



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ»**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΦΥΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΙΚΗ  
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ  
ΕΞΥΠΝΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:  
ΣΑΜΑΚΟΒΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ Α.Μ: 7519027**

**ΕΠΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:  
ΔΡ. ΕΛΠΙΝΙΚΗ Ι. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**ΛΑΡΙΣΑ, 2021**



### **Δήλωση εκπόνησης μεταπτυχιακής εργασίας**

*«Δηλώνω υπεύθυνα ότι η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών του ΠΜΣ Πλήρους Φοίτησης του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας «Ενεργειακές Τεχνολογίες και Συστήματα Αυτοματισμών» έχει συγγραφεί από εμένα προσωπικά και δεν έχει υποβληθεί ούτε έχει εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών, στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό. Η εργασία αυτή έχοντας εκπονηθεί από εμένα, αντιπροσωπεύει τις προσωπικές μου απόψεις επί του θέματος και το κείμενο είναι γραμμένο με τα δικά μου λόγια και δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής από τρίτες πηγές. Οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής αναφέρονται στο σύνολό τους, δίνοντας πλήρεις αναφορές στους συγγραφείς, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο»*

ΣΑΜΑΚΟΒΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ





## Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία γίνεται στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Ενεργειακές Τεχνολογίες και Συστήματα Αυτοματισμών» του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Το επιλεγμένο θέμα μελέτης αποτελεί ένα σύγχρονο αντικείμενο που σχετίζεται με την επιστήμη της τεχνητής νοημοσύνης. Αναμφισβήτητα ο 21<sup>ος</sup> αιώνας αποτελεί σημείο ακμής για πολλούς τομείς μιας και η τεχνολογία εξελίσσεται με αλματώδεις ρυθμούς. Ένας εξίσου σημαντικός τομέας είναι και η εξέλιξη της βιομηχανίας, ως αποτέλεσμα της 4<sup>ης</sup> Βιομηχανικής Επανάστασης. Πρόκειται ουσιαστικά για μια νέα γενιά βιομηχανίας, η οποία χαρακτηρίζεται από ευφυή συστήματα. Σε αυτό ασφαλώς συνεισφέρει και η τεχνητή νοημοσύνη, μιας και χρησιμοποιούνται πολλές τεχνολογίες που βασίζονται σε αυτής.

Η ανάπτυξη αυτού του θέματος έγινε υπό την καθοδήγηση και επίβλεψη της Δρ. Παπαγεωργίου η οποία αποτελεί εξέχουσα επιστημονική προσωπικότητα στο χώρο. Εξίσου σημαντική και πολύτιμη ήταν η βοήθεια και η υποστήριξη του Δρ. Θεοδοσίου σε όλη την έκταση της εργασίας. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, τόσο για το χρόνο που αφιέρωσαν, όσο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν.



## Abstract

The abstract summarizes this dissertation is the study of intelligent methodologies and the evaluative comparison of artificial intelligence models applied in smart industry. The main purpose of the work is the bibliographic research of papers and books related to the implementation of smart industrial applications. The areas examined concern the production stage, the forecast maintenance stage, the debugging stage and the quality control stage. A total of 58 application research papers have been studied, which categorized into applications of digital twins, augmented reality, predictive maintenance, quality control, zero-defect manufacturing, smart metrology and computer vision. From the above applications 46% of them is related to machine learning applications, 32% of them to deep learning applications, while 22% of them relate to other types of applications (i.e., simulation, python coding or data science). The most widely used artificial intelligence methodologies encountered in the above applications were artificial neural networks, convolutional neural networks, and classification techniques.

In addition, have been studied some (15) research projects of European Factories of the Future Research Association (EFFRA). They are summarized, from which the central axis of the intelligent industry emerges. The expected conclusion is that more emphasis is given to the administrative part of industry, as well as to the part of production efficiency and equipment enhancement.

The selection of research sources sample was based on the number of their references in the international literature, as well on their relevance to the topic. However, more emphasis could be given in AI technologies such as zero-defect manufacturing, quality control and smart metrology. Paper samples that have been used were not enough to form a clear opinion about the topic. So, could be further investigated this topic, in order to be enriched this work.

**Keywords:** Industry 4.0, smart manufacturing, smart product design, machine-tools 4.0, maintenance 4.0, energy management 4.0, artificial intelligence, internet of things, digital twins, augmented reality, predictive maintenance, fault detection, quality control, zero-defect manufacturing, smart metrology, computer vision

## Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη ευφών μεθοδολογιών και η αξιολογική σύγκριση των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης που εφαρμόζονται στην ευφυή βιομηχανία. Κύριος σκοπός της εργασίας είναι η βιβλιογραφική έρευνα συγγραμμάτων που σχετίζονται με την υλοποίηση ευφών βιομηχανικών εφαρμογών. Οι τομείς που εξετάζονται αφορούν το στάδιο της παραγωγής, το στάδιο της προγνωστικής συντήρησης, το στάδιο του εντοπισμού σφαλμάτων και το στάδιο του ποιοτικού ελέγχου. Συνολικά μελετήθηκαν 58 ερευνητικά συγγράμματα εφαρμογών τα οποία κατηγοριοποιούνται σε εφαρμογές ψηφιακών διδύμων, επαυξημένης πραγματικότητας, προγνωστικής συντήρησης, ποιοτικού ελέγχου, παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων, ευφυούς μετρολογίας και υπολογιστικής όρασης. Από τις παραπάνω εφαρμογές προέκυψε ότι 46% αυτών αφορούν εφαρμογές μηχανικής μάθησης, το 32% αυτών αφορούν εφαρμογές βαθιάς μάθησης, ενώ το 22% αυτών αφορούν άλλου είδους εφαρμογές, (λόγου χάριν, προσομοίωσης σε γραφικό περιβάλλον, είτε ανήκουν στο ευρύτερο φάσμα της επιστήμης δεδομένων). Οι τρεις ευρέως πιο χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης που συναντήθηκαν στις παραπάνω εφαρμογές ήταν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα και οι τεχνικές ταξινόμησης.

Επιπρόσθετα μελετήθηκαν και ορισμένα ερευνητικά έργα από την επίσημη ιστοσελίδα της Ερευνητικής Ένωσης Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος (EFFRA). Ορισμένα εξ αυτών (15), παρουσιάζονται περιληπτικά, από τα οποία προκύπτει ο κεντρικός άξονας της ευφυούς βιομηχανίας. Ως αναμενόμενο συμπέρασμα προκύπτει ότι δίνεται περισσότερη βαρύτητα στο διοικητικό κομμάτι, καθώς και στο κομμάτι της απόδοσης και του εξοπλισμού της παραγωγής.

Η εκλογή του δείγματος ερευνητικών συγγραμμάτων έγινε βάση του αριθμού αναφορών τους στη διεθνή βιβλιογραφία, και σύμφωνα πάντα με τη σχετικότητα τους με το θέμα. Ωστόσο σε ορισμένα πεδία εφαρμογών όπως ο ποιοτικός έλεγχος, η παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων και η ευφυής μετρολογία, το μέγεθος του δείγματος θα μπορούσε να εμπλουτισθεί με περεταίρω αναφορές. Ενδεχομένως αυτό να αποτελέσει έναυσμα για μια μελλοντική έρευνα, σε συνέχεια αυτή.

**Λέξεις κλειδιά:** βιομηχανία 4<sup>ης</sup> γενιάς, ευφυής βιομηχανία, ευφυής σχεδιασμός προϊόντων, ευφυή μηχανικά εργαλεία, ευφυής βιομηχανική συντήρηση, ευφυής ενεργειακή διαχείριση, τεχνητή νοημοσύνη, διαδίκτυο των πραγμάτων, ψηφιακά δίδυμα, επαυξημένη πραγματικότητα, προληπτική συντήρηση, εντοπισμός σφαλμάτων, ποιοτικός έλεγχος, παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων, ευφυής μετρολογία, υπολογιστική όραση



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Λίστα Σχημάτων.....	10
Λίστα Πινάκων.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΥΦΥΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 4 <sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ.....	15
1.1. Εισαγωγή.....	15
1.1.1. Ευφυής σχεδιασμός προϊόντων - <i>Smart Product Design</i> .....	20
1.1.2. Ευφυής προληπτική συντήρηση - <i>Maintenance 4.0</i> .....	24
1.1.3. Ευφυή μηχανικά εργαλεία - <i>Machine tools 4.0</i> .....	26
1.1.4. Ευφυής ενεργειακή διαχείριση – <i>Energy Management 4.0</i> .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΥΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΕΞΥΠΙΝΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	29
2.1. Τεχνητή νοημοσύνη στη Βιομηχανία 4 <sup>ης</sup> γενιάς.....	29
2.2. Τεχνητή νοημοσύνη στην παραγωγική διαδικασία (AI in Production Process) .....	33
2.2.1. Εφαρμογές διαδικτύου των πραγμάτων – <i>Internet of Things (IoT)</i> .....	34
2.2.2. Εφαρμογές ψηφιακών διδύμων – <i>Digital Twins (DT)</i> .....	39
2.2.3. Εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας – <i>Augmented Reality (AR)</i> .....	49
2.3. Τεχνητή νοημοσύνη στην προγνωστική συντήρηση (AI in Predictive Maintenance) .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΥΦΥΟΥΣ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	64
5.1. Τεχνητή νοημοσύνη στον εντοπισμό σφαλμάτων (AI in Fault Detection) .....	64
5.2. Τεχνητή νοημοσύνη στον ποιοτικό έλεγχο (AI in Quality Control).....	70
3.2.1. Εφαρμογές παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων – <i>Zero-defect Manufacturing</i> ...	74
3.2.2. Εφαρμογές ευφυούς μετρολογίας – <i>Smart Metrology</i> .....	77
3.2.3. Εφαρμογές υπολογιστικής όρασης – <i>Computer Vision</i> .....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΦΥΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	97
5.1. Σύγκριση των παρουσιαζόμενων μοντέλων και μεθοδολογιών.....	97
5.2. Συμπεράσματα.....	110
5.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114

