών public cloud είναι σχετικά **οικονομική** αν την συγκρίνουμε με την εξολοκλήρου ανάπτυξη της από τις ίδιες τις εταιρίες σε ατομικό επίπεδο . Δεν χρειάζεται να υπερτιμούν την ικανότητα του κέντρου δεδομένων τους (data centers) για να χειριστούν απροσδόκητες αυξήσεις στη ζήτηση ή την επιχειρηματική ανάπτυξη. Αντιθέτως , οι επιχειρήσεις πληρώνουν μόνο για τους υπολογιστικούς πόρους που χρησιμοποιούν.
- Τέλος ,το Cloud Computing προσφέρει σχεδόν **απεριόριστους πόρους για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων** για την επιτάχυνση της έρευνας και τη μείωση του χρόνου για την εξαγωγή αναγκαίων και πολύτιμων πληροφοριών.

Μηχανική μάθηση ,βαθιά μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη (Machine learning, deep learning, artificial intelligence)

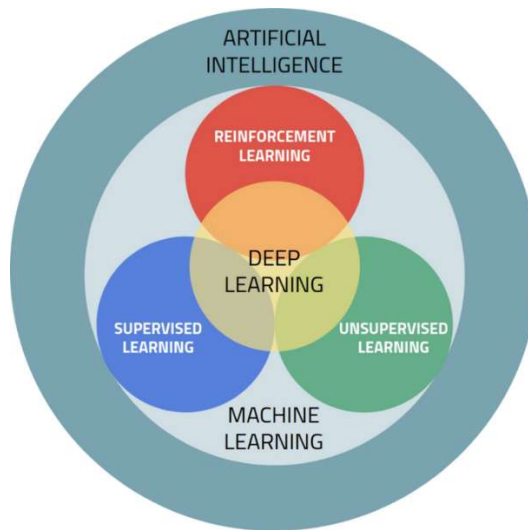
Όπως και με τις προηγούμενες τεχνολογίες που αναλύσαμε, η τεχνητή νοημοσύνη , η οποία αποτελεί ένα ευρύτερο σύνολο που εμπεριέχει την μηχανική μάθηση και αυτή με τη σειρά της εμπεριέχει την βαθιά μάθηση , δεν ήρθε ως κάτι καινούριο στο επιστημονικό κοινό. Η δημιουργία νοημοσύνης σε υπολογιστές είναι μια προσπάθεια προσέγγισης της ανθρώπινης σκέψης χρησιμοποιώντας απλούς αλγορίθμους κοινής λογικής . Η βασική

ιδέα είναι ότι όπως εμείς οι άνθρωποι εκπαιδευτήκαμε στο να αναγνωρίζουμε κάποια μοτίβα γύρω μας από μικρή ηλικία και συνεχώς εκπαιδευόμαστε , με τον ίδιο τρόπο μπορούν και οι υπολογιστές να εκπαιδευτούν ώστε να εκτελούν ορισμένες διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα , οι αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης που θα αναλύσουμε και αργότερα στην εργασία ,χρησιμοποιούν τα λεγόμενα νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks) τα οποία αποτελούν σχεδόν πιστή αντιγραφή του ανθρώπινου νευρικού συστήματος . Πριν τον 21^ο αιώνα λοιπόν , ναι μεν η τεχνίτη νοημοσύνη είχε εδραιωθεί σαν έννοια , ωστόσο οι εφαρμογές της ήταν λιγιστές ,λόγω της έλλειψης υπολογιστικής τεχνολογίας . Με τον ερχομό όμως των μοντέρνων επεξεργαστών και ακόμα περισσότερο με την εισαγωγή των GPUs (κάρτες γραφικών) και την περεταίρω ανάπτυξη σε τεχνολογίες όπως το ιντερνέτ ,το cloud computing και γλώσσες προγραμματισμού η τεχνητή νοημοσύνη παίρνει «σάρκα και οστά» και βρίσκεται στο επίκεντρο της προσοχής .

Μηχανική μάθηση

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης όπως δέντρα αποφάσεων, τυχαία δάση ,λογιστική και γραμμική παλινδρόμηση ,ομαδοποίηση , νευρωνικά δίκτυα και πάρα πολλοί ακόμα βασίζονται στην θεωρία των πιθανοτήτων και στην βελτιστοποίηση που με την βοήθεια της υπολογιστικής δύναμης μπορούν να πραγματοποιήσουν πολλές επαναλήψεις σε μικρό χρονικό διάστημα .Την τροφή της εκπαίδευσης των μοντέλων αυτών αποτελούν τα δεδομένα και στη σημερινή εποχή είναι πιο σωστό να αναφερόμαστε στα μεγάλα δεδομένα που αναφέραμε, διότι στην τελική , για να μπορέσουν να αποδώσουν οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης ,χρειάζονται χιλιάδες γραμμές δεδομένων .Ανάλογα με το τι είδους δεδομένα τροφοδοτούμε και τι είδους αλγόριθμο θα χρησιμοποιήσουμε , η μηχανική μάθηση χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες .Την **επιβλεπομένη μάθηση** (supervised learning), στην οποία τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι ήδη κατηγοριοποιημένα και δομημένα (labeled structured data), την **μη επιβλεπομένη μάθηση** (unsupervised learning), κατά την οποία οι αλγόριθμοι τροφοδοτούνται με μη κατηγοριοποιημένα δεδομένα και προσπαθούν να βρουν μοτίβα και τέλος την **ενισχυτική μάθηση** (Reinforcement learning) ,οπού ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται μέσω βρόγχων ανάδρασης (feedback loops) ,αλληλοεπιδρώντας με το περιβάλλον .

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μετέπειτα κατά κύριο λόγο με την επιβλεπομένη μάθησή η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην βιομηχανία 4.0 και τον ποιοτικό έλεγχο , οπού τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα είναι κατά κύριο λόγο κατηγοριοποιημένα.



Εικόνα 8. Οι υποκατηγορίες της τεχνητής νοημοσύνης. [7]

Βαθιά μάθηση (deep learning)

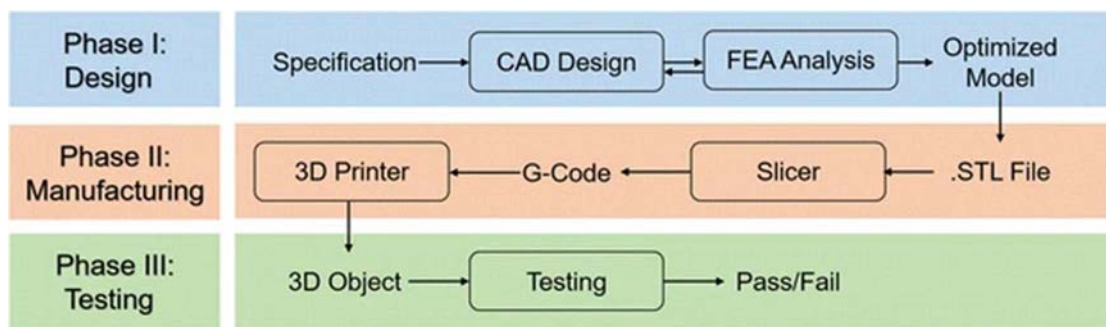
Η βαθιά μάθηση έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην επίλυση προβλημάτων που αντιστέκονταν στις καλύτερες προσπάθειες της κοινότητας της τεχνητής νοημοσύνης για πολλά χρόνια . Έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ καλή στην ανακάλυψη περίπλοκων δομών σε δεδομένα υψηλής διάστασης και, ως εκ τούτου, είναι εφαρμόσιμη σε πολλούς τομείς της επιστήμης, και επιχειρήσεων . Πιο συγκεκριμένα η βαθιά μάθηση σημειώνει τεράστιες επιδόσεις τόσο σε ακρίβεια αποτελεσμάτων όσο και για την ταχεία εξαγωγή τους όσον αφορά την αναγνώριση αντικειμένων σε εικόνες καθώς και την μεταγραφή ομιλίας σε κείμενο . Η πιο διάσημη αρχιτεκτονική βαθιάς μάθησης για αναγνώριση αντικειμένων σε εικόνες (object detection , recognition) είναι τα **Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα** (convolutional neural networks-CNNs) .Η διαφορά των CNNs με τους κλασσικούς αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και ο λόγος που είναι τόσο δημοφιλή στα προβλήματα κατηγοριοποίησης εικόνων είναι ότι μαθαίνουν από μονά τους ποια χαρακτηριστικά των δεδομένων είναι σημαντικά για την τελική κατηγοριοποίηση . Η αρχιτεκτονική ενός τυπικού CNN είναι δομημένη ως μια σειρά από στάδια, τα οποία δεν θα αναλύσουμε σε αυτήν την εργασία ,ωστόσο σε ένα γενικότερο πλαίσιο τα νευρωνικά δίκτυα , ακόμα και για τους ειδικούς τις περισσότερες φορές αποτελούν ένα «black box»

όπως λεμέ , δηλαδή υπάρχει μικρή διαφάνεια στο τι ακριβώς βήματα θα εκτελέσει για να μας δώσει το τελικό αποτέλεσμα .

Αξίζει όμως να αναφέρουμε ότι η χρήση τέτοιων μοντέλων έχει γίνει πιο εύκολη από ποτέ και είναι προσβάσιμη σε ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκες ,κατά κύριο λόγο στην γλώσσα προγραμματισμού python . Οι πιο γνωστές βιβλιοθήκες για βαθιά μάθηση είναι η TensorFlow και η keras, όπου σε αυτές μπορεί κανείς να βρει πληθώρα ετοιμών για χρήση μοντέλων , τα λεγόμενα (pretrained models) .Αυτά τα μοντέλα έχουν εκπαιδευτεί με εκατομμύρια εικόνες όλων των ειδών και μέσω της μεθοδολογίας “transfer learning” μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν για οποιαδήποτε εφαρμογή .

Additive manufacturing – 3D printing

Η γνωστή σε όλους μας πλέον 3D εκτύπωση παρουσιάστηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1980 από τον Kodama, ο οποίος δημοσίευσε ένα άρθρο με τίτλο «Three -Dimensional Data Display by Automatic Preparation of a Three-Dimensional Mode». Η εμφάνιση της 3D εκτύπωσης έγινε το 1987 με το STL από τον Chuck, μια τεχνική που στερεοποιεί λεπτά στρώματα υγρού πολυμερούς ευαίσθητου στο υπεριώδες (UV) φως με τη χρήση λέιζερ. Μπορεί να κατασκευάσει με επιτυχία πολύπλοκα και εξατομικευμένα προϊόντα με λιγότερους ειδικευμένους εργάτες, συντομότερους χρόνους παράδοσης και μικρότερους κύκλους ζωής του προϊόντος. Η 3D εκτύπωση μπορεί να περιγράψει σε ένα γενικότερο πλαίσιο ως μια τεχνική ανάμειξης υλικών είτε με σύντηξη (fusion) , είτε με δέσμευση (binding) , είτε με στερεοποίηση υλικών (solidifying materials), όπως υγρή ρητίνη και σκόνες. Κατασκευάζει το εξάρτημα με έναν προσθετικό τρόπο «στρώμα-προς-στρώμα» χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη μοντελοποίηση CAD , σε προγράμματα όπως το solidworks και το autocad . Η 3D εκτύπωση είναι πολύ χρήσιμη όταν απαιτούνται χαμηλοί όγκοι παραγωγής, υψηλή πολυπλοκότητα σχεδιασμού και συχνές αλλαγές στον αρχικό σχεδιασμό . Προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων εξαρτημάτων ξεπερνώντας τους σχεδιαστικούς περιορισμούς των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής.



Εικόνα 9. Διάγραμμα της διεργασίας 3D printing . [8]

Πλεονεκτήματα της 3D εκτύπωσης σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής

Το 3D printing δεν αναπτύχθηκε για να αντικαταστήσει τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, αλλά για να διευρύνει το φάσμα επιλογής διαδικασιών για τους κατασκευαστές και τους πελάτες. Κάθε διαδικασία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα και η επιλογή ποια να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφαρμογή. Υπάρχουν τρία σημαντικά βασικά χαρακτηριστικά, βάσει των οποίων μπορούν να αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα της 3D εκτύπωσης όπως χρόνος, κόστος και ευελιξία. Ένας από τους κύριους σκοπούς χρησιμοποίησης 3D printing είναι η εξοικονόμηση χρόνου κατασκευής και η αύξηση της ταχύτητας παραγωγής. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές κατεργασίες κοπής, όπου πρέπει να αφαιρεθούν τεράστιες ποσότητες υλικού, η 3D εκτύπωση προσθέτει το υλικό αποτελεσματικά, επαναχρησιμοποιώντας τα υπολείμματα υλικά για την κατασκευή του επόμενου ανταλλακτικού. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι τα απόβλητα υλικού στην 3D εκτύπωση μειώνονται κατά 40% σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους και το 95% έως το 98% των υπολειμμάτων υλικών μπορούν να ανακυκλωθούν. Με αυτόν τον τρόπο ευκολά καταλαβαίνει κανείς ότι ήδη με ένα τέτοιο ποσοστό ανακύκλωσης υλικού, μπορεί να γίνει μεγάλη εξοικονόμηση σε πρώτες ύλες. Ωστόσο η περεταίρω οικονομική αποδοτικότητα των προϊόντων AM θα μπορούσε να σχετίζεται με τη μείωση του κόστους εργασίας και την αποφυγή δαπανηρής αποθήκευσης. Επιπλέον, η 3D εκτύπωση δεν απαιτεί πρόσθετους πόρους όπως εξαρτήματα, εργαλεία κοπής, τράπεζες και ψυκτικά υγρά.

Τέλος οι σχεδιαστές είναι πιο ευέλικτοι στο σχεδιασμό περίπλοκων ανταλλακτικών και έχουν την ελευθερία να αλλάζουν εύκολα τις παραμέτρους της διαδικασίας ανάλογα με τις

ανάγκες τους και μπορούν να κατασκευάσουν ανταλλακτικά με περίπλοκες γεωμετρίες και η λειτουργικότητα των οποίων δεν θα περιορίζεται από τους περιορισμούς κατασκευής.

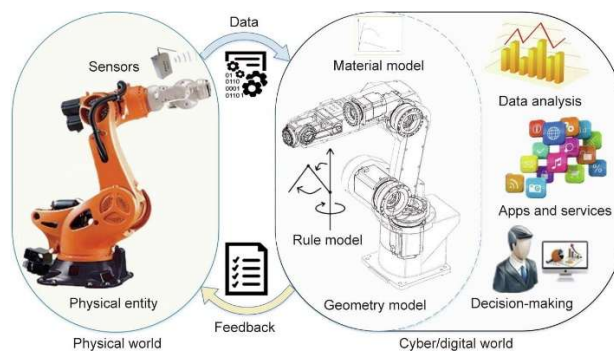
3D printing στην βιομηχανία 4.0

Η 3D εκτύπωση δεν διαφέρει κατά πολύ από τις άλλες μεθόδους κατασκευής όπως CNC ,ως προς την προσφορά τους στην μετάβαση για την βιομηχανία 4.0 . Η τεχνητή νοημοσύνη κάνει την εισαγωγή της στις μηχανουργικές κατεργασίες με πολύ γρήγορους ρυθμούς και η συνδεσιμότητα - επικοινωνία μηχανής προς μηχανή είναι περισσότερο ρόλος του IoT και των υπολοίπων τεχνολογιών και όχι στην ίδια την μέθοδο της κατασκευής . Αλώςτε ο ρόλος του ψηφιακού μετασχηματισμού δεν συνιστά την αντικατάσταση του ήδη υπάρχοντα εξοπλισμού από καινούριο και πιο καινοτόμο .Αντίθετα ,η ψηφιοποίηση ήρθε για να ενσωματωθεί στις ήδη υπάρχουσες βιομηχανίες .