## Λίστα Σχημάτων

<b>Εικόνα 0.1</b> Δομή της πτυχιακής .....	14
<b>Εικόνα 1.1</b> Αναπαράσταση του διοικητικού και εφοδιαστικού μέρους (Logistics) της βιομηχανίας τέταρτης γενιάς [2].....	17
<b>Εικόνα 1.2</b> Εννοιολογικό πλαίσιο έξυπνων συστημάτων βιομηχανίας 4.0[1] .....	19
<b>Εικόνα 1.3</b> Αναπαράσταση μοντέλου μαζικής παραγωγής και εφαρμογή του στην έξυπνη βιομηχανία [3].....	21
<b>Εικόνα 1.4</b> Διαδικασία ελέγχου της ροής παραγωγής [3] .....	23
<b>Εικόνα 1.5</b> Εξέλιξη της βιομηχανικής συντήρησης [4].....	24
<b>Εικόνα 1.6</b> Σύγκριση των τεσσάρων γενιών της βιομηχανικής συντήρησης [4] .....	26
<b>Εικόνα 1.7</b> Εξέλιξη των γενιών των μηχανικών εργαλείων [6] .....	26
<b>Εικόνα 1.8</b> Δομή μιας εργαλειομηχανής κυβερνο-φυσικής παραγωγής [7].....	28
<b>Εικόνα 2.1</b> Δομή της τεχνητής νοημοσύνης.....	29
<b>Εικόνα 2.2</b> Βιομηχανικό οικοσύστημα τεχνητής νοημοσύνης [17] .....	33
<b>Εικόνα 2.3</b> Εφαρμογή ψηφιακών διδύμων δομημένη από πλατφόρμες IoT ανοιχτού κώδικα [21] 36	
<b>Εικόνα 2.4</b> Η δομή της πλατφόρμας SWoTI [27] .....	36
<b>Εικόνα 2.5</b> Αρχιτεκτονική του Block-Sec-IoT-Net [30] .....	38
<b>Εικόνα 2.6</b> Αρχιτεκτονική του Block-IoT-Intelligence [31] .....	39
<b>Εικόνα 2.7</b> Μοντέλο κατασκευής ψηφιακού διδύμου [32] .....	40
<b>Εικόνα 2.8</b> Δομή ενός ψηφιακού διδύμου [33] .....	41
<b>Εικόνα 2.9</b> Μοντέλο DT για διάγνωση σφαλμάτων περιστροφικών μηχανημάτων [34].....	43
<b>Εικόνα 2.10</b> Μοντέλο προσομοίωσης ψηφιακού διδύμου βιομηχανικής γραμμής παραγωγής [36] .....	44
<b>Εικόνα 2.11</b> Απεικόνιση διαδικασίας συγκόλλησης κατασκευών αλουμινίου με λέιζερ.[37].....	44
<b>Εικόνα 2.12</b> Ψηφιακό δίδυμο κυβερνο-φυσικού εργοστασίου [38].....	45
<b>Εικόνα 2.13</b> Μοντέλο ψηφιακού διδύμου που αναπαριστούν τη δομή ινωδών υλικών [39] .....	46
<b>Εικόνα 2.14</b> Μοντέλο ψηφιακού διδύμου ενός συνεργατικού ρομπότ UR3[35] .....	46
<b>Εικόνα 2.15</b> Μοντέλο ψηφιακού διδύμου παρακολούθησης της διαδικασίας συγκόλλησης [40]..	47
<b>Εικόνα 2.16</b> Μοντέλο ψηφιακού διδύμου διάγνωσης σφαλμάτων δύο φάσεων της παραγωγής [41] .....	48
<b>Εικόνα 2.17</b> Ψηφιακό δίδυμο ρομποτικής διάταξης διαδικασίας συναρμολόγησης [42] .....	48
<b>Εικόνα 2.18</b> Εφαρμογή διόπτρων AR κατά το στάδιο συναρμολόγησης [45].....	50
<b>Εικόνα 2.19</b> Αρχιτεκτονική συστήματος AR καθοδήγησης γραμμής συναρμολόγησης [46] .....	51
<b>Εικόνα 2.20</b> Αρχιτεκτονική συστήματος AR για απομακρυσμένη συντήρηση [47].....	52
<b>Εικόνα 2.21</b> Μοντέλο AR ελέγχου ασυμφωνίας βιομηχανικών εφαρμογών [49] .....	52
<b>Εικόνα 2.22</b> Αναπαράσταση σε πραγματικό χρόνο των σφαλμάτων μέσω επαυξημένης πραγματικότητας [50] .....	53
<b>Εικόνα 2.23</b> Αρχιτεκτονική εφαρμογής AR σε βιομηχανικό ρομπότ [51].....	54
<b>Εικόνα 2.24</b> Ευφυής βοηθητική διάταξη παραγωγής, βασισμένη σε AR [52].....	54
<b>Εικόνα 2.25</b> Η εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας motion-EAP [53], [54].....	55
<b>Εικόνα 2.26</b> Εφαρμογή ανίχνευσης εργαλείων με επαυξημένη πραγματικότητα [56] .....	56
<b>Εικόνα 2.27</b> Επισκόπηση των κατηγοριών συντήρησης [58] .....	58
<b>Εικόνα 2.28</b> Μεθοδολογίες AI που χρησιμοποιούνται στην προγνωστική συντήρηση [57] .....	58
<b>Εικόνα 2.29</b> Αρχιτεκτονική συντήρησης εργαλειομηχανής CNC [60].....	60
<b>Εικόνα 2.30</b> Αρχιτεκτονική ευφυούς συστήματος προγνωστικής συντήρησης [60] .....	61
<b>Εικόνα 2.31</b> Προγνωστική συντήρηση με εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας [50].....	62

<b>Εικόνα 3.1</b> Αρχιτεκτονική ανίχνευσης ελαττωμάτων βασισμένη σε βαθιά μάθηση [68].	65
<b>Εικόνα 3.2</b> Ανίχνευση σφαλμάτων μηχανών εσωτερικής καύσης στην αυτοκινητοβιομηχανία [69]	66
<b>Εικόνα 3.3</b> Αρχιτεκτονική ανίχνευσης σφαλμάτων σε ένα τριφασικό επαγωγικό κινητήρα [70]	66
<b>Εικόνα 3.4</b> Ανίχνευση βλαβών μέσω φωτομετρικού στερεοφωνικού συστήματος [72]	67
<b>Εικόνα 3.5</b> Ανίχνευση βλαβών με τη μέθοδο αναγνώρισης μοτίβων (pattern recognition) [73]	68
<b>Εικόνα 3.6</b> Αρχιτεκτονική ανίχνευσης σφαλμάτων τριφασικού επαγωγικού κινητήρα [74]	69
<b>Εικόνα 3.7</b> Αρχιτεκτονική ευφυούς προγνωστικής συντήρησης για διάγνωση σφαλμάτων σε μηχανικές διατάξεις [75]	70
<b>Εικόνα 3.8</b> Αρχιτεκτονική ελέγχου παραγωγής παρτίδων δύο σταδίων [78]	72
<b>Εικόνα 3.9</b> Ποιοτικός έλεγχος, μέσω δοκιμών ακουστικής εκπομπής [80]	73
<b>Εικόνα 3.10</b> Αρχιτεκτονική ποιοτικού ελέγχου στον τομέα κατασκευής ενδυμάτων [78]	73
<b>Εικόνα 3.11</b> Αρχιτεκτονική παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων [83]	75
<b>Εικόνα 3.12</b> Αρχιτεκτονική εφαρμογής στρατηγικών παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων [84]	76
<b>Εικόνα 3.13</b> Πλατφόρμα συλλογής γνώσεων για συστήματα πολλαπλών σταδίων παραγωγής [82]	77
<b>Εικόνα 3.14</b> Μοντέλο ευφυούς μετρολογίας για κατασκευή ημιαγωγών [88]	78
<b>Εικόνα 3.15</b> Μοντέλο ευφυούς μετρολογίας και προγνωστικής συντήρησης (IMPROVE) [91]	79
<b>Εικόνα 3.16</b> Αρχιτεκτονική ευφυούς μετρολογίας για κατασκευή ημιαγωγών [92]	80
<b>Εικόνα 3.17</b> Επεξεργασία εικόνας με αισθητήρα τομογραφίας ηλεκτρικής χωρητικότητας [95]	82
<b>Εικόνα 3.18</b> Υπολογιστική όραση στον έλεγχο ποιότητας ελαστικών αυτοκινητοβιομηχανίας [96]	83
<b>Εικόνα 3.19</b> Αρχιτεκτονική υπολογιστικής όρασης για έλεγχο ποιότητας προϊόντος [10]	84
<b>Εικόνα 3.20</b> Διάγραμμα ροής οπτικού ποιοτικού ελέγχου [97]	85
<b>Εικόνα 3.21</b> Ποιοτικός έλεγχος μεταλλικών ράβδων [98]	86
<b>Εικόνα 3.22</b> Ποιοτικός έλεγχος κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων [99]	86
<b>Εικόνα 4.1</b> Αρχιτεκτονική του έργου QU4LITY [102]	87
<b>Εικόνα 4.2</b> Μοντέλο αναφοράς του έργου ForZDM [105]	88
<b>Εικόνα 4.3</b> Τεχνολογίες που βρίσκουν εφαρμογή στο έργο STREAM-0D [107]	89
<b>Εικόνα 4.4</b> Αρχιτεκτονική του έργου Z-FACTOR [109]	89
<b>Εικόνα 4.5</b> Μοντέλο του έργου GOODMAN [111]	90
<b>Εικόνα 4.6</b> Μοντέλο του έργου IFaCOM [112]	90
<b>Εικόνα 4.7</b> Μοντέλο του έργου KYKLOS 4.0 [114]	91
<b>Εικόνα 4.8</b> Μοντέλο του έργου PreCoM [115]	92
<b>Εικόνα 4.9</b> Μοντέλο του έργου FORTISSIMO2 [116]	92
<b>Εικόνα 4.10</b> Αρχιτεκτονική του έργου DATAPORTS [117]	93
<b>Εικόνα 4.11</b> Αρχιτεκτονική του έργου SERENA [119]	94
<b>Εικόνα 4.12</b> Αρχιτεκτονική του έργου PREVISION [120]	94
<b>Εικόνα 4.13</b> Αρχιτεκτονική του έργου Factory2Fit [121]	95
<b>Εικόνα 4.14</b> Αρχιτεκτονική του έργου KONFIDO [123]	96
<b>Εικόνα 4.15</b> Αρχιτεκτονική του έργου RECLAIM [125]	96
<b>Εικόνα 5.1</b> Συνολική σύγκριση «χρήσης» των εφαρμογών που παρουσιάζονται στη βιομηχανία	106
<b>Εικόνα 5.2</b> Σύγκριση μεθοδολογιών ΑΙ που χρησιμοποιήθηκαν στις εξεταζόμενες εφαρμογές	107
<b>Εικόνα 5.3</b> Συνολική συμβολή έργων EFFRA στους διάφορους βιομηχανικούς τομείς	109
<b>Εικόνα 5.4</b> Τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης που εφαρμόστηκαν στα έργα EFFRA	110
<b>Εικόνα 5.5</b> Συνολική εικόνα των εφαρμογών που μελετήθηκαν	110
<b>Εικόνα 5.6</b> Συνολική χρήση μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης σε βιομηχανικές εφαρμογές	111

<b>Εικόνα 5.8</b> Κατηγοριοποίηση των παρουσιαζόμενων εφαρμογών με βάση το πεδίο εφαρμογής	112
<b>Εικόνα 5.9</b> Κεντρικός πυρήνας των έργων EFFRA που παρουσιάστηκαν	112

### **Λίστα Πινάκων**

<b>Πίνακας 5.1</b> Εφαρμογές ψηφιακών διδύμων στη διαδικασία παραγωγής	98
<b>Πίνακας 5.2</b> Εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας στη διαδικασία παραγωγής	99
<b>Πίνακας 5.3</b> Εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης στη διαδικασία παραγωγής	100
<b>Πίνακας 5.4</b> Εφαρμογές ανίχνευση βλαβών στη διαδικασία παραγωγής	101
<b>Πίνακας 5.5</b> Εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου στη διαδικασία παραγωγής	102
<b>Πίνακας 5.6</b> Εφαρμογές παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων στη διαδικασία παραγωγής	102
<b>Πίνακας 5.7</b> Εφαρμογές ευφυούς μετρολογίας στη διαδικασία παραγωγής	103
<b>Πίνακας 5.8</b> Εφαρμογές υπολογιστικής όρασης στη διαδικασία παραγωγής	104
<b>Πίνακας 5.9</b> Έργα της Ερευνητικής Ένωσης Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος (EFFRA)	104
<b>Πίνακας 5.10</b> Συνολική σύγκριση «χρήσης» των εφαρμογών που παρουσιάζονται στη βιομηχανία	106
<b>Πίνακας 5.11</b> Σύγκριση μεθοδολογιών AI που χρησιμοποιήθηκαν στις εξεταζόμενες εφαρμογές	107
<b>Πίνακας 5.12</b> Συνολική συμβολή έργων EFFRA στους διάφορους βιομηχανικούς τομείς	108
<b>Πίνακας 5.13</b> Τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης που εφαρμόστηκαν στα έργα EFFRA	109

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται σε μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης και μεθοδολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν στον τομέα της έξυπνης βιομηχανίας. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η κεντρική ιδέα της Βιομηχανίας 4.0 (Industry 4.0) και οι καινοτόμες τεχνολογίες που περιλαμβάνονται σε αυτή. Ειδικότερα, περιγράφεται εν συντομία η γενική έννοια της βιομηχανικής διαχείρισης και της εφοδιαστικής αλυσίδας (Logistics), καθώς και η έννοια της διαδικασίας παραγωγής και της κατασκευής. Επιπλέον, επισυνάπτονται μερικά από τα πιο κρίσιμα βιομηχανικά ζητήματα όπως ο σχεδιασμός έξυπνων προϊόντων (Smart Products Design), η ευφυής συντήρηση (Smart Maintenance), τα έξυπνα βιομηχανικά εργαλεία (smart machine-tools) και η ενεργειακή διαχείριση (Smart Energy Management).

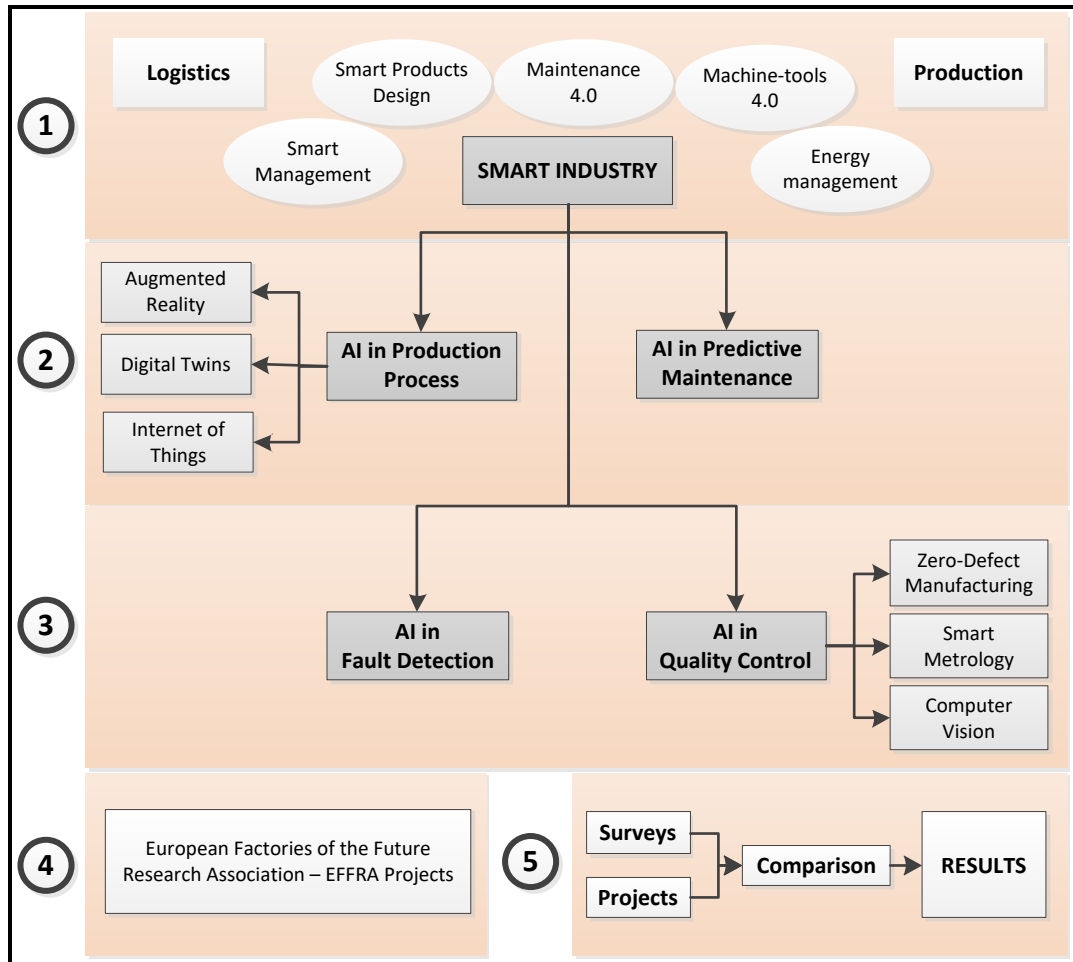
Επιπλέον, στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται αρκετές έξυπνες μεθοδολογίες και μοντέλα που εφαρμόζονται στην έξυπνη παραγωγή (Smart Manufacturing) και την προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance). Αρχικά γίνεται μια σύντομη εισαγωγή για την τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence) στη βιομηχανία. Επιπλέον, περιγράφονται μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μοντέλα για την βελτίωση της ευφυούς παραγωγής, εστιάζοντας σε εφαρμογές όπως το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things), τα ψηφιακά δίδυμα (Digital Twin) και η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality). Συνεχίζοντας, υπάρχει μια σύντομη παρουσίαση της προγνωστικής συντήρησης (Predictive Maintenance), αλλά και των μοντέλων που εφαρμόζονται στην ευφυή βιομηχανία.

Όσον αφορά το τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται διάφορες μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μοντέλα σχετικά με την ανίχνευση σφαλμάτων (Fault Detection) και τον ποιοτικό έλεγχο (Quality Control) στην ευφυή βιομηχανία. Παρουσιάζονται επίσης εφαρμογές ανίχνευσης σφαλμάτων και ποιοτικού ελέγχου στη βιομηχανική παραγωγή, όπως η παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων (Zero-Defect Manufacturing), η ευφυής μετρολογία (Smart Metrology) και η υπολογιστική όραση (Computer Vision).

Στο επόμενο κεφάλαιο υπάρχει μια σύντομη αναφορά για ορισμένα ευρωπαϊκά έργα της Ερευνητικής Ένωσης Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος - EFFRA (European Factories of the Future Research Association) και παρουσιάζεται μια μεγάλη ποικιλία από αυτά.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μια σύνοψη των μεθοδολογιών και μοντέλων, που μελετήθηκαν, τα οποία ταξινομούνται σε πίνακες, συγκρίνονται και εξετάζονται. Έπειτα,

παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας αυτής, καθώς και τυχόν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Στην *Εικόνα 0.1* παρουσιάζεται εν συντομία το πλαίσιο αυτής της διατριβής.