Εκεί όμως που το 3D printing μπορεί να θεωρηθεί πραγματικά ως μια έξυπνη και αποδοτική τεχνολογία είναι αυτό που ονομάζουμε μαζική εξατομίκευση (mass customization). Η εξατομίκευση υποδηλώνει ότι ο πελάτης μπορεί να συμμετέχει, σε κάποιο βαθμό, στη διαδικασία σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα ,όσο πιο νωρίς ο πελάτης συμμετέχει στον σχεδιασμό της παραγωγής, τόσο μεγαλύτερος βαθμός εξατομίκευσης είναι εφικτός. Στα συμβατικά συστήματα παραγωγής, η μαζική εξατομίκευση απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή και φροντίδα, όπου είναι εφικτή η χρήση της. Σε κάθε βήμα και μέσα στη διαδικασία, το εργαλείο πρέπει να αλλάζει ή η επόμενη παρτίδα πρέπει να ρυθμιστεί, κάτι που αυξάνει τον χρόνο παραγωγής και, στη συνέχεια, το κόστος της διαδικασίας. Αντίθετα, η 3D εκτύπωση δεν απαιτεί αλλαγές εργαλείων ή καλουπιών, προετοιμασία των τεμαχίων ή μεταφορά από το ένα στάδιο στο άλλο (όπως φρεζάρισμα ή διάτρηση), μειώνοντας έτσι μεγάλο μέρος του χρόνου και του κόστους αλλαγών παραγωγής .Βλέπουμε λοιπόν πως , η μαζική εξατομίκευση χρησιμοποιώντας 3D εκτύπωση μπορεί να λειτουργήσει ως μοχλός για τη δημιουργία μιας δια δραστικής πλατφόρμας επιλογής χαρακτηριστικών για τον καταναλωτή, προσφέροντας μια νέα επιχειρηματική δομή όπου η σχέση μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή βελτιώνεται.

Ψηφιακά δίδυμα – Digital twins (DTs)

Ο όρος "Ψηφιακό Δίδυμο" (DT) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Michael Grieves σε μια παρουσίαση του 2003 σχετικά με τη διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντος (Product Lifecycle Management – PLM) στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν . Παρόλο που η έννοια εκείνη την εποχή δεν είχε σαφή καθορισμό, μια προκαταρκτική μορφή του DT προτάθηκε να περιλαμβάνει τρία μέρη: το φυσικό προϊόν, το ψηφιακό προϊόν και τις συνδέσεις τους. . Οι τεχνολογίες που υποστηρίζουν τα DTs γνώρισαν εκθετική ανάπτυξη έκτοτε. Το 2012, η NASA επανεξέτασε την έννοια των DTs , ορίζοντας το DT ως μια πολλαπλών επιπέδων χώρου και χρόνου πιθανολογική προσομοίωση υψηλής πιστότητας, η οποία αντανάκλασε πραγματικό χρόνο την κατάσταση ενός αντίστοιχου φυσικού αντικειμένου, με βάση τα ιστορικά δεδομένα, τα δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και το φυσικό μοντέλο . Σε αυτό το σημείο , πολλοί μπορεί να παρατηρήσουν μια ομοιότητα με τον ορισμό που δώσαμε προηγουμένως με τα κυβερνο-φυσικά συστήματα και πράγματι αυτές οι δυο έννοιες παρουσιάζουν πολλά κοινά μεταξύ τους . Τα Κυβερνο-φυσικά Συστήματα (CPS) ορίζονται ως η ενσωμάτωση υπολογιστικών και φυσικών διαδικασιών , ενώ η έννοια της χρήσης ενός ψηφιακού αντιγράφου ενός φυσικού συστήματος για την πραγματοποίηση βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο αναφέρεται ως «Ψηφιακό Δίδυμο» (DT) . Η πιο οφθαλμοφανής ομοιότητα τους είναι ότι στην βιομηχανική παραγωγή, τόσο τα CPS όσο και τα DTs αποτελούνται από δύο μέρη: το φυσικό μέρος και το κυβερνο/ψηφιακό μέρος. Το φυσικό μέρος περιλαμβάνει διάφορους πόρους παραγωγής, οι οποίοι συνοψίζονται ως «άνθρωπος/μηχανή/υλικό/περιβάλλον» οι οποίοι εκτελούν τις δραστηριότητες παραγωγής. Το ψηφιακό μέρος από την άλλη μεριά , το οποίο περιλαμβάνει διάφορες διάχυτες εφαρμογές και υπηρεσίες, ενσωματώνει έξυπνη διαχείριση δεδομένων, αναλύσεις (τα λεγόμενα data analytics που ανέφερα προηγουμένως) και εκτεταμένες δυνατότητες υπολογισμών . Οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές του ψηφιακού μέρους προσφέρουν πλούσιες λειτουργίες και δυνατότητες που επιτρέπουν στους εργαζομένους στην παραγωγή να βελτιώσουν την παραγωγικότητα. Το φυσικό μέρος ανιχνεύει και συλλέγει δεδομένα, και εκτελεί αποφάσεις από το ψηφιακό μέρος, ενώ το ψηφιακό μέρος αναλύει και επεξεργάζεται τα δεδομένα και λαμβάνει αποφάσεις . Μέσω αυτής της εντατικής σύνδεσης, το ψηφιακό μέρος μπορεί να επηρεάσει τις φυσικές διαδικασίες και το φυσικό μέρος μπορεί να επηρεάσει τις κυβερνο/ψηφιακές διαδικασίες . Παρατηρεί κανείς λοιπόν , ότι επιτυγχάνεται η απόλυτη συνέργεια μεταξύ των δυο, για αυτό αλώςτε και ο ορός twin (δίδυμος) .



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση των ψηφιακών δίδυμων . [9]

Βιομηχανικά ρομπότ και έξυπνα ρομπότ (Industrial Robots and intelligent robots)

Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι αυτοματοποιημένες μηχανές που εκτελούν επαναλαμβανόμενες εργασίες γρήγορα και ιδιαίτερα αποδοτικά ,οι οποίες συνήθως είναι δύσκολες ή ακόμα και επικίνδυνες για τον άνθρωπο . Όπως και οι υπόλοιπες μηχανές στο παρελθόν , ήρθαν να αντικαταστήσουν σε μεγάλο βαθμό τον ανθρώπινο παράγοντα στη βιομηχανία και να αυξήσουν την παραγωγικότητα .Τα ρομπότ πρωτοεμφανίστηκαν στις γραμμές συναρμολόγησης στην βιομηχανία αυτοκίνητων ,οπού εκτελούσαν εργασίες όπως μεταφορά του προϊόντος ,βαφή και συγκόλληση .Τέτοιου είδους εργασίες εκτελούνται από βιομηχανικά ρομπότ ακόμα και σήμερα σε πολύ μεγάλο βαθμό, ωστόσο η άνθιση των τεχνολογιών 4.0 αναβαθμίζει την χρήση τους .Οι τεχνολογίες μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης έχουν ενσωματωθεί στα βιομηχανικά ρομπότ δίνοντας τους την ικανότητα να έχουν την πλήρη αίσθηση του περιβάλλοντος που βρίσκονται ,να μαθαίνουν από τις εργασίες που τους αναθέτονται , να γίνονται όλο και πιο παραγωγικά και να παίρνουν αποφάσεις ,χωρίς την καθοδήγηση του ανθρώπινου παράγοντα . Η πλειοψηφία των ρομπότ που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι εξοπλισμένα με προηγμένους αισθητήρες οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο .Με το ενσωματωμένο λογισμό τεχνητής νοημοσύνης τα ρομπότ μπορούν να ερμηνεύσουν τα δεδομένα αυτά κατάλληλα ,ώστε να προσαρμόσουν το εύρος κινήσεων τους και να εκτελέσουν την εργασία τους με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα . Καθώς λοιπόν η βιομηχανία 4.0 συνεχίζει να μεταμορφώνει το τοπίο ,τα ρομποτικά συστήματα , μετατρέπονται στα λεγόμενα έξυπνα ρομποτικά συστήματα (intelligent robotic systems) ή αυτόνομα ρομποτικά συστήματα (Autonomous

Robots) . Τα συνεργατικά ρομπότ (collaborative robots) ή αλλιώς «co-bots» , έχουν ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 και των έξυπνων ρομποτικών συστημάτων. Σε αντίθεση με τα μεγάλου μεγέθους, βαριά και απομονωμένα από τους εργαζομένους βιομηχανικά ρομπότ , τα συνεργατικά ρομπότ έχουν σχεδιαστεί για να εργάζονται παράλληλα με τους ανθρώπους και να μοιράζονται τον ίδιο εργασιακό χώρο . Τα ρομπότ αυτά είναι κατά πολύ ελαφρύτερα σε σύγκριση με τα βιομηχανικά , ευέλικτα με την έννοια ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πληθώρα εργασιών, ευκολά στον προγραμματισμό καθώς και προσφέρουν μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες που τους επιτρέπει να εργάζονται με ασφάλεια και αποδοτικότητα διπλά σε ανθρώπους .Οι εφαρμογές των συνεργατικών ρομπότ ποικίλουν, ωστόσο ο τομέας της βιομηχανικής παραγωγής κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό με εφαρμογές όπως picking ,packing , palletizing, welding ,assembling , και τέλος τον ποιοτικό έλεγχο .Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα co-bots διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες για την ανίχνευση ανθρώπων , καθιστώντας τα ασφαλή για το εργασιακό περιβάλλον .



Εικόνα 11. Τα έξυπνα ρομποτικά συστήματα σε εναρμόνιση με τους εργαζομένους σε ένα έξυπνο εργοστάσιο . [10]

Βιομηχανική επαυξημένη πραγματικότητα (Industrial Augmented Reality)

Όπως ήταν αναμενόμενο , ο ψηφιακός μετασχηματισμός των βιομηχανιών αλλάζει σε πολλές περιπτώσεις και τον τρόπο με τον οποίο οι ίδιοι εργαζόμενοι εκτελούν τις καθημερινές τους υποχρεώσεις . Η επαυξημένη πραγματικότητα είναι μια τεχνολογία η οποία παρόλο που αρχικά προοριζόταν αποκλειστικά για ψυχαγωγία ,πολλοί επιχειρηματικοί τομείς ,όπως αυτός της βιομηχανίας ανακαλύπτουν πολλαπλές περιπτώσεις χρήσης , αποκομίζοντας πολλαπλά οφέλη .Η επαυξημένη πραγματικότητα επιτρέπει τον χρήστη ,μέσω μιας συσκευής όπως τάμπλετ ,ειδικά γυαλιά ή κράνος ,να αφομοιωθεί έμμεσα στην φυσική πραγματικότητα σε πραγματικό χρόνο . Η τεχνολογία αυτή δεν αναπαριστά απλά την πραγματικότητα στην οθόνη , αλλά έχει και την δυνατότητα με διάφορες σηματοδοτήσεις ,οπτικοποιήσεις δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, φωνητικές και γραπτές οδηγίες , να βοηθάει τον εργαζόμενο στην λήψη αποφάσεων .Μια από τις πιο συχνές εφαρμογές της IAR είναι η εκπαίδευση των εργαζομένων στην χρήση κάθε είδους μηχανήματων στην παραγωγική διαδικασία μειώνοντας τον χρόνο εκπαίδευσης και τις δεξιότητες που προ απαιτούνται από τους νέους προσληφθέντες .Επιπλέον , τα έξυπνα εργοστάσια με την αρωγή όλων των τεχνολογιών που έχουμε αναφέρει ,χρησιμοποιούν εξελιγμένα πληροφοριακά συστήματα για την παρακολούθηση του εξοπλισμού ,με σκοπό τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών και την ταχεία ανταπόκριση σε βλάβες . Ένα σύστημα παρακολούθησης εξοπλισμού συλλέγει δεδομένα για να αναλύσει την κατάσταση ολόκληρης της παραγωγής. Έπειτα, ένα άτομο, συνήθως ο υπεύθυνος εξοπλισμού λαμβάνει αποφάσεις ανάλογα με την κατάσταση. Για να επιταχυνθεί η κατανόηση του προβλήματος και η εύρεση λύσης, οι πληροφορίες από τους αισθητήρες και τις υπηρεσίες χρειάζεται να παρουσιάζονται με φιλική προς τον χρήστη μορφή, κάτι που μπορούν να υποστηρίξουν η Εικονική και η Επαυξημένη Πραγματικότητα (VR και AR, αντίστοιχα). Η AR λοιπόν μπορεί να αποτελέσει ένα βοηθητικό εργαλείο για την διάγνωση της κατάστασης του εξοπλισμού βάση δεδομένων από τους αισθητήρες ,

βοηθώντας τους εργαζομένους να εντοπίσουν πιο γρηγορά και ευκολότερα την αίτια των προβλημάτων .

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικός έλεγχος στην βιομηχανία

4.0

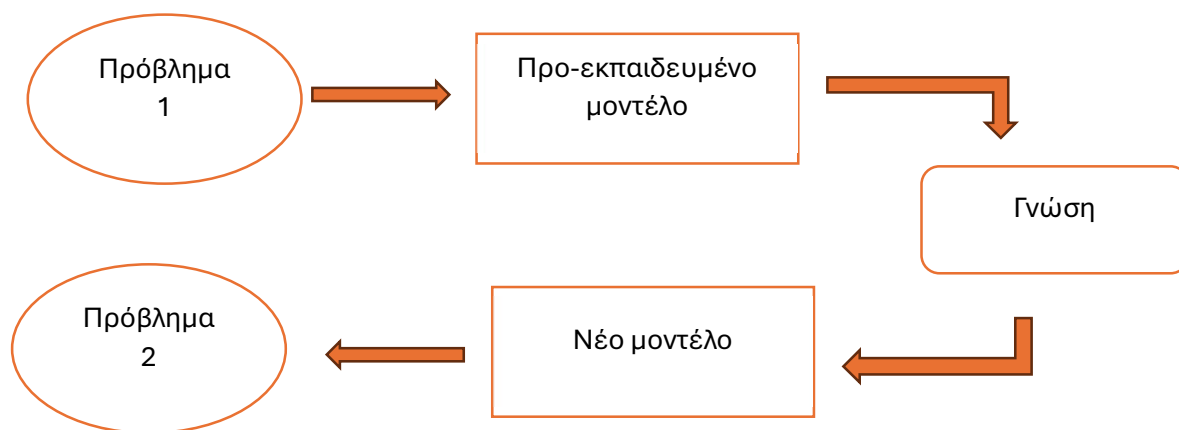
Επίβλεψη υγείας εξοπλισμού

Κάνοντας λόγο για την ποιότητα στο πλαίσιο της βιομηχανίας ,δεν θα μπορούσε να παραληφθεί η σημασία της υγείας του εξοπλισμού ,η οποία συνδέεται άρρηκτα με την ποιότητα των παραγομένων προϊόντων .Σήμερα ,οι τεχνολογίες της βιομηχανίας 4.0 αποτελούν το καταλληλότερο εργαλείο για την αποτελεσματική συνεχή παρακολούθηση της υγείας του εξοπλισμού . Με την χρήση κατάλληλων εξειδικευμένων αισθητήρων ,συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα της κατάστασης του εξοπλισμού , συνήθως στην μορφή σημάτων και στην συνέχεια αυτόματα επεξεργάζονται ,ώστε τελικά να έχουμε μια πλήρη οπτικοποίηση για την κατάσταση του εξοπλισμού ,καθώς και “ data-driven” λύσεις για την βελτιστοποίηση των λειτουργιών και την ικανότητα της πρόβλεψης πιθανών αστοχιών που αποσκοπεί στον υπολογισμό του υπολειπομένου χρήσιμου χρόνου ζωής του εξοπλισμού (Remaining Useful Life – RUL) και της ημερομηνίας της επομένης συντήρησης (Προβλεπτική συντήρηση) . Ακριβώς αυτή τη δουλειά μπορούν να εκτελέσουν εξ’ ολοκλήρου ψηφιακά δίδυμα, τα οποία μπορούν να μας παρέχουν ψηφιακά δυναμικά μοντέλα των φυσικών συστημάτων τα οποία ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την ακριβή παρακολούθηση της κατάστασης και της υγείας των αντίστοιχων φυσικών και την προληπτική συντήρηση τους . Επιπλέον ,με την βοήθεια των ψηφιακών δίδυμων ,οι βιομηχανίες μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια ,αλλάζοντας παραμέτρους και ρυθμίσεις του εξοπλισμού ,γεγονός που τους επιτρέπει να βελτιστοποιούν τις διαδικασίες τους ,παράγοντας όσο το δυνατόν ποιοτικότερα προϊόντα ,χωρίς να την διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας .

Έξυπνη επιθεώρηση ποιότητας - Smart Quality Inspection

Οπτική επιθεώρηση ποιότητας με χρήση βαθιάς μάθησης

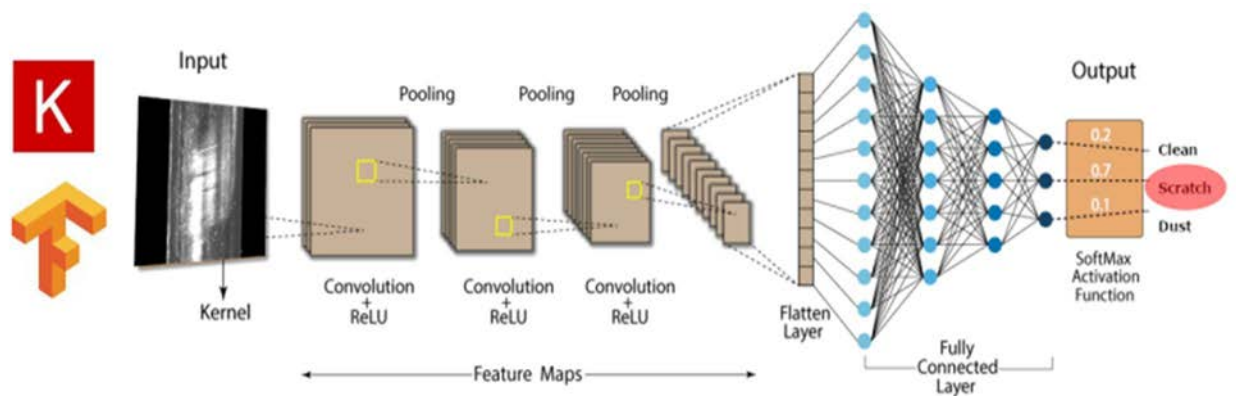
Όπως είδαμε και προηγουμένως στην ανάλυση των τεχνολογιών , οι παραδοσιακές μέθοδοι μηχανικής μάθησης για να μπορέσουν να μάθουν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για την κατηγοριοποίηση μιας εικόνας , απαιτούν από τον μηχανικό να έχει εκτενή γνώση πάνω στο πεδίο του αντικειμένου (domain knowledge) . Αντιθέτως οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης μπορούν αυτόματα να εκτελούν αυτή την διαδικασία , η οποία είναι γνωστή ως “feature engineering process”. Πιο συγκεκριμένα στο πλαίσιο της βαθιάς μάθησης η αρχιτεκτονική που αποδεδειγμένα έχει τις καλύτερες αποδόσεις για την εξαγωγή χαρακτηριστικών είναι τα CNNs (Convolutional Neural Networks) . Η δομή του αλγορίθμου κατηγοριοποίησης εικόνας αποτελείται από δυο κυρία μέρη. Το πρώτο μέρος στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων αποτελεί ένα μοντέλο βάσης , το οποίο και είναι ήδη εκπαιδευμένο σε δεδομένα του ImageNet σε προβλήματα κατηγοριοποίησης εικόνων το οποίο ακολουθείται από κάποια στρωματά στα οποία θα γίνει μια περεταίρω εκπαίδευση στα δεδομένα του συγκεκριμένου προβλήματος . Μερικά από αυτά τα προ εκπαιδευμένα μοντέλα (pre_trained models) που χρησιμοποιούνται εκτενώς για τέτοιου είδους προβλήματα είναι τα μοντέλα : EfficientNet-B0 έως το B7 , τα ResNet-50 , ResNet-10, το InceptionV3 , τα YOLOv5, YOLOv4 , τα VGG, το AlexNet και πολλά ακόμα . Το δεύτερο μέρος αποτελεί το «κεφάλι» (head) των CNNs όπου εκεί ουσιαστικά επιλέγεται σε ποιες κλάσεις να κατηγοριοποιήσει τις εικόνες που δέχεται . Η μεθοδολογία αυτή κατά την οποία ένα μοντέλο που έχει εκπαιδευτεί ήδη σε ένα πρόβλημα , χρησιμοποιείται ως μια βάση για την επίλυση ενός παρομοίου προβλήματος ονομάζεται « transfer learning» και συνιστά τον πιο αποδοτικό, λιγότερο χρονοβόρο και ακριβές τρόπο για την δημιουργία αλγορίθμων βαθιάς μάθησης .



Εικόνα 12. Η μεθοδολογία του Transfer Learning

Δημιουργία δεδομένων

Η απόδοση των μοντέλων βαθιάς μάθησης είναι σε μεγάλο βαθμό ανάλογη του μεγέθους και της ποιότητας των δεδομένων εκπαίδευσης ,συνεπώς η κατάλληλη δημιουργία δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας βήμα για την επίτευξη του στόχου του κάθε προβλήματος . Ανάλογα την περίπτωση λοιπόν , οι μηχανικοί θα πρέπει να αποφασίσουν τι θεωρείται ως ελλειμματικό προϊόν και πρέπει να κοπεί στον ποιοτικό έλεγχο ώστε να μην καταλήξει στον πελάτη και τι θεωρούν ως αποδεκτό . Έπειτα μέσω μιας υψηλής ανάλυσης κάμερας (οι σύγχρονες κάμερες συνήθως έχουν ένα ρυθμό καρέ μεγαλύτερο του 25 fps) είναι εφικτή η χειροκίνητη συλλογή φωτογραφιών από βίντεο , οι οποίες έπειτα θα πρέπει να κατηγοριοποιηθούν στις αντίστοιχες κλάσεις τους .Αφού ένας σχετικά επαρκής αριθμός φωτογραφιών έχει συλλεχθεί , έπειτα με τεχνικές αύξησης δεδομένων (data augmentation) μπορούν να δημιουργηθούν και άλλες φωτογραφίες που προκύπτουν από οριζόντια ή κάθετη αναστροφή ,περιστροφή ή και ό,τι άλλη επεξεργασία μπορεί να γίνει από τις ήδη υπάρχουσες εικόνες βελτιώνοντας την ποικιλομορφία των δεδομένων .Τέλος , δοκιμάζοντας μια πληθώρα μοντέλων και τεχνικών μηχανικής μάθησης και φτάνοντας σε μια αποδεκτή για εμάς απόδοση και ακρίβεια του μοντέλου , βεβαιώνοντας ότι δεν έχει γίνει υπερπροσαρμογή (overfitting) ,ο αλγόριθμος πλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δοκιμές οπτικού ελέγχου .



Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική CNN για εξαγωγή χαρακτηριστικών από εικόνες επιφάνειας καλωδίου .

Αποτελέσματα δοκίμων

Στην περίπτωση της επιθεώρησης ποιότητας ,τα ψευδώς θετικά θεωρούνται ως «κίνδυνος του παραγωγού» και τα ψευδώς αρνητικά ως «κίνδυνος του καταναλωτή» .Ο κίνδυνος του παραγωγού είναι η απόρριψη προϊόντος καλής ποιότητας ,που λανθασμένα κατηγοριοποιήθηκε από τον αλγόριθμο ως ελαττωματικό ,ενώ ο κίνδυνος του καταναλωτή είναι το σφάλμα αποδοχής κακής ποιότητας προϊόντος, όπου πάλι λανθασμένα κατηγοριοποιήθηκε ως αποδεκτό .Στην βιομηχανία , ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου του καταναλωτή ,δηλαδή να καταλήξει στο χέρι του ένα καλής ποιότητας προϊόν με μεγάλη πιθανότητα και ο κίνδυνος για τον παραγωγό μπορεί να είναι αποδεκτός ως έναν βαθμό , τον οποίο θα τον ορίσουμε εμείς . Στην ιδανική περίπτωση θα θέλαμε ελαχιστοποίηση και στα ψευδώς θετικά αλλά και στα ψευδώς αρνητικά .Σε ένα γενικό πλαίσιο , στην βιβλιογραφία υπάρχουν πάρα πολλά παραδείγματα πρακτικών εφαρμογών όπου επιτυγχάνεται απόδοση πάνω από 98% ακρίβεια σε προβλήματα αυτομάτου έξυπνου ποιοτικού ελέγχου ,όπως στην παρακάτω φωτογραφία όπου 715 προϊόντα από διεργασία χύτευσης έχουν κατηγοριοποιηθεί στις αντίστοιχες κλάσεις με συνολική ακρίβεια 99,86 % . Συνεπώς η επίτευξη μεγάλων αποδόσεων στην επιθεώρηση ποιότητας συνιστά κάτι που πλέον είναι εφικτό και προσβάσιμο σε σχεδόν όλων των ειδών παραγωγικές διαδικασίες και οι βιομηχανίες αν δεν μπορούν να το

βγάλουν εις πέρας από εντός , μπορούν να αναθέσουν το έργο σε ειδικούς εξωτερικούς συνεργάτες .

		INSPECTED	
		OK	DEFECTIVE
TRUE LABEL	OK	261	1
	DEFECTIVE	0	453

Εικόνα 14. Ο πίνακας σύγχυσης (*confusion matrix*) στην επιθεώρηση ποιότητας . [11]

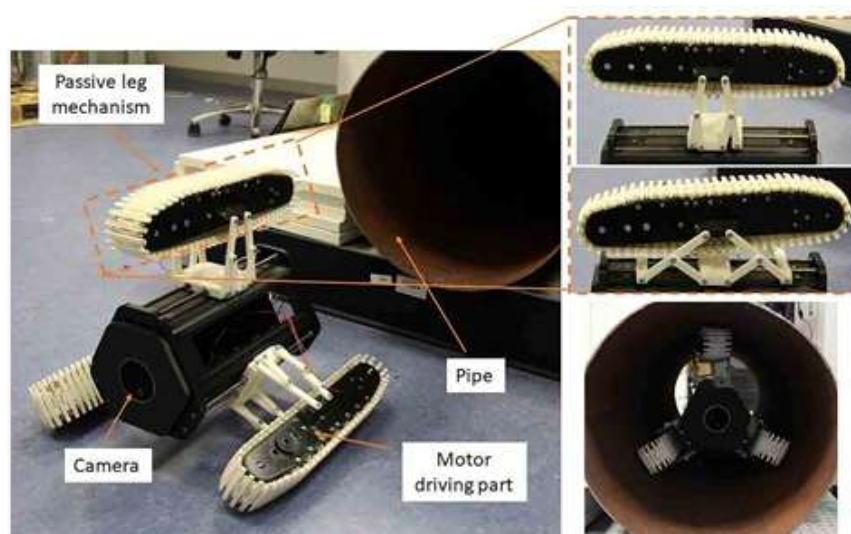
Επιθεώρηση ελέγχου με χρήση συνεργατικών ρομπότ.

Για πολλές βιομηχανίες , η λύση ενός σταθερού οπτικού συστήματος ελέγχου σε ένα ή περισσότερα σημεία της παραγωγής αποτελεί την τελειά λύση. Ωστόσο ,το βασικότερο πρόβλημα με τα οπτικά συστήματα ελέγχου , είναι ότι η χρήση τους περιορίζεται στην μη ευέλικτη θέση της κάμερας που αντλεί τα δεδομένα .Ένα σύστημα με σταθερή κάμερα , αντιμετωπίζει προβλήματα να ελέγξει διαφόρων ειδών βιομηχανικά προϊόντα σε δυσπρόσιτα μέρη του όπως το εσωτερικό του προϊόντος , την κάτω μεριά και την πίσω μεριά .Επιπλέον , σε περίπτωση φυσικού ελέγχου , ο εργάτης ενδέχεται να εμποδίσει την σωστή λειτουργία της κάμερας . Συνεπώς ,ανάλογα το προϊόν ,τον χώρο εργασίας και την λειτουργία της κάθε παραγωγικής γραμμής ,θα πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο σύστημα επιθεώρησης ποιότητας . Η βιομηχανία 4.0 όμως έχει να μας προσφέρει επιπλέον λύσεις στην αυτόματη επιθεώρηση ποιότητας ,με την χρήση των συνεργατικών ρομπότ . Όπως είδαμε και στην ανάλυση προηγουμένως στην εργασία ,ο κύριος στόχος της στρατηγικής αυτής είναι να χτιστεί ένα περιβάλλον συνεργασίας μεταξύ του ανθρωπίνου δυναμικού

και των εξαιρετικών δυνατοτήτων και ακρίβειας που μπορούν να προσφέρουν τα συνεργατικά ρομπότ. Τα ρομπότ φυσικά που χρησιμοποιούνται για τον ποιοτικό έλεγχο έχουν ενσωματωμένο το ίδιο οπτικό σύστημα ελέγχου που αναφέραμε προηγουμένως, το οποίο κάνει χρήση της βαθιάς μάθησης. Κοινώς τα ρομπότ αυτά συνιστούν αυτό που ονομάζουμε «AI-driven».

Περιπτώσεις χρήσης έξυπνης επιθεώρησης ποιότητας

Use case 1: Έξυπνη επιθεώρηση ποιότητας σωλήνων με χρήση ρομπότ.



Εικόνα 15. Χρήση Συνεργατικού ρομπότ για επιθεώρηση σωλήνων. [12]

Στην εργασία αυτή, οι ερευνητές δοκιμάζοντας μια πληθώρα από τα μοντέλα που αναφέραμε, τεχνικές μηχανικής και βαθιάς μάθησης, μπορέσαν να ενσωματώσουν στο ρομπότ έναν αλγόριθμο που μπορεί να εντοπίζει με αποτελεσματικό τρόπο διάφορες ανωμαλίες στο εσωτερικό σωλήνων, όπως διάβρωση και ρωγμές. Η επιθεώρηση του εσωτερικού και εξωτερικού σωλήνων αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η χρήση ρομπότ με αυτόματο έλεγχο ποιότητας είναι καταλυτική για την ακριβή αναγνώριση των ελαττωμάτων, ώστε μετέπειτα οι μηχανικοί να μπορέσουν να ακολουθήσουν την κατάλληλη μέθοδο συντήρησης.

Use case 2: Οπτικό σύστημα έξυπνου ποιοτικού ελέγχου παξιμαδιών συγκόλλησης

Σε αυτήν την περίπτωση , η εταιρία Frontec Co. ζήτησε από τους ερευνητές να αυτοματοποιήσουν την επιθεώρηση ποιότητας στην γραμμή παραγωγής παξιμαδιών συγκόλλησης . Οι ερευνητές έπειτα από δοκιμές μοντέλων όπως το 2ConvBlock,4ConvBlock και των VGG , τελικά κατέληξε σε μια ικανοποιητική για αυτούς συνολική απόδοση κατηγοριοποίησης 99% με την χρήση του VGG-16 . Το σύστημα επιθεώρησης χρησιμοποιεί δυο κάμερες για να πάρει φωτογραφίες από όλες τις πλευρές του προϊόντος το οποίο κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης μεταφέρεται σε έναν διάφανο κυκλικό δίσκο . Τα προϊόντα έπειτα ,ανάλογα με την κατηγοριοποίηση τους από το σύστημα επιθεώρησης με χρήση πεπιεσμένου αέρα μεταφέρονται στην αντίστοιχο στάδιο της παραγωγής .