**Εικόνα 0.1** Δομή της πτυχιακής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΥΦΥΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 4<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ

### 1.1.Εισαγωγή

Η τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών (IT) παρουσιάζει μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Παραδείγματα όπως το υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing), το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things), η διαχείριση και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων (Bigdata Analytics), αλλά και η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence) αποτελούν εφαρμογές που μπορούν να φέρουν ριζικές αλλαγές στον τομέα της βιομηχανίας και να την μετατρέψουν σε ευφυή. Αξιοποιώντας τις τεχνολογίες αυτές η σύγχρονη βιομηχανία είναι ικανή να αντιμετωπίσει τις όλο και αυξανόμενες προκλήσεις της αγοράς, πετυχαίνοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα μεταξύ ποιοτικότερου ελέγχου της παραγωγής, σε συνδυασμό με τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου παραγωγής, και κατ' επέκταση την καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών της.

Για την επίτευξη αυτού του σκοπού απαιτείται ένας τεράστιος αριθμός αισθητήρων, ο οποίος τείνει να αυξάνει και είναι εξαρτώμενος από τις ελεγχόμενες παραμέτρους της ευφυούς βιομηχανίας. Ωστόσο η έννοια της ευφυούς βιομηχανίας προϋποθέτει την ικανότητα των αισθητήρων αυτών να λειτουργούν τόσο αυτόνομα, αλλά και αλληλοεπιδρώντας μεταξύ τους, εντοπίζοντας τα σφάλματα και επεμβαίνοντας κατάλληλα στις εκάστοτε διατάξεις της για την επίλυση τους. Μέσω των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τα δεδομένα προερχόμενα, σε πραγματικό χρόνο, από τους αισθητήρες παραγωγής μπορούν να ληφθούν και να αξιοποιηθούν άμεσα με στόχο την γρηγορότερη και ακριβέστερη λήψη αποφάσεων. Η σύνδεση του εξοπλισμού παραγωγής και των αισθητήριων συσκευών μέσω του διαδικτύου, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα διαχείρισης και ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων ψηφιακά, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός επαναστατικού μέσου παραγωγής, που αφορά συστήματα κυβερνο-φυσικής παραγωγής (Cyber-Physical Productions Systems) [1].

### 1.2. Ευφυή βιομηχανικά συστήματα 4<sup>ης</sup> γενιάς

Η βιομηχανία 4ης γενιάς (Industry 4.0) καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από το σχεδιασμό προϊόντων έως τη διοικητική και εφοδιαστική μέριμνα (Logistics) που εφαρμόζεται στην εκάστοτε βιομηχανία. Στην ενότητα αυτή γίνεται μια σύντομη

παρουσίαση των εφαρμογών που αφορούν τόσο το κομμάτι της διοικητικής και εφοδιαστικής μέριμνας, όσο και το κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας.

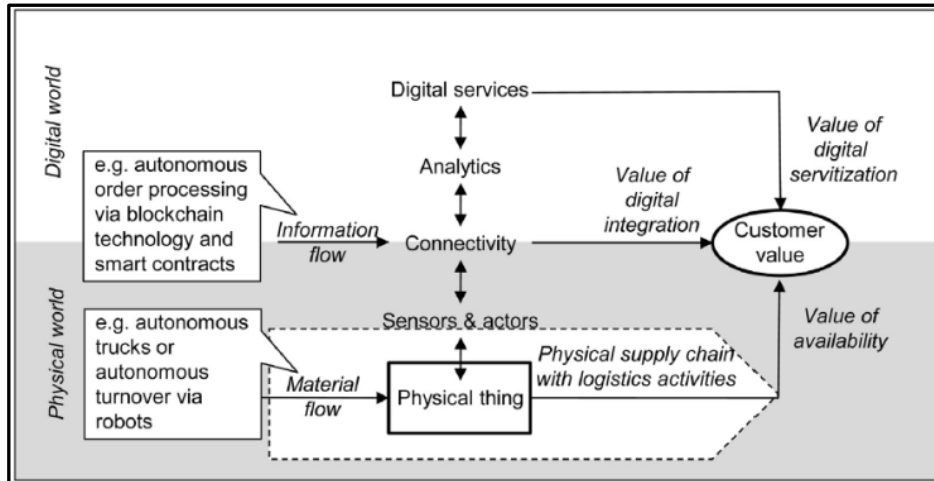
Οι ευκαιρίες και τα οφέλη που αναμένεται να επιφέρει η βιομηχανία τέταρτης γενιάς φαίνεται να είναι σημαντικά, με αποτέλεσμα την εξαιρετικά ευέλικτη μαζική παραγωγή, τον συντονισμό σε πραγματικό χρόνο και τη βελτιστοποίηση των εφοδιαστικών αλυσίδων, τη μείωση του κόστους και την εμφάνιση νέων υπηρεσιών και επιχειρηματικών μοντέλων. Όσον αφορά τον τομέα της εφοδιαστικής και διοικητικής μέριμνας, προβλέπονται επίσης σημαντικές αλλαγές. Η ενοποίηση του εφοδιαστικού τομέα με το διαδίκτυο των πραγμάτων και τα συστήματα κυβερνο-φυσικής παραγωγής, θα δώσει τη δυνατότητα στην παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των ροών των υλικών και του χειρισμού των μεταφορών.

Τα αποτελέσματα που θα επιφέρει η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση στη διαχείριση της εφοδιαστικής και διοικητικής μέριμνας περιγράφονται από ένα μοντέλο δύο διαστάσεων. Η πρώτη διάσταση αναφέρεται ως διάσταση φυσικής αλυσίδας εφοδιασμού (Physical Supply Chain dimension), ενώ η δεύτερη ως διάσταση αλυσίδας αξίας ψηφιακών δεδομένων (Digital Data Chain dimension).

Η πρώτη διάσταση περιέχει αυτόνομα και αυτοελεγχόμενα υποσυστήματα εφοδιασμού (αυτόνομα φορητά, ρομποτικές διατάξεις για τις φορτοεκφορτώσεις προϊόντων), καθώς επίσης και αυτόματα συστήματα διαχείρισης παραγγελιών, μέσω ευφών συμβολαίων (Smart Contracts) της τεχνολογίας «Blockchain».

Στη δεύτερη διάσταση τα αισθητήρια δεδομένα των μηχανικών διατάξεων που εποπτεύουν την αλυσίδα εφοδιασμού συλλέγονται από όλο το εύρος της, σε πραγματικό χρόνο. Έπειτα μέσω ενός επιπέδου συνδεσιμότητας, λόγω χάριν υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing), τα συλλεγμένα δεδομένα αναλύονται και αξιοποιούνται, με σκοπό τη βελτίωση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Στην *Εικόνα 1.1* μπορεί να διακρίνει κανείς τις δύο προαναφερθείσες διαστάσεις.





**Εικόνα 1.1** Αναπαράσταση του διοικητικού και εφοδιαστικού μέρους (Logistics) της βιομηχανίας τέταρτης γενιάς [2]

Από το παραπάνω διδιάστατο μοντέλο, αναμένονται τρία σημαντικά στοιχεία αξίας για τον πελάτη. Πρώτον, η αξία διαθεσιμότητας (Value of Availability), που σημαίνει ότι τα προϊόντα και οι υπηρεσίες θα είναι διαθέσιμα για τον πελάτη μέσω αυτόνομης παράδοσης. Δεύτερον, η αξία της ψηφιακής ολοκλήρωσης (Value of Digital Integration), όπου τα συστήματα επεξεργασίας παραγγελιών είναι διασυνδεδεμένα, διευκολύνοντας με εφαρμογές όπως η απομακρυσμένη χρήση, παρακολούθηση και καταγραφή σημαντικών πληροφοριών, τα οποία επιτυγχάνονται με τη σωστή τροφοδότηση και ροή πληροφοριών κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού. Τρίτον, η αξία της ψηφιακής εξυπηρέτησης (Value of Digital Servitization). Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της ψηφιακής εξυπηρέτησης που υπάρχει στις μέρες μας είναι το φορητό σημείο συναλλαγών (POS – Point of Sale), όπου δίνεται η δυνατότητα στον πελάτη να εξοφλήσει τις αγορές από οποιοδήποτε μέρος.

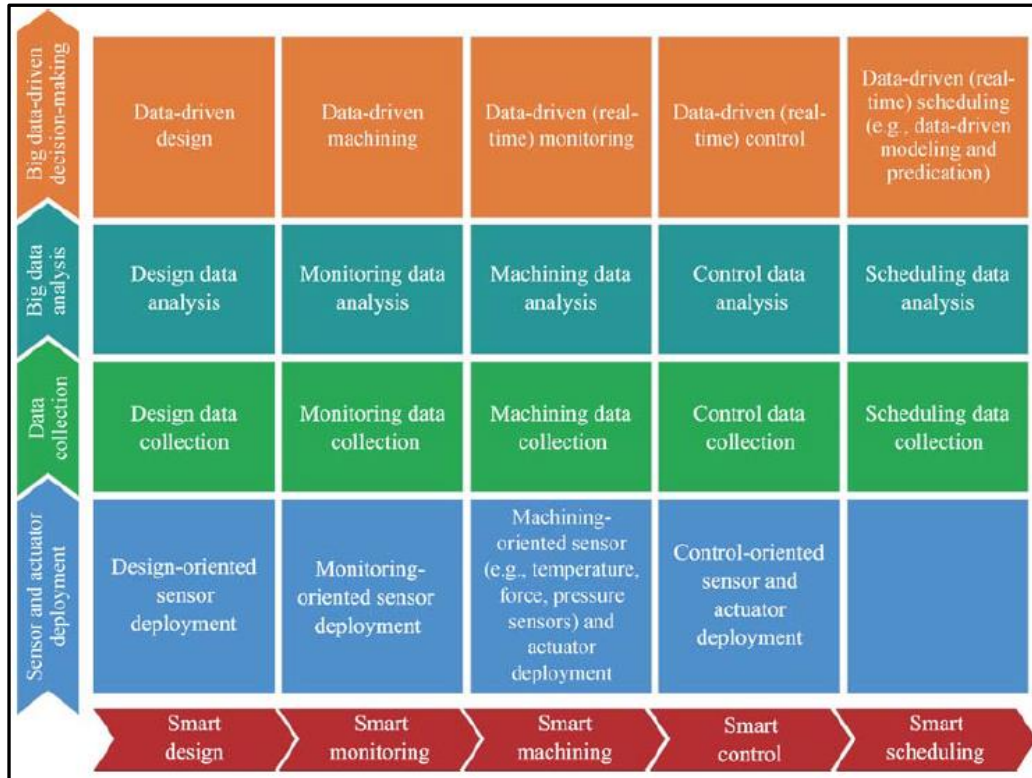
Γίνεται αντιληπτό ότι οι μονάδες που πρέπει να αναλυθούν για να εφαρμοστεί η βιομηχανία τέταρτης γενιάς, στο κομμάτι της διοικητικής και εφοδιαστικής μέριμνας, αφορούν τις κοινές και καθιερωμένες διαδικασίες της εφοδιαστικής αλυσίδας, υπό την προϋπόθεση του ψηφιακού τους μετασχηματισμού [2].

Ωστόσο περισσότερη έμφαση δίνεται στις εφαρμογές που αφορούν το κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας (Manufacturing), οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω και αναλύονται εκτενέστερα σε επόμενες ενότητες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών της παραγωγικής διαδικασίας αποτελούν:

- Ο **ευφυής σχεδιασμός προϊόντων**. Πρόκειται για ένα τροποποιημένο σχεδιασμό στις απαιτήσεις των πελατών, ο οποίος είναι εξαρτώμενος από τις ατομικές τους ανάγκες, με σκοπό την παροχή εξατομικευμένων προϊόντων.
- Η **προληπτική συντήρηση** και η εφαρμογή της στην πρόγνωση της υγείας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Η εφαρμογή των **μηχανικών εργαλείων 4ης γενιάς** Αποτελούν τη νέα γενιά εργαλειομηχανών που πρόκειται να εφαρμοστούν στην νέα βιομηχανία.
- Επιπρόσθετα όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, εισάγεται η έννοια της **ενεργειακής διαχείρισης 4ης γενιάς**. Η έννοια αυτή εμπεριέχει την συλλογή ενεργειακών δεδομένων που αποσκοπούν στη λήψη αποφάσεων ενέργειας, φιλικότερων προς το περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία παρατίθεται ένα ευρύ φάσμα θεμάτων που αφορούν την ευφυή βιομηχανία. Αναφορικά μεταξύ άλλων είναι και ο ευφυής σχεδιασμός (Smart Design), η ευφυής παρακολούθηση (Smart Monitoring), οι ευφυείς κατεργασίες (Smart Machining), ο ευφυής έλεγχος (Smart Control), ο ευφυής προγραμματισμός βιομηχανικών εφαρμογών (Smart Scheduling). Ακόμη περιλαμβάνονται ο ευφυής σχεδιασμός παραγωγής (Smart Design and Manufacturing), καθώς και η ευφυής λήψη αποφάσεων (Smart Decision Making).

Στη συνέχεια απεικονίζεται (*Εικόνα 1.2*) το εννοιολογικό πλαίσιο των έξυπνων συστημάτων της ευφυούς βιομηχανίας, ενώ έπειτα γίνεται περιληπτική αναφορά σε αυτές. Ο οριζόντιος άξονας παρουσιάζει τα τυπικά ζητήματα που θέτει η ευφυής βιομηχανία, για να χαρακτηρίζεται ως ευφυής, παραδείγματος χάριν ο ευφυής σχεδιασμός, η ευφυής παρακολούθηση κ.α., ενώ ο κάθετος άξονας εμφανίζει τα ζητήματα που αφορούν από την ανάπτυξη των κατάλληλων αισθητήριων διατάξεων, έως τη συλλογή δεδομένων, την ανάλυση τους και κατ' επέκταση τη λήψη αποφάσεων.



**Εικόνα 1.2** Εννοιολογικό πλαίσιο έξυπνων συστημάτων βιομηχανίας 4.0[1]

Ο ευφυής σχεδιασμός στηρίζεται κυρίως σε πρόσφατα ανεπτυγμένες τεχνολογίες όπως η εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality) και η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality). Πλέον με τη βοήθεια λογισμικών σχεδιασμού (CAD-CAM) είναι εφικτή η αλληλεπίδραση με ευφυή φυσικά πρωτότυπα συστήματα (Physical Prototyping Systems) σε πραγματικό χρόνο μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης ενσωματωμένης με συστήματα κυβερνο-φυσικής παραγωγής.

Οι ευφυείς κατεργασίες (Smart Machining) επιτυγχάνονται με τη βοήθεια έξυπνων ρομποτικών και αισθητήριων διατάξεων, που μπορούν να ανιχνεύσουν σήματα ή καταστάσεις αλληλοεπιδρώντας μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, οι έξυπνες μηχανικές διατάξεις, που έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με συστήματα κυβερνο-φυσικής παραγωγής, μπορούν να συλλέξουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να τα μεταφέρουν σε ένα κεντρικό σύστημα (Cloud), όπου θα συνδέονται οι διάφορες μηχανικές διατάξεις της βιομηχανίας και θα επικοινωνούν ζωντανά κατά την παραγωγική διαδικασία.

Η ευφυής παρακολούθηση (Smart Monitoring) είναι σημαντική για τη λειτουργία, τη συντήρηση και το βέλτιστο προγραμματισμό των συστημάτων παραγωγής. Η ευρεία

ανάπτυξη διαφόρων αισθητήρων κατέστησε δυνατή την ευφυή παρακολούθηση. Για παράδειγμα, διάφορα δεδομένα που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία, όπως μετρήσεις θερμοκρασίας, κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, κ.α. μπορούν να ληφθούν σε πραγματικό χρόνο. Η ευφυής παρακολούθηση παρουσιάζει όχι μόνο μια γραφική απεικόνιση της εξέλιξης στο χρόνο αυτών των δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει ειδοποιήσεις όταν παρατηρείται κάποιο σφάλμα στο τρόπο λειτουργίας της βιομηχανίας.

Ο ευφυής έλεγχος (Smart Control) στη βιομηχανία τέταρτης γενιάς, μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη συστημάτων κυβερνο-φυσικής παραγωγής και εκτελείται με στόχο τη διαχείριση των ευφύων μηχανικών διατάξεων και εργαλείων που υπάρχουν στη βιομηχανία, μέσα από διαδικτυακή πλατφόρμα υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing).

Ο ευφυής προγραμματισμός (Smart Scheduling) χρησιμοποιεί κυρίως προηγμένα μοντέλα και αλγόριθμους για την άντληση πληροφοριών από αισθητήρια δεδομένα που συλλέγονται κατά την παραγωγική διαδικασία. Έτσι εφαρμόζονται τεχνικές (Data-driven Techniques), καθώς και προηγμένες αρχιτεκτονικές αποφάσεων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ευφυή προγραμματισμό της παραγωγής με στόχο την αποδοτικότερη λειτουργία της παραγωγής.

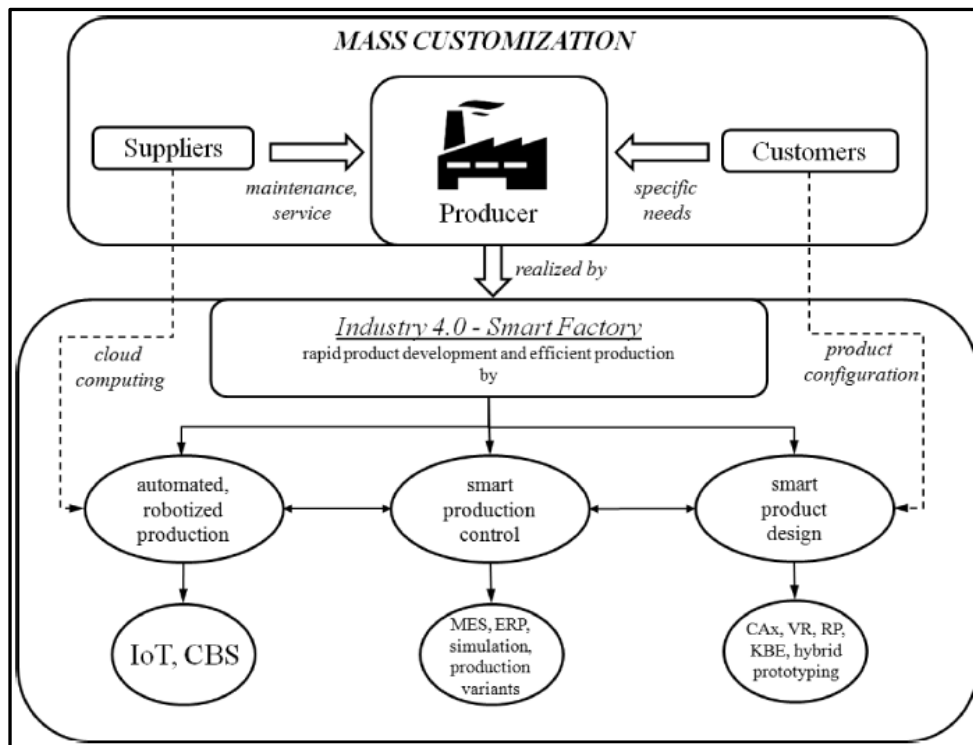
Η ευφυής λήψη αποφάσεων (Smart Decision Making) αποτελεί ίσως την πιο καίρια διαδικασία που επηρεάζει τη σύγχρονη βιομηχανία. Ο κύριος στόχος ανάπτυξης της ευφυούς λήψης αποφάσεων είναι η υλοποίηση της σωστής απόφασης, που προκύπτει μέσα από την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων των αισθητήρων της βιομηχανίας, ενώ ταυτόχρονα απαιτεί τον διαμοιρασμό πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Για την υλοποίηση ευφυούς λήψης αποφάσεων συμβάλλουν πολλές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων κυβερνο-φυσικής παραγωγής, της ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων, του υπολογιστικού νέφους, της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης [1].