Camera for Under Side



Camera for Upper Side

Εικόνα 16. Το οπτικό σύστημα επιθεώρησης δυο καμερών [13]



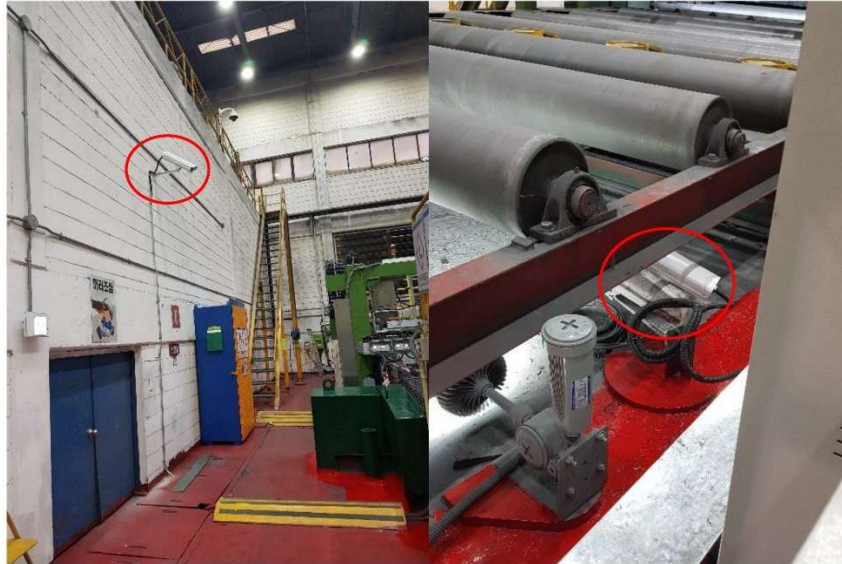
Εικόνα 17. Φυσική επιθεώρηση των παξιμαδιών συγκόλλησης από τους εργαζομένους [13]

Η παραπάνω φωτογραφία , η οποία αντλήθηκε από την ίδια έρευνά αποτελεί ένα παραστατικό παράδειγμα όπου η συνεχής επιθεώρηση προϊόντων , ειδικά μικροαντικειμένων όπως τα παξιμάδια συγκόλλησης είναι σχεδόν αδύνατη . Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις η αυτόματη επιθεώρηση ποιότητας υψηλής απόδοσης καθίσταται αναγκαία προσθήκη για τους παράγωγους .

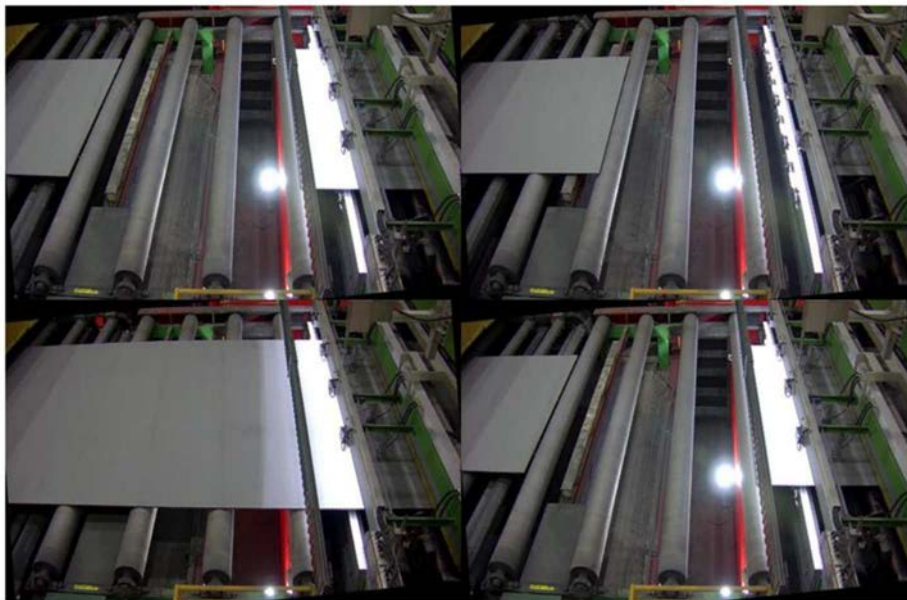
Use case 3: Έξυπνο οπτικό σύστημα για τον εντοπισμό ελαττωμάτων βαφής σε ναυπηγεία.

Στην περίπτωση αυτή μελετήθηκε η πιθανή μετάβαση από την παραδοσιακή φυσική επιθεώρηση σε έναν έξυπνο τρόπο επιθεώρησης μεταλλικών πλακών στο περιβάλλον ενός ναυπηγείου εξερχόμενες από το στάδιο του βαψίματος . Πιο συγκεκριμένα ,εκπαιδευτήκαν δυο μοντέλα ,το YOLOv3 και το SSD με φωτογραφίες που τραβήχτηκαν στο εργοστάσιο με την χρήση δυο καμερών (πάνω και κάτω όψη) στην γραμμή παραγωγής . Μετα από δοκιμές ,επιλέχθηκε η χρήση του YOLOv3 με συνολική απόδοση της τάξης του 90% .Το σύστημα αυτό έχει αύξηση την παραγωγικότητα της γραμμής παραγωγής κατά 11% και έχει μειώσει την μεταφορά ελαττωματικών πλακών στο επόμενο στάδιο κατά 2% .Πριν την υλοποίηση του έξυπνου οπτικού συστήματος ,οι εργαζόμενοι ελέγχανε μέσω καμερών συνεχώς την ποιότητα της βαφής διακόπτοντας συχνά την γραμμή παραγωγής. Τέλος σύμφωνα με τους ερευνητές ,το καινούριο σύστημα ελάττωσε κατά πολύ την σωματική και ψυχολογική κόπωση των εργαζομένων εργασιών

διαχείρισης ποιότητας μέσω παρακολούθησης και μείωσε σημαντικά τα κόστη επαναβαφής των μεταλλικών πλακών .



Εικόνα 18. Η τοποθέτηση των καμερών και σωστού φωτισμού σε κάθε γραμμή παραγωγής [14]



Εικόνα 19. Παραδείγματα φωτογραφιών αποδεκτής ποιότητας πλακών . [14]

Use case 4: Έξυπνη αναγνώριση ελαττωμάτων σε λάστιχα αυτοκινήτων.

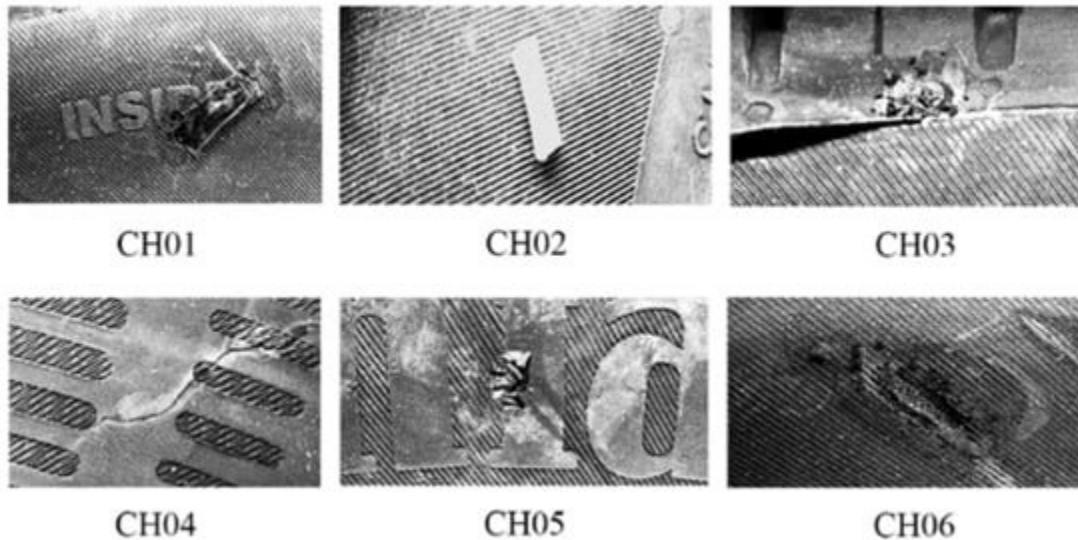
Στην παρούσα εργασία , οι ερευνητές κλήθηκαν να αναπτύξουν ένα αυτόματο σύστημα ποιοτικού ελέγχου /ανίχνευσης ανωμαλιών ελαστικών αυτοκινήτου σε αντίστοιχη βιομηχανία . Ο στόχος της τρέχουσας έρευνας είναι να βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος οπτικής επιθεώρησης αντικειμένων με επιφάνεια η οποία συνιστά δύσκολη στον σωστό φωτισμό και τη σάρωση .Συγκεκριμένα , επιλέχθηκε ως αντικείμενο δοκιμής ένα ελαστικό αυτοκινήτου, όπως φαίνεται σε παρακάτω εικόνα το οποίο αποτελεί ένα στοιχείο σε σκούρο και ματ χρώμα , χαρακτηριστικά δηλαδή που αποδεικνύονται πολύ δύσκολα στην ανίχνευση.



Εικόνα 20. Το αντικείμενο προς κατηγοριοποίηση [15]

Στην παρούσα φάση της ερευνάς , ελέγχεται μόνο η πλαγία όψη του λάστιχου η οποία εμπεριέχει την περισσότερη πληροφορία όπως τα λογότυπα ,το μέγεθος, την ημερομηνία παραγωγής άλλα και καθίσταται η πιο σημαντική από όλες τις όψεις του λάστιχου και από λειτουργικής σημασίας από τον παραγωγό . Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως τα συστήματα επιθεώρησης πρέπει να προσαρμόζονται για την αναζήτηση συγκεκριμένων ελαττωμάτων, οπότε στην περίπτωση παραγωγής, είναι απαραίτητο να οριστούν οι τύποι ελαττωμάτων που μπορεί να εμφανιστούν στα τελικά προϊόντα . Κατά την εξέταση του τελικού ελαστικού και των πλευρικών τοιχωμάτων λοιπόν, επιλέχθηκαν έξι αντιπροσωπευτικοί τύποι ελαττωμάτων που εμφανίζονται κυρίως στην παραγωγή, όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Οι μορφές ελαττωμάτων που περιγράφονται είναι οι εξής :

- Εμφάνιση ακαθαρσιών από το ίδιο υλικό με το ελαστικό (CH01)
- Εμφάνιση ακαθαρσιών από άλλα υλικά (CH02)
- Ζημιά του υλικού λόγω θερμοκρασίας και πίεσης (CH03)
- Ρωγμή/σκίσιμο (CH04)
- Ζημιά στη μηχανική ακεραιότητα (CH05)
- Χάραξη υλικού (CH06).



Εικόνα 21. Οι κατηγορίες ελαττωμάτων στο λάστιχο που επιλέχθηκαν . [15]

Ως λύση στο πρόβλημα ,οι ερευνητές λόγω των μη επαρκών δεδομένων εισόδου ,χρησιμοποίησαν την μεθοδολογία του transfer learning όπου χρησιμοποιήθηκε ένα προ εκπαιδευμένο μοντέλο Alex Net ,το οποίο τροποποιήθηκε στα τελευταία τρία στάδια του και επαναεκπαιδεύτηκε με ένα μικρό δείγμα των εικόνων του προβλήματος . Ήταν εφικτό να σχεδιαστεί και να εκπαιδευτεί ένας ανιχνευτής αντικειμένων με αυτή την προσέγγιση, ο οποίος, με ποσοστό επιτυχίας 70–99%, μπορεί να ανιχνεύσει ορισμένους τύπους ελαττωμάτων στα δείγματα εκπαίδευσης των εξεταζόμενων αντικειμένων. Οντάς μια πρώτη προσέγγιση στο συγκεκριμένο πρόβλημα ,οι ερευνητές θεωρούν ότι μια περεταίρω δοκιμή άλλων προ εκπαιδευμένων μοντέλων σε συνδυασμό με μεγαλύτερη γκάμα εικόνων εκπαίδευσης ή και ένα εξ' ολοκλήρου custom συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο θα μπορούσε να επιφέρει σημαντικά μεγαλύτερες και πιο ακριβείς αποδόσεις στο σύστημα οπτικού ελέγχου .

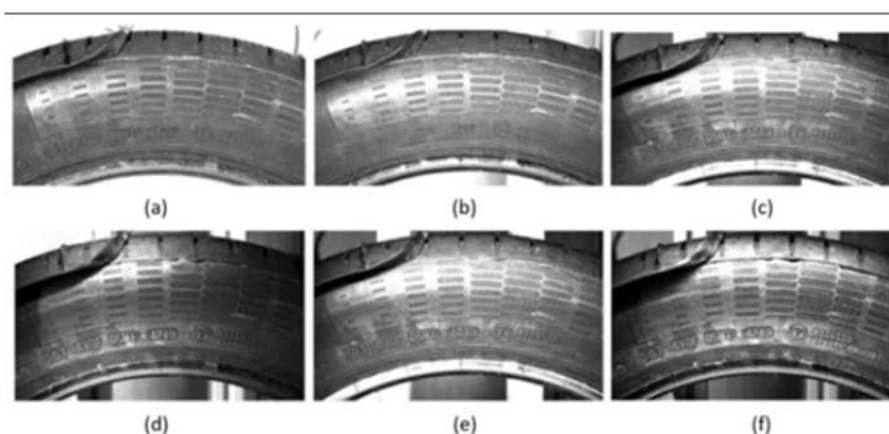
Η σημασία του φωτισμού

Τέλος ,η συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης τεχνίτης νοημοσύνης στον αυτοματοποιημένο οπτικό έλεγχο αποτελεί ένα παραστατικό παράδειγμα για την σημασία της επιλογής κατάλληλου φωτισμού και της αντίστοιχης κάμερας για τέτοιου είδους προβλήματα .Οι ερευνητές έστησαν την πειραματική τους εγκατάσταση με σημαντικά περιθώρια ελευθέριας για δοκιμές διάφορων ειδών φωτισμού , γνωρίζοντας εκ των προτέρων πως μια τέτοια εφαρμογή θα χρειαστεί δοκιμές . Η ανάλυση των αποτελεσμάτων τους δείχνει ότι, για τη λήψη δοκιμαστικών εικόνων, κατάλληλη επιλογή είναι μια μονόχρωμη κάμερα 12 Mpx BVS CA-M4112Z00-35-000 με φακό Tamron BAM LS-VS-007-C1/1-5018-C και δύο κόκκινους LED φωτισμούς ράβδου μήκους 200 mm.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, ήταν διαθέσιμοι στο τμήμα διάφοροι τύποι φωτισμού, οι οποίοι τοποθετήθηκαν διαφορετικά, και επιλέχθηκε η καταλληλότερη διαμόρφωση. Επειδή η επιθεώρηση αφορούσε ματ και σκούρα επιφάνεια, απαιτούνταν φωτισμός υψηλής έντασης και μεγάλης περιοχής, καθώς η εξεταζόμενη περιοχή είχε διαστάσεις περίπου 300 × 250 mm. Ένα πλεονέκτημα του αντικείμενου ήταν το σχήμα του. Ως περιστρεφόμενο αντικείμενο, ήταν δυνατή η λήψη όλων των απαραίτητων εικόνων της περιφέρειας από μία θέση, κατά την περιστροφή του ελαστικού στην πλατφόρμα.

Στην παρακάτω φωτογραφία μπορεί κάνεις να δει και με γυμνό μάτι την διαφοροποίηση που επιτυγχάνεται αναμεσα στους διάφορους τύπους φωτισμού .Η πρώτη εικόνα (εικόνα a) λήφθηκε χωρίς πρόσθετο φωτισμό, υπό κανονικές συνθήκες εργαστηρίου. Αν και το αντικείμενο καταγράφηκε με επαρκή ευκρίνεια, το απαιτούμενο κείμενο ήταν δύσκολα αναγνωρίσιμο, καθιστώντας αυτές τις συνθήκες ακατάλληλες για μηχανική επεξεργασία. Η εικόνα b λήφθηκε με κυκλικό φωτισμό διαμέτρου 100 mm στο επίπεδο του φακού. Ωστόσο, το κείμενο καταπιέστηκε ακόμη περισσότερο, καθιστώντας και αυτή τη μέθοδο ακατάλληλη. Στην εικόνα c χρησιμοποιήθηκαν δύο φωτισμοί γραμμής μήκους 100 mm με έντονο λευκό φως, τοποθετημένοι σε απόσταση και υπό γωνία 60° ως προς την οριζόντια επιφάνεια της πλατφόρμας. Αυτό αύξησε την αντίθεση μεταξύ κειμένου και φόντου. Ο φωτισμός IR (Εικόνα d) παρείχε έντονη αντίθεση μεταξύ κειμένου, άλλων στοιχείων και επιφάνειας, αλλά ήταν ανομοιόμορφος λόγω εγγύτητας και μήκους των φωτισμών. Και τέλος στις εικόνες e, f χρησιμοποιήθηκαν δύο κόκκινοι φωτισμοί γραμμής μήκους 200

mm. Στην εικόνα f , οι φωτισμοί τοποθετήθηκαν υπό γωνία 30° και σε απόσταση 160 mm από το ελαστικό, παρέχοντας επαρκή αντίθεση. Αυτή η διαμόρφωση θεωρήθηκε κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία, και όλες οι υπόλοιπες εικόνες λήφθηκαν με αυτή τη μέθοδο.