### **1.1.1. Ευφυής σχεδιασμός προϊόντων - Smart Product Design**

Η ιδέα της εφαρμογής αυτής αποσκοπεί στη μαζική παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων (Mass Customization) (*Εικόνα 1.3*), κατευθυνόμενη και εξαρτώμενη από τις

ατομικές ανάγκες των πελατών. Η ιδέα του ευφυούς σχεδιασμού προϊόντων είναι γνωστή εδώ και χρόνια, ωστόσο η αποτελεσματική εφαρμογή της εξακολουθεί να αποτελεί τεράστια πρόκληση, διότι απαιτεί από τους κατασκευαστές να είναι έτοιμοι να αλλάξουν ριζικά τους τρόπους παραγωγής των προϊόντων.

Επομένως, η κατασκευή έξυπνων εργοστασίων δεν μπορεί να περιοριστεί μόνο σε νέες τεχνικές λύσεις. Θα πρέπει να βασίζεται στη ήδη υπάρχουσα γνώση και εμπειρία που προκύπτει από την πολυετή λειτουργία του, σε συνδυασμό με την ανάλυση και ανταλλαγή μεγάλου όγκου δεδομένων που αφορούν το ίδιο το εργοστάσιο, καθώς και στην ταχεία δοκιμή πολλών εναλλακτικών λύσεων μέσω προηγμένων προσομοιώσεων, που θα αποδώσουν τελικά στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του.



**Εικόνα 1.3** Αναπαράσταση μοντέλου μαζικής παραγωγής και εφαρμογή του στην έξυπνη βιομηχανία [3]

Είναι αντιληπτό ότι για να υπάρξει αποτελεσματική εφαρμογή της έννοιας της εξατομικευμένης μαζικής παραγωγής, θα πρέπει να έχουν τελειοποιηθεί οι διαδικασίες σχεδιασμού των προϊόντων, όπως επίσης και ο έλεγχος της παραγωγής τους. Η επίτευξη των στόχων που ορίζονται από αυτή τη διαδικασία απαιτεί την ανάληψη κινδύνου που πιθανώς κρύβει η χρήση νέων εργαλείων (π.χ. η υπολογιστική σχεδίαση με τρισδιάστατη μοντελοποίηση των προϊόντων, οι τεχνολογίες εικονικής πραγματικότητας κ.α.), με σκοπό τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων και στη συνέχεια πραγματικών, που θα αναπαριστούν

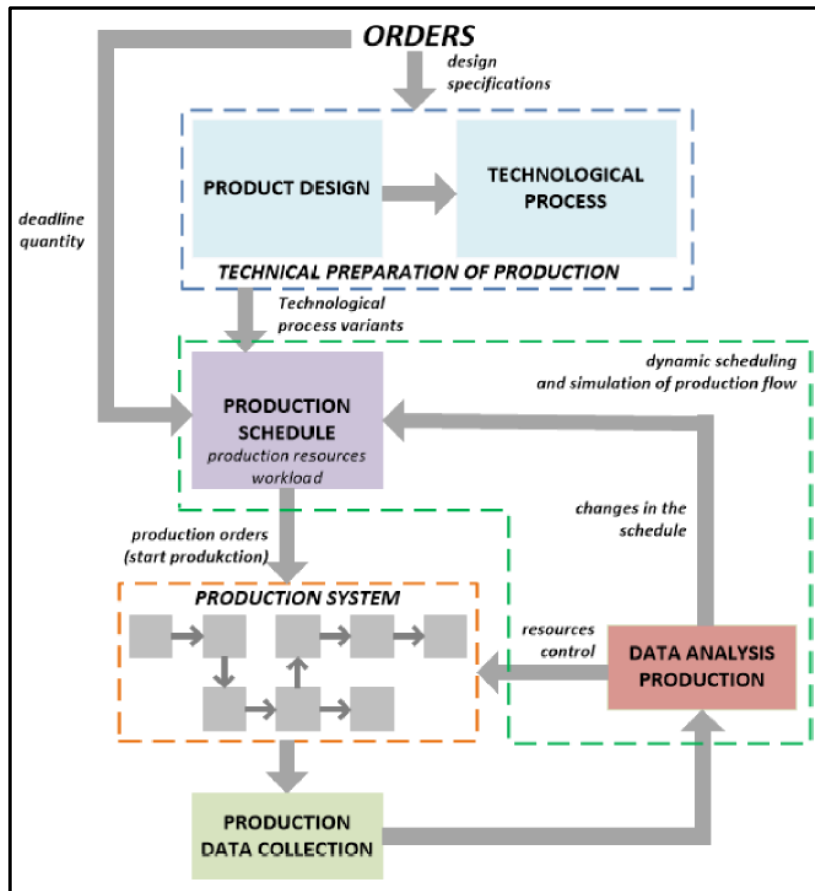
είτε μοντέλα προϊόντων, είτε μοντέλα διαδικασιών παραγωγής, άρτια κατασκευασμένα, σύμφωνα πάντα με την απαιτούμενη τεχνογνωσία που θα προκύπτει αυτόματα από τα ευφυή συστήματα. Τα συστήματα αυτά θα διαχειρίζονται τη διαμόρφωση ενός προϊόντος έτσι όπως ζητείται από τον πελάτη και θα προετοιμάζουν στο εργοστάσιο αυτόματα τον κατάλληλο σχεδιασμό και τη διαδικασία κατασκευής του.

Η υλοποίηση της μεθόδου αυτής παρουσιάζει κάποιες προκλήσεις, οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για να τεθεί σε εφαρμογή. Η πιο σημαντική προϋπόθεση είναι η μεμονωμένη και ακριβής παραγωγή ενός προϊόντος και ταυτόχρονα η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής μαζικά με στόχο την παραγωγή πολλών διαφορετικών προϊόντων ανάλογα από τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των πελατών της εταιρίας και όλα αυτά σε συνάρτηση με το χρόνο και το κόστος παραγωγής. Από τη μια μεριά αυτό είναι πολύ ελκυστικό για τον πελάτη, μιας και ικανοποιούνται οι ανάγκες του κατά το βέλτιστο τρόπο, ωστόσο για την ίδια την εταιρία ελλοχεύει ο κίνδυνος της αποτυχίας ειδικά αν το αποτέλεσμα αυξάνει το κόστος σχεδιασμού και παραγωγής. Εν αντιθέσει με τη καθιερωμένη μαζική παραγωγή, κατά την οποία συμβαίνει μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία για ποσότητες παραγωγής τεράστιων μεγεθών και πανομοιότυπων προϊόντων.

Από την σκοπιά της έξυπνης παραγωγής, ο πιο σημαντικός στόχος είναι ο συγχρονισμός της απροβλημάτιστης και συνεχούς ροής λειτουργίας σε ένα σύστημα παραγωγής. Ξεκινώντας από το συντονισμό της προμήθειας των πρώτων υλών, μέχρι την προετοιμασία αποστολής των προϊόντων στον πελάτη. Η γνώση του σχεδιασμού και του τρόπου επεξεργασίας των προϊόντων αποτελεί τη βάση για την αποτελεσματική λήψη αποφάσεων. Λαμβάνοντας υπόψη την πληθώρα απαιτήσεων των πελατών, οι μέθοδοι σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά κατασκευής. Είναι απαραίτητη λοιπόν η εφαρμογή μεθόδων που επιτρέπουν την εισαγωγή δυναμικών αλλαγών κατά την παραγωγική διαδικασία (Fast Dynamic Scheduling). Στην *Εικόνα 1.4* παρουσιάζεται η διαδικασία ελέγχου της ροής παραγωγής.

Ένας αποτελεσματικός έλεγχος παραγωγής μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο στην περίπτωση που υπάρχει η κατάλληλη τεχνογνωσία σχετικά με τη ροή παραγωγής μιας βιομηχανίας. Με τη χρήση του διαδικτύου των πραγμάτων και της επαυξημένης πραγματικότητας η τεχνογνωσία αυτή μπορεί να προκύψει από την έμμεση ή άμεση συλλογή, ανάλυση και ανταλλαγή πληροφοριών μέσω ενός υπολογιστικού δικτύου το οποίο

επικοινωνεί με όλα τα μέρη της βιομηχανίας, επιτρέποντας τη λήψη δεδομένων σχετικά με τη ροή παραγωγής και τη λειτουργία του εξοπλισμού της.