Εικόνα 22. Η εικόνα με τις έξι παραλλαγές φωτισμού . [15]

Zero Defect Manufacturing – ZDM

Η μετάβαση από μαζική παραγωγή σε μαζική προσαρμογή/εξατομίκευση (mass customization), τις συχνές αλλαγές στα μεγέθη παρτίδας και η ανάγκη για μια πιο βιώσιμη παραγωγική διαδικασία αποτελεί σήμερα την κινητήρια δύναμη για μετάβαση σε νέες μεθόδους βελτίωσης ποιότητας ,όπως το ZDM . Η έννοια αυτή των μηδενικών ελαττωματικών προϊόντων υπήρχε από πάντα στο μυαλό των παράγωγων , οι οποίοι συνεχώς προσπαθούσαν να «κατανοήσουν» βαθύτερα τις μηχανές τους ,να βρουν τις αιτίες παραγωγής ελαττωματικών και να δοκιμάσουν διάφορες αλλαγές στις ρυθμίσεις τους .Με λίγα λόγια αυτό που μόλις περιγράψαμε ,συνιστά μια στρατηγική «detect-repair» και «detect-prevent» .Το ZDM στην βιβλιογραφία ορίζεται ως μια ολιστική προσέγγιση για την διασφάλιση ποιότητας τόσο των διαδικασιών όσο και των προϊόντων ,ελαχιστοποιώντας όσο είναι δυνατόν την παραγωγή ελαττωματικών στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας του προϊόντος μέσω διορθωτικών ,προληπτικών και προβλεπτικών τεχνικών . Το ZDM αποτελεί μια στρατηγική η οποία αποτελείται από τρία

ζευγάρια στρατηγικών εκ των οποίων τα πρώτα δυο ήδη αναφέραμε (Detect-Repair και Detect-Prevent) και το τρίτο είναι το «Predict-Prevent» , το οποίο αναφέρεται στην πρόβλεψη παραγωγής ελαττωματικών με σκοπό την άμεση πρόληψη .Τα πρώτα δυο ήταν ως έναν βαθμό επιτεύξιμα στις προηγούμενες γενιές βιομηχανιών ,ωστόσο είδαμε πως οι ανάπτυξη των τεχνολογιών της βιομηχανίας 4.0 μπορούν να αποφέρουν αποδόσεις σωστής και αυτοματοποιημένης επιθεώρησης ποιότητας των προϊόντων έως και 99% ακόμα και πριν το τελικό στάδιο . Επιπλέον ,η συνεχή επιθεώρηση της υγείας του εξοπλισμού μέσω της ανάλυσης δεδομένων των μηχανών (Machine health data analytics) η οποία συνδέεται άρρηκτα με την ποιότητα των προϊόντων δίνει σάρκα και οστά στην τρίτη στρατηγική της πρόβλεψης και πρόληψης .Με λίγα λόγια λοιπόν , σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους βελτίωσης ποιότητας που έχουμε αναφέρει όπως ,η λιτή παραγωγή και τα 6 σίγμα το ZDM χρησιμοποιεί πλήρως τις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει η μετάβαση στην βιομηχανία 4.0 . Τέλος, σύμφωνα με τον κύριο Ψαρομμάτη και όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, η ZDM μπορεί να εφαρμοστεί με δυο διαφορετικούς τρόπους : Προσανατολισμένη στο προϊόν και προσανατολισμένη στην διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα η «Product-based» οπτική εστιάζει στα πραγματικά ελαττώματα των εξαρτημάτων και των προϊόντων , αναζητώντας μια λύση για την αντιμετώπισή τους, ενώ η «process-based» αξιολογεί την κατάσταση κάθε προϊόντος ως φυσιολογική ή μη φυσιολογική, με βάση την παρουσία ελαττωμάτων στον εξοπλισμό παραγωγής. Όπως φαίνεται και στην εικόνα αν και αυτές οι προσεγγίσεις ξεκινούν από διαφορετική αφετηρία, ακολουθούν τα ίδια βήματα ώστε να θεωρηθούν μέρος ενός ενιαίου πλαισίου.

Στρατηγική ανίχνευσης (detect)

Οι περιπτώσεις χρήσης τεχνίτης νοημοσύνης που περιεγραφήκαν στην προηγούμενη υπό ενότητα αναφέρονται κυρίως στην στρατηγική της έγκαιρης ανίχνευσης «Detect» ελαττωμάτων, ανωμαλιών και σφαλμάτων στο πλαίσιο του ZDM καθώς εστιάζουν αποκλειστικά στην ποιότητα των παραγομένων προϊόντων ,ταξινομώντας τα βάσει των παραμέτρων που οδήγησαν στο ανεπιθύμητο αποτέλεσμα . Εκτός από την οπτική επιθεώρηση προϊόντων, η ανίχνευση περιλαμβάνει διάφορες δράσεις για την αντιμετώπιση τόσο της δημιουργίας του ανιχνευθέντος ελαττώματος όσο και της διάδοσής του στα επόμενα στάδια παραγωγής . Οι περισσότερες μέθοδοι ανίχνευσης που

βασίζονται σε δεδομένα εκμεταλλεύονται τα CNNs, τα οποία αποτελούν μια μέθοδο διάγνωσης σφαλμάτων με καλή ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και διάρκειας της περιόδου εκπαίδευσης ,για αυτό και αναλυθήκαν εκτενώς στην παρούσα εργασία με τα παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης .

Στρατηγική επισκευής (Repair)

Η στρατηγική της επισκευής (Repair) στην προσέγγιση του Zero -Defect Manufacturing - ZDM ασχολείται, όταν είναι δυνατόν, με την επανεργασία ή την ανακατασκευή προϊόντων. Όταν εντοπιστεί ένα ελάττωμα που μπορεί να επισκευαστεί, απαιτείται η κατάλληλη δράση επισκευής, με ισορροπία μεταξύ του ελάχιστου χρόνου και κόπου και της διατήρησης καλής απόδοσης στη ροή παραγωγής. Το κύριο ζήτημα εδώ είναι η επιτάχυνση του χρόνου επισκευής χωρίς να διαταραχθεί η συνολική ροή παραγωγής . Διάφορες ερευνητικές εργασίες εστιάζουν στη μείωση των απορριμμάτων και των επανεργασιών μέσω της δημιουργίας ενός κατάλληλου συστήματος διαχείρισης ανωμαλιών/ελαττωμάτων. Παρότι όμως η σημασία και τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι εμφανή, η υλοποίηση ενός αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισης ελαττωμάτων αποτελεί μια αρκετά πρόσφατη τάση και συνεπώς είναι ακόμη λιγότερο διερευνημένη στην επιστημονική κοινότητα. Επιπλέον , ένας σημαντικός λόγος που δεν υπάρχουν πολλές έρευνες πάνω στο θέμα αυτό είναι το ότι οι δράσεις επισκευής είναι συνήθως δαπανηρές και χρονοβόρες, γεγονός που καθιστά προτιμότερη την απόρριψη αυτών των ελαττωματικών προϊόντων , με αποτέλεσμα η προσοχή να στρέφεται στην αποδοτική απόρριψη και ανακύκλωση, γεγονός που συμβάλλει σημαντικά στη βιωσιμότητα των επιχειρήσεων.

Στρατηγική Πρόβλεψης (Predict)

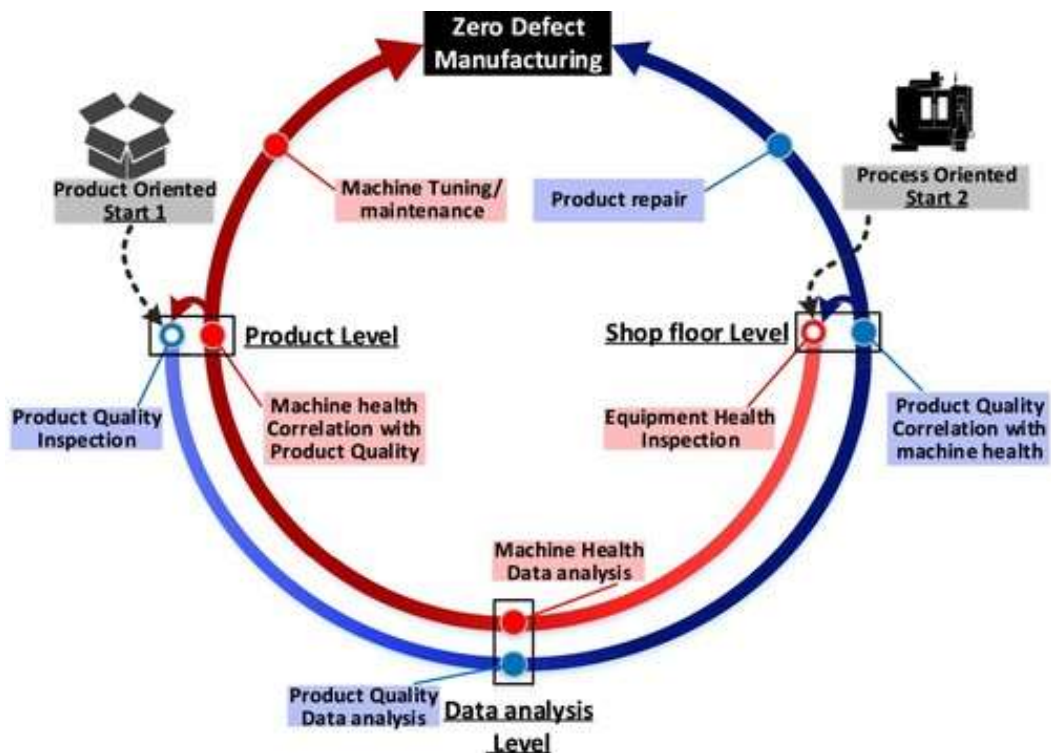
Η πρόβλεψη ελαττωμάτων, ανωμαλιών και βλαβών αποτελεί το κύριο αντικείμενο της στρατηγικής πρόβλεψης ZDM, η οποία στοχεύει στην εκτίμηση της ποιότητας κάθε μέρους του προϊόντος πριν την παραγωγή του, μέσω συγκεκριμένων μοντέλων και της

επεξεργασίας ιστορικών δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, διερευνώνται επίσης οι μελλοντικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και η Υπολειπόμενη Χρήσιμη Ζωή (Remain Useful Life - RUL) τόσο του εξοπλισμού όσο και των προϊόντων, με σκοπό τον προγραμματισμό βέλτιστων δράσεων συντήρησης. Αυτό επιτρέπει την έγκαιρη προληπτική αντικατάσταση εξαρτημάτων, αποτρέποντας απρόβλεπτες βλάβες και μειώνοντας το συνολικό κόστος συντήρησης. Στην πλειοψηφία των ερευνών σχετικά με την πρόβλεψη, αρχικά, πραγματοποιείται ανάλυση των δεδομένων των αισθητήρων σε διαφορά σημεία του εξοπλισμού για να χαρακτηριστούν ως φυσιολογικά ή ανώμαλα. Τα φυσιολογικά και τα αποκατεστημένα δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως είσοδος για τον αλγόριθμο RUL ο οποίος αποτελεί ένα μοντέλο επιβλεπομένης μηχανικής μάθησης εκπαιδευμένο σε δεδομένα παλινδρόμησης (Regression) μιας και η υπολειπομένη ζωή αποτελεί μια αριθμητική τιμή και όχι κατηγορία όπως είναι στην ανίχνευση ανωμαλιών. Παρόλο βέβαια που η διάγνωση βλαβών και η πρόβλεψη της RUL συνήθως αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα ζητήματα, σημαντική βελτίωση των επιδόσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη συνδυασμένη αντιμετώπισή τους, ώστε να αξιοποιηθούν κοινές πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη διαχείριση αυτών των δύο ζητημάτων. Για την επίλυση αυτού του θέματος, προτείνεται από πληθώρα ερευνών μια αρχιτεκτονική συνδυαστικής απώλειας βασισμένη σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (JL-CNN), η οποία αντιμετωπίζει την αναγνώριση βλαβών και την πρόβλεψη της RUL παράλληλα, μοιράζοντας τις παραμέτρους μεταξύ τους. Η στρατηγική αυτή στο πλαίσιο της ZDM συμπερασματικά, μέσω εξειδικευμένων τεχνικών, συμβάλλει στην αποδοτική πρόβλεψη της ποιότητας, διασφαλίζοντας ότι οι κρίσιμες παράμετροι του προϊόντος και της διαδικασίας παραγωγής πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Στρατηγική Πρόληψης (Prevent)

Η στρατηγική Πρόληψης ZDM αφορά στρατηγικές για τον έλεγχο ποιότητας και τα εργαλεία επιθεώρησης, με στόχο την παρακολούθηση των μηχανημάτων και της αντίστοιχης παραγόμενης ποιότητας. Σε αυτό το πλαίσιο, η Πρόβλεψη ZDM αποτελεί τον προκάτοχο της Πρόληψης ZDM, διότι για κάθε προβλεπόμενο ελάττωμα, τα

επηρεαζόμενα παραμετρικά στοιχεία εντοπίζονται και επισημαίνονται, ώστε να προσαρμοστούν ανάλογα με τις εκτιμήσεις τους, αποσκοπώντας στην αποφυγή διακοπών στη γραμμή παραγωγής. Στη βιβλιογραφία, ένας από τους πιο ελκυστικούς τομείς στην στρατηγική της πρόληψης αφορά τη διάγνωση εξαρτημάτων περιστρεφόμενων μηχανημάτων/εξαρτημάτων (άξονες, γρανάζια, ρουλεμάν) και τον έγκαιρο εντοπισμό ελαττωμάτων και βλαβών, που απαιτείται για τη διασφάλιση της λειτουργικής αξιοπιστίας και την αποφυγή καταστροφικών ατυχημάτων. Με την αναγνώριση λοιπόν των σημάτων που υποβαθμίζουν το σύστημα από τους αισθητήρες, είναι δυνατό να ληφθούν προληπτικά μέτρα για τη διατήρηση της μέγιστης λειτουργικότητας και την αποτροπή ανωμαλιών, βλαβών ή ελαττωμάτων. Για μια ακόμη φορά τα CNNs αποτελούν το πιο χρησιμοποιημένο εργαλείο στην βιβλιογραφία για τα προβλήματα της πρόληψης. Τέλος, ενώ έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθόδων έγκαιρης ανίχνευσης βλαβών, μόνο λίγες μελέτες σχετίζονται με την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος που συνδυάζει στρατηγικές συλλογής δεδομένων, αποθήκευσης, υπολογιστικού νέφους και Προγνωστικής Συντήρησης σε ένα μοναδικό και ολιστικό πλαίσιο. Ένα τέτοιο εργαλείο συνήθως μπορεί να υποστηριχτεί από ένα ψηφιακό δίδυμο και εκεί είναι που γίνονται οι περισσότερες μελέτες και δοκιμές πάνω σε πραγματικές βιομηχανίες.