Εικόνα 1.4 Διαδικασία ελέγχου της ροής παραγωγής [3]

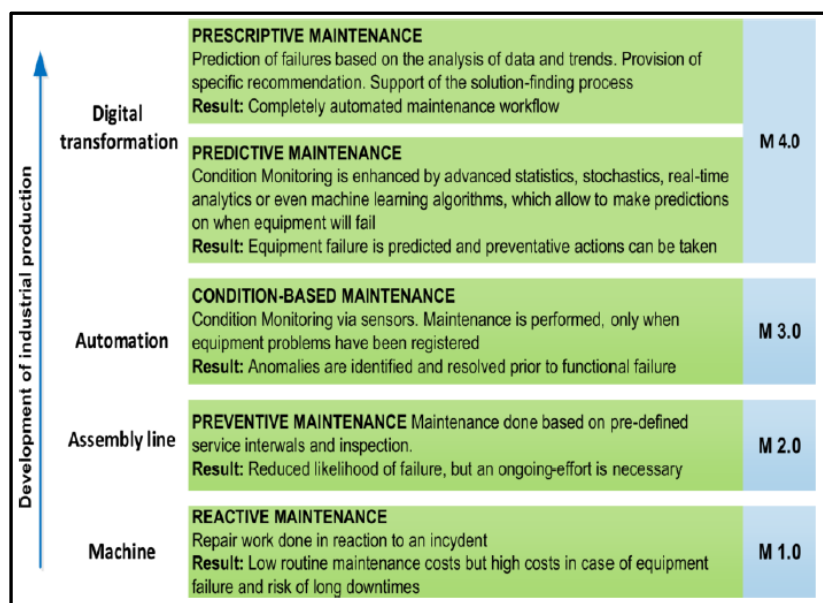
Με βάση αυτό και αξιοποιώντας αναλυτικά μοντέλα, είναι πιθανή η πρόβλεψη εμφάνισης των πιθανών αρνητικών συμβάντων, όπως δυσλειτουργίες κατά τη διαδικασία παραγωγής, σφάλματα στη λειτουργία ενός μηχανήματος, ή καθυστέρηση εκτέλεσης συγκεκριμένων εργασιών παραγωγής κ.α.. Έτσι είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες βελτιστοποίησης της παραγωγής, και να αξιοποιηθούν για τον προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης με ένα πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Μέσω ελεγκτών και αισθητήρων, αυτά τα συστήματα καταγράφουν και αναλύουν τα δεδομένα από τις παραγωγικές διαδικασίες, και μέσω συσκευών επικοινωνίας επιτρέπουν την αμοιβαία αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων μερών της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου, δημιουργείται ένα σύστημα κυβερνο-φυσικής παραγωγής (Cyber Physical Production System - CPPS), που χαρακτηρίζεται από αυτονομία λήψης αποφάσεων χωρίς ανθρώπινη επέμβαση [1], [3].

### 1.1.2. Ευφυής προληπτική συντήρηση - Maintenance 4.0

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, οι μηχανές έγιναν όλο και πιο περίπλοκες στο χειρισμό τους. Για να μειωθεί ο κίνδυνος και να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες των απροσδόκητων διακοπών στην ψηφιοποιημένη παραγωγή, η συντήρηση παίζει σημαντικό ρόλο.

Με την πάροδο του χρόνου, η συντήρηση (*Εικόνα 1.5*) έχει εξελιχθεί από διορθωτική (Maintenance 1.0) σε προληπτική (Maintenance 2.0) και στη συνέχεια σε συντήρηση βάση συνθηκών (Maintenance 3.0), και πλέον σε προγνωστική (Maintenance 4.0), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.5** Εξέλιξη της βιομηχανικής συντήρησης [4]

Κατά τη διάρκεια της πρώτης γενιάς, τα μηχανήματα ήταν αργά, απλά στη σχεδίαση και εύκολα στην επισκευή. Οι χειριστές μηχανών ήταν υπεύθυνοι για τη συντήρηση του εξοπλισμού και οι δράσεις συντήρησης τους περιοριζόταν στην επίλυση των σφαλμάτων που έχουν ήδη συμβεί. Με το πέρασμα των ετών και καθώς η πολυπλοκότητα των μηχανών μεγάλωσε και οι εργασίες συντήρησης αυξήθηκαν, οι βιομηχανίες άρχισαν να συμπεριλαμβάνουν τμήματα συντήρησης στη δομή τους. Ο στόχος του τμήματος συντήρησης ήταν η μείωση του αριθμού των διορθωτικών ενεργειών συντήρησης, μέσω περιοδικών ελέγχων. Έπειτα εμφανίστηκε η δεύτερη γενιά συντήρησης, η ιδέα της οποίας είναι στη δημιουργία ενός συστήματος προγραμματισμένων προληπτικών επισκευών, κατά την οποία πραγματοποιείται η συντήρηση μηχανημάτων και συσκευών σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η άνθιση του βιομηχανικού αυτοματισμού και των όλο και



πολυπλοκότερων βιομηχανικών διατάξεων, επέφερε την εξέλιξη της συντήρησης στην επόμενη γενιά. Η ανάπτυξη του αυτοματισμού έδωσε τις ιδέες για την ανάπτυξη καλύτερων μοντέλων συντήρησης, τα οποία θα συνέβαλλαν στην παραγωγή και το κέρδος. Η βασική ιδέα της τρίτης γενιάς περικλείει ένα πρόγραμμα συντήρησης που προτείνει ενέργειες και αποφάσεις συντήρησης βάσει των πληροφοριών που συλλέγονται μέσω της διαδικασίας παρακολούθησης της κατάστασης της βιομηχανικής παραγωγής.

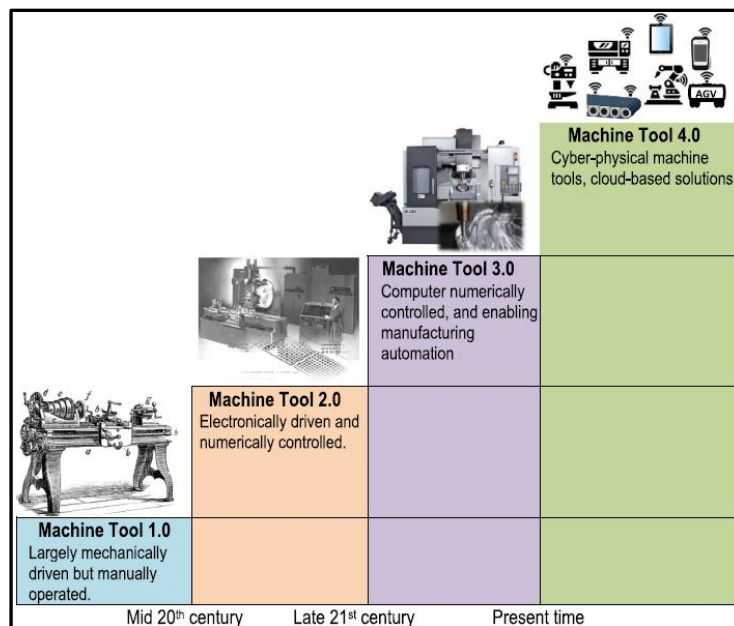
Όντας παρόντες στον 21ο αιώνα η συντήρηση τέταρτης γενιάς βρίσκεται υπό μελέτη και υλοποίηση. Με την εφαρμογή της ευφυούς βιομηχανικής επανάστασης ωθείται η ανάπτυξη νέων προτύπων συντήρησης, καινοτόμων μεθοδολογιών και εργαλείων. Η ευφυής συντήρηση ορίζεται ως ένα υποσύνολο του έξυπνου συστήματος παραγωγής που αντιπροσωπεύεται από την έννοια της «αυτοεκπαίδευσης» προβλέπει σφάλματα, κάνει διάγνωση και ενεργοποιεί ενέργειες συντήρησης. Ουσιαστικά χρησιμοποιούνται αισθητήρες για την ακριβή συλλογή δεδομένων που περιγράφουν την κατάσταση του κατασκευαστικού εξοπλισμού και τη συνολική κατάσταση λειτουργίας του. Τα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν για να προβλεφθεί πότε θα συμβούν τυχόν σφάλματα. Οι βασικές τεχνολογίες που εμπλέκονται στην πρόβλεψη συντήρησης είναι οι τεχνολογίες συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, όπως το υπολογιστικό νέφος, το διαδίκτυο των πραγμάτων, η προγνωστική ανάλυση (ασαφής λογική, νευρωνικά δίκτυα, εξελικτικοί αλγόριθμοι, μηχανική μάθηση). Η χρήση προηγμένων μεθόδων ανάλυσης δεδομένων επιτρέπει όχι μόνο στην πρόβλεψη του πότε συμβαίνει ένα σφάλμα, αλλά και χρησιμοποιώντας την ήδη υπάρχουσα γνώση από βιβλιοθήκες τυπικών εργασιών συντήρησης, να προτείνει συστάσεις του τρόπου λειτουργίας για την αποφυγή σφαλμάτων που θα μπορούσαν να συμβούν. Επιπρόσθετα αξιοποιούνται παρελθοντικά δεδομένα μετρήσεων, αλλά και δεδομένα που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την κατάσταση του μηχανήματος, καθορίζοντας έτσι την αποτελεσματικότερη πορεία λειτουργίας του [4]. Η ευφυής συντήρηση επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στον σχεδιασμό, την εφαρμογή, την παρακολούθηση και την ανάλυση των διαδικασιών συντήρησης, όπως έξυπνους αισθητήρες και έξυπνες συσκευές, εργαλεία διάγνωσης, πρόγνωσης και προσομοίωσης κ.α.. Αυτές οι τεχνολογίες ορίζουν την επόμενη γενιά συντήρησης εξοπλισμού παραγωγής που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως «Maintenance 4.0» [5]. Στην *Εικόνα 1.6* παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων γενιών της βιομηχανικής συντήρησης.