Εικόνα 23. Οι δυο προσεγγίσεις για την επίτευξη του ZDM [16]

Σύγκριση της ZDM με τις παραδοσιακές μεθόδους συνεχούς βελτίωσης

Η ZDM δεν αποτελεί μια εξ ολοκλήρου καινούρια στρατηγική διαχείρισης ποιότητας. Αποτελεί περισσότερο μια ολιστική στρατηγική που συνδυάζει όλα τα εργαλεία και τις φιλοσοφίες των παραδοσιακών μεθόδων, όπως 6σ, TQM, Lean, TOC, LSS που περιγράψαμε, μετατοπίζοντας τα στον ψηφιακό κόσμο και των κόσμου του AI που διανύουμε σήμερα με σκοπό να μπορέσουν να καλυφθούν οι αντίστοιχες ανάγκες της κοινωνίας. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές διαφορές της ZDM, με τις παραδοσιακές μεθόδους συνεχούς βελτίωσης.

- Το ZDM έχει εξελιχθεί από τις τρέχουσες προληπτικές και διορθωτικές ενέργειες που βασίζονται σε δεδομένα από προηγούμενη παραγωγή και ελαττώματα, στην ικανότητα να προβλέπει πότε θα εμφανιστούν ελαττώματα και να μαθαίνει από αυτά, αναλύοντας τόσο το παρελθόν όσο και το παρόν, με σκοπό να τα αποφεύγει πριν καν δημιουργηθούν. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συνεχούς βελτίωσης δηλαδή, λαμβάνουν υπόψιν μόνο τα δεδομένα του παρελθόντος για να βελτιώσουν το μέλλον και δεν παίρνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Απεναντίας ,η στρατηγική ZDM εκτός από τα παρελθοντικά δεδομένα που αποτελούν σημαντικότατο μερίδιο για την επιτυχία του , λαμβάνουν υπόψιν και τα δεδομένα του παρόντος με σκοπό να μπορέσουν τα ληφθούν αποφάσεις προληπτικού χαρακτήρα.
- Στη συνέχεια του προηγούμενου επιχειρήματος ,αξίζει να αναφερθεί ότι μια κύρια διαφορά είναι ότι οι μέθοδοι 6σ ,TQM,Lean, Lean Six Sigma και άλλες που χρησιμοποιούνται ευρέως ,αποτελούν όπως φαίνεται και από την ονομασία τους, «μεθόδους βελτίωσης». Αυτό υποδηλώνει ότι, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, η ποιότητα δεν βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα και υπάρχει ανάγκη βελτίωσης, από την οποία προέκυψε η έμφαση στη συνεχή βελτίωση. Με άλλα λόγια, αυτή η προσέγγιση είναι διορθωτική, που σημαίνει ότι υπάρχει ένα πραγματικό πρόβλημα και χρειάζεται να διορθωθεί, είτε στο επίπεδο του προϊόντος, είτε της διαδικασίας, είτε της υπηρεσίας. Αντιθέτως , η ZDM είναι μια ολιστική, σύγχρονη μέθοδος Διαχείρισης Ποιότητας που αξιοποιεί όλες τις διαθέσιμες μεθόδους και ψηφιακές τεχνολογίες για να επιτύχει την καλύτερη δυνατή ποιότητα σε κάθε πτυχή μιας βιομηχανικής οντότητας με τον πιο αποδοτικό τρόπο.
- Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις ποιότητας είναι φτιαγμένες και κατάλληλες για μαζική παραγωγή, καθώς επικεντρώνονται στη βελτίωση των διαδικασιών μέσω τυποποίησης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν μπορούν να ανταποκριθούν βιώσιμα σε συνθήκες μαζικής εξατομίκευσης οι οποίες αρχίζουν να γίνονται όλο και συχνότερες στην σημερινή εποχή .Από την άλλη η ZDM ,επωφελουμένη στο έπακρο των τεχνολογικών αναβαθμίσεων , διασφαλίζει ότι κανένα ελαττωματικό προϊόν δεν φτάνει στον πελάτη, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητα

παραγωγής και επιθεώρησης προϊόντων με βιώσιμες μεθόδους, ακόμη και για προϊόντα με υψηλή εξατομίκευση.

- Ένα βασικό στοιχείο που προϋποθέτει είναι η 100% επιθεώρηση των παραγομένων προϊόντων σε πολλά στάδια της γραμμής παραγωγής . Οι παραδοσιακές μεθοδολογίες Διαχείρισης Ποιότητας βασίζονται κυρίως σε στατιστικά δείγματα (αν θέλουν να είναι βιώσιμες) για την επαλήθευση της ποιότητας, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική απώλεια πληροφοριών από τη διαδικασία επιθεώρησης. Από την άλλη μεριά ,στην ZDM, η επιθεώρηση του 100% των προϊόντων έχει διπλό ρόλο: πρώτον, την επαλήθευση της ποιότητας των εξαρτημάτων και, δεύτερον, τη συλλογή δεδομένων ποιότητας για τη βελτίωση της ακρίβειας και της συνολικής απόδοσης των αλγορίθμων μάθησης. Πολλοί βέβαια μπορούν να αναρωτηθούν κατά ποσό η ολική επιθεώρηση μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη .Εδώ διάφορες έρευνες μπορούν να επαληθεύσουν ότι στο πλαίσιο του ZDM για παραγωγή υψηλού κόστους προϊόντα και δεδομένου ότι η επιθεώρηση γίνεται σωστά ,η 100% επιθεώρηση καθίσταται αναγκαία. Ενώ για χαμηλού κόστους προϊόντα, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η βιωσιμότητα , μπορούν και να χρησιμοποιηθούν και λύσεις δειγματοληπτικού ελέγχου .
- Η ZDM όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αποτελεί την εξέλιξη των άλλων μεθόδων, καθώς περιλαμβάνει ορισμένες από τις βασικές έννοιες των παραδοσιακών μεθόδων βελτίωσης ποιότητας με διαφορά την εφαρμογή της. Τα 6σ για παράδειγμα ενσωματώνουν το ZDM ως μία από τις βασικές της έννοιες, ορίζοντας το ως την επίτευξη ενός μέγιστου αριθμού 3,4 ελαττωμάτων ανά εκατομμύριο προϊόντα, καθώς η επίτευξη μηδενικών ελαττωμάτων σε πραγματικό πλαίσιο είναι πρακτικά αδύνατη .Πλέον όμως ,όπως αναλύσαμε ,υπάρχει πληθώρα περιπτώσεων χρήσης των τεχνολογιών 4.0 που μπορούν όντως να αποφέρουν μηδενικά ελαττώματα , επομένως η εξέλιξη της Βιομηχανίας 4.0 και της καινοτομίας που βασίζεται στα δεδομένα διευκολύνει και καθιστά πιο αποδοτική την εφαρμογή της έννοιας του ZDM, χάρη στη διαθεσιμότητα της απαιτούμενης ποσότητας δεδομένων για τη σωστή λειτουργία τεχνικών όπως η μηχανική μάθηση.

- Τέλος, όπως επεξηγήθηκε και προηγουμένως ,οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης είναι φτιαγμένες για μαζική παραγωγή και οδεύοντας στο σήμερα κάνεις μπορεί να παρατηρήσει ότι οι κύκλοι των προϊόντων όλο και μειώνονται. Επομένως κάποια στιγμή οι παραγωγοί θα αναγκαστούν να αλλάξουν ή να κάνουν απλώς κάποιες παραλλαγές στο προϊόν τους .Στις καινούριες αυτές καταστάσεις ,οι παραδοσιακές μέθοδοι λόγω της φύσης τους θα αργήσουν να ανταποκριθούν. Παρουσιάζουν δηλαδή μια ακαμψία στις αλλαγές σε σχέση με την ZDM η οποία από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες βασισμένες σε δεδομένα ,μπορεί να μαθαίνει από τα ελαττώματα ή άλλους τύπους αστοχιών, αυξάνοντας την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του παραγωγικού συστήματος .

ZDM και βιωσιμότητα

Σήμερα , τα περισσότερα βιομηχανικά συστήματα λειτουργούν με υψηλά επίπεδα αποβλήτων κάθε τύπου ,όπως ελαττωματικά προϊόντα ,χρόνος αναμονής ,χρόνος μεταφοράς , περιττές μετακινήσεις προσωπικού και μηχανήματων, υπερπαραγωγή και αποθέματα, κάτι που αντιφάσκει στους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης .Η έννοια η οποία συνδέεται άρρηκτα με την βιωσιμότητα είναι η ποιότητα .Όχι μόνο αυτή του τελικού προϊόντος ,αλλά και η ποιότητα κάθε πτυχής ενός βιομηχανικού συστήματος ,κάτι που οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης ποιότητας δεν μπορούν να λάβουν υπόψη . Συνεπώς οι βιομηχανίες επιδιώκουν να υλοποιήσουν έξυπνα και βιώσιμα παραγωγικά συστήματα, πράγμα που σημαίνει να μετάβουν σε στρατηγικές ZDM ,γεγονός που συνεπάγεται χαμηλότερα κόστη , χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας , ανθεκτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας σε διαφορά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν και καλή εξερχόμενη ποιότητα . Για να επιτύχουν υψηλότερα επίπεδα βιωσιμότητας, οι βιομηχανικές εταιρείες πρέπει να διερευνήσουν τις αιτίες δημιουργίας αποβλήτων και πώς να τις εξαλείψουν. Αν και αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω μεθόδων βελτίωσης ποιότητας , είναι προφανές ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης δεν μπορούν να ανταποκριθούν στη νέα απαίτηση για υψηλότερη βιωσιμότητα στον τομέα της παραγωγής και ότι απαιτείται μια μέθοδος αντικατάστασης. Η βάση του ZDM είναι η επιθεώρηση ποιότητας ,διότι τα δεδομένα που αντλούνται από αυτήν είναι απαραίτητα για διορθωτικές κινήσεις αλλά και

για την εκπαίδευση προβλεπτικών μοντέλων .Οι στρατηγικές «ανίχνευση» και «πρόβλεψη» στο πλαίσιο του ZDM καταναλώνουν δεδομένα πραγματικού χρόνου που προέρχονται από αισθητήρες και PLCs, ενώ οι στρατηγικές δράσης , «πρόληψη» και «επιδιόρθωση» χρησιμοποιούν επιχειρησιακά δεδομένα ,δεδομένα προγραμματισμού της παραγωγής και παρελθοντική γνώση, ώστε να ληφθεί η σωστή “data-driven” απόφαση για το εκάστοτε πρόβλημα ποιότητας .Προκειμένου να επιτευχθεί λοιπόν η βιωσιμότητα της παραγωγής , το προϊόν θα πρέπει να επιθεωρείται σε όλα τα στάδια παραγωγής . Αυτό μπορεί να φαίνεται ιδιαίτερα κοστοβόρο και δύσκολο αλλά όπως είδαμε οι τεχνολογίες στο πλαίσιο των έξυπνων εργοστασίων μπορούν ευκολά να το φέρουν εις πέρας .Καταληκτικά , η προσέγγιση ZDM μπορεί να αυξήσει τη βιωσιμότητα ενός συστήματος παραγωγής, καθώς η μείωση του αριθμού των ελαττωμάτων και των διακοπών στην παραγωγή μειώνει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, επειδή οι προηγμένες τεχνολογίες που βασίζονται σε δεδομένα επιτρέπουν πιο αποδοτική διασφάλιση ποιότητας, η διαδικασία παραγωγής μπορεί να γίνει πιο οικονομικά αποδοτική .Συνεπώς μπορεί να επιτευχθεί βιωσιμότητα όσον αφορά την μείωση αποβλήτων αλλά και στην μείωση του κόστους .

Κεφάλαιο 5: Επίλογος

Συμπεράσματα Εργασίας

Η παρούσα εργασία αντλεί τη θεματολογία της από μια λεπτομερή ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας, επικεντρωμένη στη σύνδεση του ποιοτικού ελέγχου με τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0, υπογραμμίζοντας τη σημασία της εφαρμογής τους στις σύγχρονες επιχειρήσεις.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι ξεκάθαρο ότι ενσωμάτωση τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0 (AI, CNNs, Big data, Data analytics, Digital twins etc.) επιτρέπει στις βιομηχανίες να ξεπεράσουν τους περιορισμούς των παραδοσιακών μεθόδων διασφάλισης ποιότητας και συνεχούς βελτίωσης (6 Σίγμα, Λιτή παραγωγή, Θεωρία των περιορισμών κ.α.). Πιο συγκεκριμένα στην εργασία αναλύθηκε παραστατικά η εξέλιξη της ποιότητας σε μια κουλτούρα ολικής διοίκησης ποιότητας που διανύουμε σήμερα και η στενή συσχέτισή της με την τεχνολογία. Ένα από τα βασικά σημεία που αναδεικνύονται στην εργασία είναι η συμβολή των νέων τεχνολογιών στο πλαίσιο της βιομηχανίας 4.0 στην εξέλιξη των μεθόδων ποιότητας. Πιο συγκεκριμένα στην εργασία αναλύθηκε παραστατικά με την χρήση πολλών περιπτώσεων χρήσης ότι η υιοθέτηση των CNNs στον έξυπνο ποιοτικό έλεγχο μπορεί να προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα, ειδικά σε τομείς που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα. Εξηγήθηκε επίσης ότι σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών ότι η μετάβαση σε αυτόματο και έξυπνο ποιοτικό έλεγχο δεν αποτελεί απλώς μια πολυτέλεια στον βωμό της αύξησης της παραγωγικότητας και της κερδοφορίας αλλά μια επιτακτική ανάγκη, προς όφελος της μη εκτεταμένης καταπόνησης του προσωπικού και την βελτιστοποίηση των ελέγχων ποιότητας του προϊόντος. Επιπλέον, τονίστηκαν με απλοποιημένο τρόπο για τον αναγνώστη η σχετική ευκολία αλλά και οι οποίες δυσκολίες και προκλήσεις που μπορεί να αντιμετωπίσει κάποιος στην ενσωμάτωση της βαθιάς μάθησης στον αυτόματο ποιοτικό έλεγχο και αναδείχθηκε ότι δυνατότητες για μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλα επίπεδα. Στη συνέχεια, η εργασία επιβεβαιώνει ότι νέες προσεγγίσεις ποιότητας όπως η ZDM, έρχονται στον ορίζοντα προκειμένου να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές. Με βάση την ανάλυση της βιβλιογραφίας και κατά κύριο λόγο στις αναλυτικές έρευνες του κυρίου Ψαρομμάτη γίνεται φανερό ότι η στρατηγική ZDM αποτελεί μια ολιστική προσέγγιση η οποία εκμεταλλευόμενη στο έπακρο τις δυνατότητες

που προσφέρουν οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση της βιωσιμότητας ,της κερδοφορίας και της παραγωγικότητας των σύγχρονων βιομηχανιών. Τέλος ένα γενικότερο συμπέρασμα συνιστά ότι η συνολική πορεία της βιομηχανικής επανάστασης αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για την εξέλιξη και την προσαρμογή των βιομηχανιών στις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες. Στη σημερινή εποχή, η Βιομηχανία 4.0, με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη, το διαδίκτυο των πραγμάτων και τα μεγάλα δεδομένα, αναδύεται ως απαραίτητος μονόδρομος για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η υιοθέτησή της όχι μόνο ενισχύει την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα, αλλά συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των περιβαλλοντικών και όχι μόνο επιπτώσεων, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας για υπεύθυνη και ανθεκτική βιομηχανική δραστηριότητα .

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η ανασκόπηση που έχει γίνει σε αυτήν την εργασία παρόλη την αξία που μπορεί να δώσει στον αναγνώστη ,μπορεί κάνει να εντοπίσει κάποιους τομείς στους οποίους απαιτείται περαιτέρω έρευνα . Παρακάτω θα περιγραφούν διάφορες προτάσεις για μελλοντική έρευνα που μπορούν να συμπληρώσουν την παρούσα εργασία .

- Αρχικά , μια περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να εξετάσει την εφαρμογή τεχνολογιών όπως τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNNs) και τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins) σε συγκεκριμένους βιομηχανικούς τομείς (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία, φαρμακοβιομηχανία), με στόχο την αξιολόγηση των επιδόσεών τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Κατά την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας παρατηρήθηκε πως ενώ οι περιπτώσεις χρήσης των CNNs μελετήθηκαν από ποικίλες έρευνες με απτά αποτελέσματα ,η εξ ολοκλήρου ανάπτυξη των digital twins σε πραγματικές βιομηχανίες είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο και έχει πολλά περιθώρια περαιτέρω μελέτης .
- Επίσης , μια κατεύθυνση για μελλοντική μελέτη είναι η πειραματική εφαρμογή της στρατηγικής ZDM σε μικρότερες παραγωγικές μονάδες. Παρότι η ZDM έχει ήδη αποδείξει την αξία της σε μεγαλύτερες βιομηχανίες με υψηλή αυτοματοποίηση, η

εφαρμογή της σε μικρότερες επιχειρήσεις παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των διαφορετικών δυνατοτήτων και περιορισμών που αντιμετωπίζουν. Οι μικρότερες παραγωγικές μονάδες συνήθως διαθέτουν περιορισμένους πόρους, τόσο σε οικονομικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο, γεγονός που καθιστά την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών πιο απαιτητική. Μέσα από μια τέτοια μελέτη, θα μπορούσαν να εξεταστούν οι τεχνικές, οικονομικές και λειτουργικές προκλήσεις που προκύπτουν κατά τη μετάβαση σε συστήματα ZDM. Επίσης, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν εξειδικευμένες προσαρμογές ή απλοποιημένες εκδοχές της ZDM, που θα ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τις δυνατότητες μικρότερων παραγωγικών μονάδων και τέλος η έρευνα θα μπορούσε να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα αυτών των εφαρμογών σε σχέση με την ποιότητα του προϊόντος, τη μείωση των αποβλήτων και την απόδοση της βιωσιμότητας.

- Επιπρόσθετα , αξίζει να μελετηθεί η μετάβαση στην βιομηχανία 5.0 η οποία αναδεικνύεται ως το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των παραγωγικών συστημάτων, δίνοντας έμφαση στη συνεργασία ανθρώπων και μηχανών, καθώς και στην εξατομίκευση των προϊόντων. Ενώ η Βιομηχανία 4.0 επικεντρώνεται κυρίως στην αυτοματοποίηση και την αποτελεσματικότητα, η Βιομηχανία 5.0 προωθεί την ανθρώπινη συμμετοχή, τη δημιουργικότητα και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η ενσωμάτωση του ανθρώπινου παράγοντα λοιπόν σε μια μετάβαση προς τη Βιομηχανία 5.0 είναι ζωτικής σημασίας. Η μελέτη των νέων δεξιοτήτων που απαιτούνται για τη συνεργασία ανθρώπων και μηχανών, μαζί με την έμφαση στη βιωσιμότητα και την εξατομίκευση, προσφέρει ένα ισχυρό πλαίσιο για την κατανόηση και την υποστήριξη αυτής της αλλαγής. Η μελλοντική έρευνα μπορεί να οδηγήσει σε προτάσεις για τη δημιουργία ενός ανθρώπινο-κεντρικού περιβάλλοντος παραγωγής που θα συνδυάζει την καινοτομία με τη βιωσιμότητα και την κοινωνική ευθύνη.
- Έπειτα ,η βιομηχανία 4.0 εισάγει μια σειρά από τεχνολογικές καινοτομίες οι οποίες αλλάζουν ριζικά τον τρόπο λειτουργίας των βιομηχανιών. Σε αυτό το πλαίσιο, οι παραδοσιακές μέθοδοι διαχείρισης και βελτίωσης της ποιότητας, όπως η Λιτή Παραγωγή και τα 6 Σίγμα, αντιμετωπίζουν περιορισμούς ως προς την ικανότητά τους να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των σύγχρονων βιομηχανικών

περιβαλλόντων. Μια μελλοντική μελέτη μπορεί να επικεντρωθεί στην προσαρμογή αυτών των μεθόδων ώστε να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες της Βιομηχανίας 4.0. Για παράδειγμα, η Λιτή Παραγωγή μπορεί να ενισχυθεί μέσω της χρήσης δεδομένων πραγματικού χρόνου για την ταχύτερη λήψη αποφάσεων, ενώ τα 6 Σίγμα μπορούν να ενσωματώσουν προηγμένους αλγορίθμους ανάλυσης δεδομένων για πιο ακριβείς προβλέψεις και εντοπισμό σφαλμάτων.

- Τέλος, ο τομέας της βιομηχανίας μεταβαίνει από τη μαζική παραγωγή στη μαζική εξατομίκευση, γεγονός που, εκτός των άλλων, διαταράσσει τα πρότυπα παραγγελιών προϊόντων. Υπάρχει σημαντικά μεγαλύτερος αριθμός παραγγελιών με μικρότερο αριθμό προϊόντων ανά παραγγελία, δημιουργώντας επιπλέον βάρος στα εργαλεία προγραμματισμού. Ως εκ τούτου, άξιο αντικείμενο μελέτης θα μπορούσαν να αποτελέσουν οι προηγμένες δυναμικές μέθοδοι που να ταξινομούν δυναμικά τις παραγγελίες στο πλαίσιο των αρχών της ZDM για την ποιότητα των προϊόντων.

Βιβλιογραφία

Stuart, M., Mullins, E., & Drew, E. (1996). Statistical quality control and improvement. *European journal of operational research*, 88(2), 203-214

Marquardt, D.W. (1992), "ISO 9000: a universal standard of quality", *Management Review*, Vol. 81 No. 1, pp. 50-2

Does ISO 9000 certification improve business performance? Chow-Chua, Clare; Goh, Mark; Boon Wan, Tan *The International journal of quality & reliability management*, 01 Nov 2003, Vol. 20, Issue 8, pages 936 – 953

Ferguson, W. (1996), "Impact of the ISO 9000 series standards on industrial marketing", *Industrial Marketing Management*, Vol. 25 No. 4, pp. 305-10.

Goetsch, D.L. and Davis, S.B. (1998), Understanding and Implementing ISO 9000 and ISO Standards, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Implementation of Lean Manufacturing Principles and Fast Structured Logic Methods in the Organizational Culture: Addressing Challenges and Maximizing Efficiency

2024, International Journal of Sustainable Development and Planning

A review on lean manufacturing implementation techniques. R Sundar, AN Balaji, RMS Kumar - Procedia engineering, 2014 - Elsevier

Easton, G. S., & Jarrell, S. L. (1998). The Effects of Total Quality Management on Corporate Performance: An Empirical Investigation. *The Journal of Business*, 71(2), 253–307. <https://doi.org/10.1086/209744>

Nguyen, M. H., Phan, A. C., & Matsui, Y. (2018). Contribution of quality management practices to sustainability performance of Vietnamese firms. *Sustainability*, 10(2), 375.

Siva, V.; Gremyr, I.; Bergquist, B.; Garvare, R.; Zobel, T.; Isaksson, R. The support of Quality Management to sustainable development: A literature review. *J. Clean. Prod.* 2016, 138, 148–157. [Google Scholar] [CrossRef]

Koc, T. The Relationship Between Tqm and Performance in Small Manufacturing Enterprises: The Mediation Effect of Failure. *Int. J. Ind. Eng.* 2011, 18, 203–218.

Cua, K.O.; McKone, K.E.; Schroeder, R.G. Relationships between implementation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance. *J. Oper. Manag.* 2001, 19, 675–694.

Zehir, C.; Ertosun, Ö.G.; Zehir, S.; Müceldilli, B. Total Qual. Manag. Practices' Effects on Quality Performance and Innovative Performance. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 2012, 41, 273–280.

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6, 239–242.

Panchal, A. C., Khadse, V. M., & Mahalle, P. N. (2018, November). Security issues in IIoT: A comprehensive survey of attacks on IIoT and its countermeasures. In 2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN) (pp. 124-130). IEEE.

Wiener, N. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1948.

Lee, E. A. (2015). The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models. *Sensors*, 15(3), 4837-4869.

Sagiroglu, S., & Sinanc, D. (2013, May). Big data: A review. In 2013 international conference on collaboration technologies and systems (CTS) (pp. 42-47). IEEE.

Davenport, T. H., & Dyché, J. (2013). Big data in big companies. *International Institute for Analytics*, 3(1-31).

Emmanuel, I., & Stanier, C. (2016, November). Defining big data. In *Proceedings of the International Conference on big data and advanced Wireless technologies* (pp. 1-6).

Qian, L., Luo, Z., Du, Y., & Guo, L. (2009). Cloud computing: An overview. In *Cloud Computing: First International Conference, CloudCom 2009, Beijing, China, December 1-4, 2009. Proceedings 1* (pp. 626-631). Springer Berlin Heidelberg.

Jadeja, Y., & Modi, K. (2012, March). Cloud computing-concepts, architecture and challenges. In 2012 international conference on computing, electronics and electrical technologies (ICCEET) (pp. 877-880). IEEE.

Sajid, M., & Raza, Z. (2013, December). Cloud computing: Issues & challenges. In *International conference on cloud, big data and trust* (Vol. 20, No. 13, pp. 13-15). sn.

Malik, M. I., Wani, S. H., & Rashid, A. (2018). CLOUD COMPUTING-TECHNOLOGIES. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 9(2).

Srinivas, J., Reddy, K. V. S., & Qyser, A. M. (2012). Cloud computing basics. *International journal of advanced research in computer and communication engineering*, 1(5), 343-347.

El Naqa, I., & Murphy, M. J. (2015). *What is machine learning?* (pp. 3-11). Springer International Publishing.

Kononenko, I. (2001). Machine learning for medical diagnosis: history, state of the art and perspective. *Artificial Intelligence in medicine*, 23(1), 89-109.

Price, J., Buckles, K., Van Leeuwen, J., & Riley, I. (2019). Combining family history and machine learning to link historical records (No. w26227). National Bureau of Economic Research.

Cunningham, P., Cord, M., & Delany, S. J. (2008). Supervised learning. In *Machine learning techniques for multimedia: case studies on organization and retrieval* (pp. 21-49). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Caruana, R., & Niculescu-Mizil, A. (2006, June). An empirical comparison of supervised learning algorithms. In *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning* (pp. 161-168).

Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9(1), 381-386.

Zhou, H., Alvarez, J. M., & Porikli, F. (2016). Less is more: Towards compact cnns. In *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part IV 14* (pp. 662-677). Springer International Publishing.

Geng, Q., Zhou, Z., & Cao, X. (2018). Survey of recent progress in semantic image segmentation with CNNs. *Science China Information Sciences*, 61, 1-18.

Bai, Y., Mei, J., Yuille, A. L., & Xie, C. (2021). Are transformers more robust than cnns?. *Advances in neural information processing systems*, 34, 26831-26843.

Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2021). A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 33(12), 6999-7019.

Chauhan, R., Ghanshala, K. K., & Joshi, R. C. (2018, December). Convolutional neural network (CNN) for image detection and recognition. In *2018 first international conference on secure cyber computing and communication (ICSCCC)* (pp. 278-282). IEEE.

Jogin, M., Madhulika, M. S., Divya, G. D., Meghana, R. K., & Apoorva, S. (2018, May). Feature extraction using convolution neural networks (CNN) and deep learning. In *2018 3rd IEEE international conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT)* (pp. 2319-2323). IEEE.

Traore, B. B., Kamsu-Foguem, B., & Tangara, F. (2018). Deep convolution neural network for image recognition. *Ecological informatics*, 48, 257-268.

Zhiqiang, W., & Jun, L. (2017, July). A review of object detection based on convolutional neural network. In *2017 36th Chinese control conference (CCC)* (pp. 11104-11109). IEEE.

Hossain, M. A., & Sajib, M. S. A. (2019). Classification of image using convolutional neural network (CNN). *Global Journal of Computer Science and Technology*, 19(2), 13-14.

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012(1), 208760.

Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 1687814018822880.

Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.

Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.

Butt, J. (2020), "Exploring the interrelationship between additive manufacturing and Industry 4.0", *Designs*, Vol. 4 No. 2, p. 13.

Cerda-Avila, S.N., Medellín-Castillo, H.I. and Lim, T. (2021), "Analytical models to estimate the structural behaviour of fused deposition modelling components", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 27 No. 4, pp. 658-670.

Khorasani, M., Loy, J., Ghasemi, A. H., Sharabian, E., Leary, M., Mirafzal, H., ... & Gibson, I. (2022). A review of Industry 4.0 and additive manufacturing synergy. *Rapid Prototyping Journal*, 28(8), 1462-1475.

Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S. S., & Gisario, A. (2019). The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. *Applied Sciences*, 9(18), 3865.

Mahamood, R. M., Jen, T. C., Akinlabi, S. A., Hassan, S., Abdulrahman, K. O., & Akinlabi, E. T. (2021). Role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. In *Additive manufacturing* (pp. 107-126). Woodhead Publishing.

Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661.

Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of manufacturing systems*, 60, 119-137.

Jiang, Y., Yin, S., Li, K., Luo, H., & Kaynak, O. (2021). Industrial applications of digital twins. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2207), 20200360.

Friederich, J., Francis, D. P., Lazarova-Molnar, S., & Mohamed, N. (2022). A framework for data-driven digital twins of smart manufacturing systems. *Computers in Industry*, 136, 103586.

Jaensch, F., Csiszar, A., Scheifele, C., & Verl, A. (2018, November). Digital twins of manufacturing systems as a base for machine learning. In 2018 25th International conference on mechatronics and machine vision in practice (M2VIP) (pp. 1-6). IEEE.

Ball, P., & Badakhshan, E. (2022). Sustainable Manufacturing Digital Twins: A Review of Development and Application. In *Sustainable Design and Manufacturing: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2021)* (pp. 159-168). Springer Singapore.

Atalay, M., Murat, U., Oksuz, B., Parlaktuna, A. M., Pisirir, E., & Testik, M. C. (2022). Digital twins in manufacturing: systematic literature review for physical–digital layer categorization and future research directions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(7), 679-705.

Karabegović, I. (2018). THE ROLE OF INDUSTRIAL AND SERVICE ROBOTS IN THE 4th INDUSTRIAL REVOLUTION—"INDUSTRY 4.0". *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 11(2), 11-16.

Bragança, S., Costa, E., Castellucci, I., & Arezes, P. M. (2019). A brief overview of the use of collaborative robots in industry 4.0: Human role and safety. *Occupational and environmental safety and health*, 641-650.

Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., & Husak, E. (2020). Implementation of industry 4.0 and industrial robots in the manufacturing processes. In *New Technologies, Development and Application II 5* (pp. 3-14). Springer International Publishing.

Malý, I., Sedláček, D., & Leitao, P. (2016, July). Augmented reality experiments with industrial robot in industry 4.0 environment. In 2016 IEEE 14th international conference on industrial informatics (INDIN) (pp. 176-181). IEEE.

Sherwani, F., Asad, M. M., & Ibrahim, B. S. K. K. (2020, March). Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). In 2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST) (pp. 1-5). IEEE.

Karabegović, I., Turmanidze, R., & Dašić, P. (2020). Global trend of implementation of industrial robots relating to industry 4.0. In *Design, simulation, manufacturing: the innovation exchange* (pp. 147-155). Cham: Springer International Publishing.

Goel, R., & Gupta, P. (2020). Robotics and industry 4.0. *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development*, 157-169.

Evjemo, L. D., Gjerstad, T., Grøtli, E. I., & Sziebig, G. (2020). Trends in smart manufacturing: Role of humans and industrial robots in smart factories. *Current Robotics Reports*, 1, 35-41.

Blanco-Novoa, O., Fernandez-Carames, T. M., Fraga-Lamas, P., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A practical evaluation of commercial industrial augmented reality systems in an industry 4.0 shipyard. *Ieee Access*, 6, 8201-8218.

Zigart, T., Kormann-Hainzl, G., Lovasz-Bukvova, H., Hölzl, M., Moser, T., & Schlund, S. (2023). From lab to industry: lessons learned from the evaluation of augmented and virtual reality use cases in the Austrian manufacturing industry. *Production & Manufacturing Research*, 11(1), 2286345.

Pavlov, D., Sosnovsky, I., Dimitrov, V., Melentyev, V., & Korzun, D. (2020, April). Case study of using virtual and augmented reality in industrial system monitoring. In *2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)* (pp. 367-375). IEEE.

Dai, F. (Ed.). (2012). *Virtual reality for industrial applications*. Springer Science & Business Media.

Velosa, J. D., Cobo, L., Castillo, F., & Castillo, C. (2018). Methodological proposal for use of virtual reality VR and augmented reality AR in the formation of professional skills in industrial maintenance and industrial safety. In *Online Engineering & Internet of Things: Proceedings of the 14th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation REV 2017*, held 15-17 March 2017, Columbia University, New York, USA (pp. 987-1000). Springer International Publishing.

Büttner, S., Mucha, H., Funk, M., Kosch, T., Aehnelt, M., Robert, S., & Röcker, C. (2017, June). The design space of augmented and virtual reality applications for assistive environments in manufacturing: a visual approach. In Proceedings of the 10th international conference on PErvasive technologies related to assistive environments (pp. 433-440).

Damiani, L., Demartini, M., Guizzi, G., Revetria, R., & Tonelli, F. (2018). Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 624-630.

Ma, D., Gausemeier, J., Fan, X., & Grafe, M. (Eds.). (2011). *Virtual reality & augmented reality in industry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Behr, J., Bockholt, U., & Fellner, D. (2011). Instantreality—A Framework for Industrial Augmented and Virtual Reality Applications. In *Virtual Reality & Augmented Reality in Industry: The 2nd Sino-German Workshop* (pp. 91-99). Springer Berlin Heidelberg.

Sassi, P.; Tripicchio, P.; Avizzano, C.A. A Smart Monitoring System for Automatic Welding Defect Detection. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 66, 9641–9650

Oborski, P.; Wysocki, P. Intelligent Visual Quality Control System Based on Convolutional Neural Networks for Holonic Shop Floor Control of Industry 4.0 Manufacturing Systems. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2022, 16, 89–98.

Lee, K.J.; Kwon, J.W.; Min, S.; Yoon, J. Deploying an Artificial Intelligence-Based Defect Finder for Manufacturing Quality Management. *AI Mag.* 2021, 42, 5–18.

Bharti, S.; McGibney, A.; O’Gorman, T. Edge-Enabled Federated Learning for Vision Based Product Quality Inspection. In *Proceedings of the 2022 33rd Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, Cork, Ireland, 9–10 June 2022; pp. 1–6

Drury, C.G. Human Factors and Automation in Test and Inspection. In *Handbook of Industrial Engineering*; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2001; pp. 1887–1920. ISBN 978-0-470-17233-9.

Wang, M.J.; Drury, C.G. A Method of Evaluating Inspector's Performance Differences and Job Requirements. *Appl. Ergon.* 1989, 20, 181–190.

Zholtayev, D., Dauletiya, D., Tileukulova, A., Akimbay, D., Nursultan, M., Bushanov, Y., ... & Yeshmukhametov, A. (2024). Smart Pipe Inspection Robot with In-Chassis Motor Actuation Design and Integrated AI-Powered Defect Detection System. *IEEE Access*.

Psarommatis, F., Sousa, J., Mendonça, J. P., & Kiritsis, D. (2022). Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper. *International Journal of Production Research*, 60(1), 73-91.

Sundaram, S., & Zeid, A. (2023). Artificial intelligence-based smart quality inspection for manufacturing. *Micromachines*, 14(3), 570.

Chang, F., Liu, M., Dong, M., & Duan, Y. (2019). A mobile vision inspection system for tiny defect detection on smooth car-body surfaces based on deep ensemble learning. *Measurement Science and Technology*, 30(12), 125905.

Czimmermann, T., Chiurazzi, M., Milazzo, M., Roccella, S., Barbieri, M., Dario, P., ... & Ciuti, G. (2021). An autonomous robotic platform for manipulation and inspection of metallic surfaces in industry 4.0. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(3), 1691-1706.

Yan, R. J., Kayacan, E., Chen, I. M., Tiong, L. K., & Wu, J. (2018). QuicaBot: Quality inspection and assessment robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(2), 506-517.

Prieto, S. A., Giakoumidis, N., & de Soto, B. G. (2021). AutoCIS: an automated construction inspection system for quality inspection of buildings. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 38, pp. 669-676). IAARC Publications.

Azamfirej, V., Psarommatis, F., & Lagrosen, Y. (2023). Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 1-22.

Mineo, C., Vasilev, M., Cowan, B., MacLeod, C. N., Pierce, S. G., Wong, C., ... & Cross, E. J. (2020). Enabling robotic adaptive behaviour capabilities for new industry 4.0 automated quality inspection paradigms. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 62(6), 338-344.

Liu, L., Chen, I. M., Kayacan, E., Tiong, L. K., & Maruvanchery, V. (2015, December). Automated construction quality assessment: A review. In 2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA) (pp. 1-6). IEEE.

Mohammed, M. A., Mohammed, R., Pasam, P., & Addimulam, S. (2018). Robot-Assisted Quality Control in the United States Rubber Industry: Challenges and Opportunities. *ABC Journal of Advanced Research*, 7(2), 151-162.

Azamfirei, V., Granlund, A., & Lagrosen, Y. (2023). Lessons from adopting robotic in-line quality inspection in the Swedish manufacturing industry. *Procedia Computer Science*, 217, 386-394.

Halder, S., Afsari, K., Chiou, E., Patrick, R., & Hamed, K. A. (2023). Construction inspection & monitoring with quadruped robots in future human-robot teaming: A preliminary study. *Journal of Building Engineering*, 65, 105814.

Munaro, M., Antonello, M., Antonello, M., & Menegatti, E. (2022). Continuous mapping of large surfaces with a quality inspection robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 156, 104195.

Zhang, B., Gu, B., Tian, G., Zhou, J., Huang, J., & Xiong, Y. (2018). Challenges and solutions of optical-based nondestructive quality inspection for robotic fruit and vegetable grading systems: A technical review. *Trends in food science & technology*, 81, 213-231.

Frank, D., Chhor, J., & Schmitt, R. (2017, December). Stereo-vision for autonomous industrial inspection robots. In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (pp. 2555-2561). IEEE.

Babic, M., Farahani, M. A., & Wuest, T. (2021). Image based quality inspection in smart manufacturing systems: A literature review. *Procedia CIRP*, 103, 262-267.

Shin, H. J., & Cha, H. S. (2023). Proposing a Quality Inspection Process Model Using Advanced Technologies for the Transition to Smart Building Construction. *Sustainability*, 15(1), 815.

Kang, C. W., Ramzan, M. B., Sarkar, B., & Imran, M. (2018). Effect of inspection performance in smart manufacturing system based on human quality control system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 4351-4364.

Galindo-Salcedo, M., Pertúz-Moreno, A., Guzmán-Castillo, S., Gómez-Charris, Y., & Romero-Conrado, A. R. (2022). Smart manufacturing applications for inspection and quality assurance processes. *Procedia Computer Science*, 198, 536-541.

Guo, Z., Zhang, M., Lee, D. J., & Simons, T. (2020). Smart camera for quality inspection and grading of food products. *Electronics*, 9(3), 505.

Janhunen, J. (2012). Quality inspection of a production line with a smart camera (Master's thesis).

Lee, D. S., & Kim, G. H. (2020). Smart quality inspection scheme for construction project using 3D scanning technology. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 20(2), 191-198.

Sarivan, I. M., Greiner, J. N., Álvarez, D. D., Euteneuer, F., Reichenbach, M., Madsen, O., & Bøgh, S. (2020). Enabling real-time quality inspection in smart manufacturing through wearable smart devices and deep learning. *Procedia Manufacturing*, 51, 373-380.

Barbosa, J., Leitão, P., Ferreira, A., Queiroz, J., Angione, G., & Duca, G. L. (2018, July). Smart Inspection Tools Combining Multi-Agent Systems and Advanced Quality Control. In *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 828-833). IEEE.

Broday, E. E. (2022). The evolution of quality: from inspection to quality 4.0. *International Journal of Quality and Service Sciences*, 14(3), 368-382.

Hao, R., Lu, B., Cheng, Y., Li, X., & Huang, B. (2021). A steel surface defect inspection approach towards smart industrial monitoring. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 1833-1843.

Deshpande, S., Roy, A., Johnson, J., Fitz, E., Kumar, M., & Anand, S. (2023). Smart monitoring and automated real-time visual inspection of a sealant applications (SMART-VIStA). *Manufacturing Letters*, 35, 1134-1145.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, 2, 100110.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203-217.

Murtaza, A. A., Saher, A., Zafar, M. H., Moosavi, S. K. R., Aftab, M. F., & Sanfilippo, F. (2024). Paradigm Shift for Predictive Maintenance and Condition Monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A Systematic Review, Challenges and Case Study. *Results in Engineering*, 102935.

Mishra, D., Priyadarshi, A., Das, S. M., Shree, S., Gupta, A., Pal, S. K., & Chakravarty, D. (2022). Industry 4.0 application in manufacturing for real-time monitoring and control. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*, 1(3), 176-187.

Gray-Hawkins, M., Michalkova, L., Suler, P., & Zhuravleva, N. A. (2019). Real-time process monitoring in industry 4.0 manufacturing systems: sensing, smart, and sustainable technologies. *Economics, Management and Financial Markets*, 14(4), 30-36.

Fink, O., Wang, Q., Svensen, M., Dersin, P., Lee, W. J., & Ducoffe, M. (2020). Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 92, 103678.

Dinardo, G., Fabbiano, L., & Vacca, G. (2018). A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario. *Measurement*, 126, 1-12.

Shahzad, K., & O'Nils, M. (2018, April). Condition monitoring in industry 4.0-design challenges and possibilities: A case study. In *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT* (pp. 101-106). IEEE.

Mei, S., Yuan, M., Cui, J., Dong, S., & Zhao, J. (2022). Machinery condition monitoring in the era of industry 4.0: A relative degree of contribution feature selection and deep residual network combined approach. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108129.

Murtaza, A. A., Saher, A., Zafar, M. H., Moosavi, S. K. R., Aftab, M. F., & Sanfilippo, F. (2024). Paradigm Shift for Predictive Maintenance and Condition Monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A Systematic Review, Challenges and Case Study. *Results in Engineering*, 102935.

Mohapatra, A. G., Mohanty, A., Pradhan, N. R., Mohanty, S. N., Gupta, D., Alharbi, M., ... & Khanna, A. (2023). An Industry 4.0 implementation of a condition monitoring system and IoT-enabled predictive maintenance scheme for diesel generators. *Alexandria Engineering Journal*, 76, 525-541.

Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, 12(16), 8081.

Lindström, J., Lejon, E., Kyösti, P., Mecella, M., Heutelbeck, D., Hemmje, M., ... & Gunnarsson, B. (2019). Towards intelligent and sustainable production systems with a zero-defect manufacturing approach in an Industry 4.0 context. *Procedia Cirp*, 81, 880-885.

Psarommatis, F., Sousa, J., Mendonça, J. P., & Kiritsis, D. (2022). Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper. *International Journal of Production Research*, 60(1), 73-91.

Psarommatis, F., & Bravos, G. (2022). A holistic approach for achieving sustainable manufacturing using zero defect manufacturing: A conceptual framework. *Procedia CIRP*, 107, 107-112.

Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2024). Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 764-779.

Linderman, K., Schroeder, R. G., Zaheer, S., & Choo, A. S. (2003). Six Sigma: a goal-theoretic perspective. *Journal of Operations management*, 21(2), 193-203.

Atmaca, E., & Girenes, S. S. (2013). Lean Six Sigma methodology and application. *Quality & quantity*, 47, 2107-2127.

Alexander, P., Antony, J., & Rodgers, B. (2019). Lean Six Sigma for small-and medium-sized manufacturing enterprises: a systematic review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36(3), 378-397.

Kasemset, C. (2011, September). A review on quality improvement and Theory of Constraints (TOC). In 2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability (pp. 327-330). IEEE.

Şimşit, Z. T., Günay, N. S., & Vayvay, Ö. (2014). Theory of constraints: A literature review. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 150, 930-936.

Kuric, I., Klarák, J., Bulej, V., Sága, M., Kandera, M., Hajdučík, A., & Tucki, K. (2022). Approach to automated visual inspection of objects based on artificial intelligence. *Applied Sciences*, 12(2), 864.

Caiazzo, B., Di Nardo, M., Murino, T., Petrillo, A., Piccirillo, G., & Santini, S. (2022). Towards Zero Defect Manufacturing paradigm: A review of the state-of-the-art methods and open challenges. *Computers in Industry*, 134, 103548.

Wang, G., Ledwoch, A., Hasani, R. M., Grosu, R., & Brintrup, A. (2019). A generative neural network model for the quality prediction of work in progress products. *Applied Soft Computing*, 85, 105683.

Mao, W., He, J., Li, Y., & Yan, Y. (2017). Bearing fault diagnosis with auto-encoder extreme learning machine: A comparative study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(8), 1560-1578.

Jia, F., Lei, Y., Guo, L., Lin, J., & Xing, S. (2018). A neural network constructed by deep learning technique and its application to intelligent fault diagnosis of machines. *Neurocomputing*, 272, 619-628.

Magnanini, M. C., Colledani, M., & Caputo, D. (2020). Reference architecture for the industrial implementation of zero-defect manufacturing strategies. *Procedia CIRP*, 93, 646-651.

Βιβλιογραφία εικόνων και σχημάτων :

- [1] «<https://conformance1.com/quality-lean-6-sigma/six-sigma-process-mapping-a-step-by-step-guide-to-enhancing-productivity/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [2] Kumar, «Lean manufacturing techniques and its implementation: A review.,» *Materials Today: Proceedings*, 64, pp. 1188-1192, 2022.
- [3] «<https://sdgs.un.org/goals>,» [Ηλεκτρονικό].
- [4] «<https://explodingtopics.com/blog/data-generated-per-day>,» [Ηλεκτρονικό].
- [5] Priyakumar, «Artificial intelligence: machine learning for chemical sciences,» *Journal of Chemical Sciences*, 2021.
- [6] Zeltmann SE, «Manufacturing and Security Challenges in 3D Printing,» *JOM*, p. 1872–1881, 2016.
- [7] Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661.
- [8] Kalsoom, T., Ramzan, N., Ahmed, S., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in sensor technologies in the era of smart factory and industry 4.0. *Sensors*, 20(23), 6783.
- [9] Sundaram, «Artificial intelligence-based smart quality inspection for manufacturing,» *Micromachines*, p. 570, 2023.

- [10] D. Zholtayev, «Smart Pipe Inspection Robot With In-Chassis Motor Actuation Design and Integrated AI-Powered Defect Detection System,» *IEEE Access*, τόμ. 12, pp. 119520-119534, 2024.
- [11] Lee, K. J., Kwon, J. W., Min, S., & Yoon, J. (2021). Deploying an Artificial Intelligence-based defect finder for manufacturing quality management. *AI Magazine*, 42(2), 5-18.
- [12] H. Ma και S. Lee, «Smart System to Detect Painting Defects in Shipyards: Vision AI and a Deep-Learning Approach,» *Applied Sciences*, 2022.
- [13] Psarommatis, «Zero Defect Manufacturing: State-of-the-Art Review, Shortcomings and Future Directions in Research.,» *International Journal of Production Research*, p. 1–17, 2020.
- [14] Stuart, «Statistical quality control and improvement,» *European journal of operational research*, pp. 203-214, 1996.
- [15] Linderman, «Six Sigma: a goal-theoretic perspective,» *Journal of Operations management*, pp. 193-203, 2003.
- [16] Kuric, I., Klarák, J., Bulej, V., Sága, M., Kandra, M., Hajdučík, A., & Tucki, K. (2022). Approach to automated visual inspection of objects based on artificial intelligence. *Applied Sciences*, 12(2), 864.