	Maintenance 1.0	Maintenance 2/0	Maintenance 3.0	Maintenance 4.0
Data source	Operator experience	Maintainer and machines	Operator, maintainer, machines, information and computer systems	Operator, maintainer, information systems, OEM and suppliers data
Data collection	Manual collection	Manual collection	Semi-automated collection	Automated collection via sensors and IoT
Data storage	Operator memory	Written documents	Databases	Cloud services
Data analysis	Arbitrary	Reliability theory based on Bathtub curve assumption	Conventional algorithms	Fuzzy logic, neural networks, evolutionary algorithms, machine learning
Data transfer	Verbal communication	Written documents	Digital files	Digital files
Data management	N/A	Human operators	Information systems	Cloud and artificial intelligence

**Εικόνα 1.6** Σύγκριση των τεσσάρων γενιών της βιομηχανικής συντήρησης [4]

### 1.1.3. Ευφυή μηχανικά εργαλεία - Machine tools 4.0

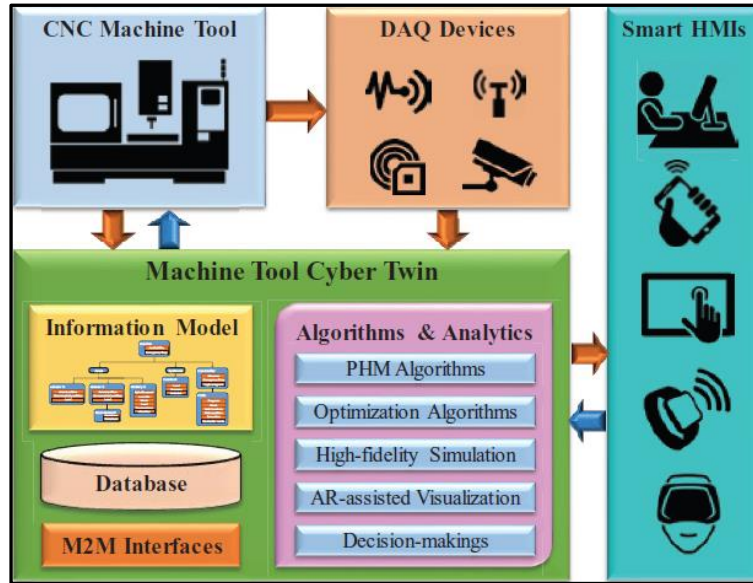
Από τη Βιομηχανική Επανάσταση και έπειτα, η ευρεία χρήση και οι συνεχείς βελτιώσεις των εργαλειομηχανών είχαν σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγικότητα της βιομηχανίας. Στην αρχή της νέας εποχής της εκβιομηχάνισης, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη προώθησης εργαλειομηχανών σε ένα νέο επίπεδο που να ανταποκρίνεται στην έννοια της ευφυούς βιομηχανίας. Όπως και τα διάφορα στάδια της εκβιομηχάνισης, τα βιομηχανικά εργαλεία έχουν περάσει επίσης από διαφορετικά στάδια τεχνολογικών εξελίξεων (Machine tools 1.0, Machine tools 2.0, Machine tools 3.0, Machine tools 4.0) (**Εικόνα 1.7**) [6].



**Εικόνα 1.7** Εξέλιξη των γενιών των μηχανικών εργαλείων [6]

Τα μηχανικά εργαλεία χρονολογούνται πολύ πριν την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης. Είδη τα πρώτα εμφανίστηκαν στις αρχές του 18ου αιώνα τα οποία μέχρι και τον 20ο αιώνα, των οποίων ο χειρισμός γινόταν με τεράστιες μηχανικές διατάξεις και χειρωνακτικά (Machine-tools 1.0). Έπειτα στα μέσα του 20ου αιώνα αναπτύχθηκαν ηλεκτρονικές διατάξεις, με τις οποίες γινόταν η οδήγηση των μηχανών (Machine-tools 2.0). Ενώ από τα τέλη του 20ου αιώνα μέχρι και σήμερα ο χειρισμός των βιομηχανικών εργαλείων πραγματοποιείται μέσω υπολογιστών και βιομηχανικών διατάξεων αυτοματισμού (Machine-tools 3.0). Πλέον όντας στον 21ο αιώνα γίνεται λόγος για ευφυή βιομηχανία και για τα ευφυή βιομηχανικά εργαλεία τέταρτης γενιάς (Machine-tools 4.0). Η έννοια των ευφύων μηχανικών εργαλείων υποδηλώνει εργαλεία που είναι καλύτερα συνδεδεμένα με την βιομηχανική παραγωγή, πιο ευέλικτα, πιο αποτελεσματικά και ασφαλή. Ο τομέας των ευφύων βιομηχανικών εργαλείων αποτελείται από τρία κύρια μέρη: τον φυσικό εξοπλισμό, τον εξοπλισμό ευφύων διατάξεων, καθώς και από τα εξαρτήματα συνδεσιμότητας. Τα έξυπνα εξαρτήματα συνδέονται άμεσα με τα φυσικά μέρη, ενώ η συνδεσιμότητα επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του μηχανήματος και του περιβάλλοντος, μέσω ευφύων διατάξεων, δίνοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης των υπηρεσιών παραγωγής από τον ίδιο τον φυσικό εξοπλισμό, με ακριβή έλεγχο. Επιπρόσθετα η ανάπτυξη τεχνολογιών για τα εξαρτήματα εργαλειομηχανών συνέβαλαν στη συνεχιζόμενη τεχνολογική βελτίωση των εργαλειομηχανών. Τα νέα αυτά μηχανικά εργαλεία ορίζουν μια νέα κατηγορία διατάξεων, τις εργαλειομηχανές κυβερνο-φυσικής παραγωγής (Cyber Physical Machine Tools - CPMT) που είναι ευφυή, καλύτερα συνδεδεμένα, ευρέως προσβάσιμα, πιο προσαρμόσιμα και πιο αυτόνομα [6].

Στην *Εικόνα 1.8* παρουσιάζεται η δομή μιας εργαλειομηχανής κυβερνο-φυσικής παραγωγής. Η εργαλειομηχανή αυτή αποτελείται από τέσσερα κύρια συστατικά. Την εργαλειομηχανή CNC, τις διατάξεις απόκτησης δεδομένων, το ψηφιακό δίδυμο της εργαλειομηχανής (Machine-tool Cyber-Twin) και τις ευφυείς διεπαφές επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής, που αποτελούν το μέσο ελέγχου και επέμβασης του ανθρώπινου παράγοντα στις μηχανικές διεργασίες (Human - Machine Interface - HMI) [7].



**Εικόνα 1.8** Δομή μιας εργαλειομηχανής κυβερνο-φυσικής παραγωγής [7]

#### 1.1.4. Ευφυής ενεργειακή διαχείριση – Energy Management 4.0

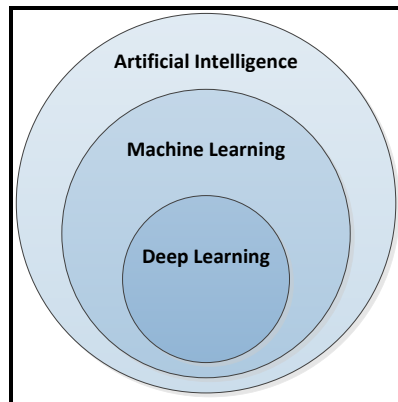
Η βιομηχανία τέταρτης γενιάς χρησιμοποιεί ευφυείς τεχνολογίες ενσωματωμένες στα συστήματα παραγωγής δημιουργώντας ένα ευνοϊκό κλίμα για μια νέα τεχνολογική εποχή που θα μεταμορφώσει ριζικά τη διαδικασία παραγωγής και τα ήδη υπάρχοντα βιομηχανικά μοντέλα, οδηγώντας στην ευφυή διαχείριση ενέργειας. Είναι προφανές ότι οι βιομηχανίες επιδιώκουν την μετατροπή τους σε ευφυείς, εστιάζοντας στη βελτίωση βασικών παραμέτρων όπως την αποδοτικότητα τους, καθώς και τη διαχείριση ενέργειας με σκοπό την ποιοτικότερη ενεργειακή απόδοση. Επιπρόσθετα η όλο και αυξανόμενη οικολογική ευαισθητοποίηση των καταναλωτών ωθούν τις βιομηχανίες στη λήψη αποφάσεων που θέτουν τις πιο οικολογικές παραγωγικές και ενεργειακά αποδοτικές διαδικασίες παραγωγής στην κορυφή των προτεραιοτήτων τους.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, τα βασικά βήματα για την εφαρμογή της ευφυούς ενεργειακής διαχείρισης ξεκινούν από την κατανόηση της ροής της ενέργειας στη βιομηχανία, βάσει της οποίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός των καταναλώσεων. Έπειτα με την εφαρμογή ενός συστήματος παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κατανάλωσης και είναι ευνοϊκότερο το κλίμα εφαρμογής πολιτικών συνεχούς βελτίωσης και ενεργειακής διαχείρισης της [8], [9].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΥΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΕΞΥΠΝΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

### 2.1. Τεχνητή νοημοσύνη στη Βιομηχανία 4<sup>ης</sup> γενιάς

Ένας από τους κύριους άξονες της ευφυούς βιομηχανίας είναι η τεχνητή νοημοσύνη (AI), και ειδικά η μηχανική μάθηση (Machine Learning - ML και η βαθιά μάθηση (Deep Learning - DL) (*Εικόνα 2.1*). Λόγω της αυξανόμενης ποσότητας δεδομένων που προέρχονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη για ανάλυση περισσότερων δεδομένων σε λιγότερο χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός μεταξύ των βιομηχανιών και σχετικά με την ανάγκη τους να ανταποκρίνονται εγκαίρως στις ανάγκες των πελατών και να παρέχουν προϊόντα υψηλής ποιότητας[10].



Εικόνα 2.1 Δομή της τεχνητής νοημοσύνης

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μοντέλων και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στην Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) [11]. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα στην έξυπνη βιομηχανία είναι:

1. **Μηχανική μάθηση (Machine Learning -ML):** Είναι η ικανότητα των έξυπνων συστημάτων να μάθουν και να βελτιωθούν μέσω της εμπειρίας που αποκτήθηκε από ιστορικά δεδομένα, χωρίς την ανάγκη προγραμματισμού ή οποιασδήποτε άλλης ανθρώπινης παρέμβασης. Θεωρείται επιμέρους πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης και των αλγορίθμων του χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των προβλέψεων. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μηχανικής μάθησης [11]–[13]:
  - a) Μάθηση με επίβλεψη (Supervised Learning): Είναι μια μαθησιακή διαδικασία όπου το μοντέλο πρέπει να εκπαιδευτεί και να τροφοδοτηθεί με το κατάλληλο σύνολο δεδομένων εισόδου και εξόδου, προκειμένου να είναι σε θέση να προβλέψει μια

πιθανή λύση ή να λάβει μια απόφαση για ένα πρόβλημα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τεχνικές όπως η ταξινόμηση (Classification) και η παλινδρόμηση (Regression).

- b) Μάθηση χωρίς επίβλεψη (Unsupervised Learning): Αυτή η μαθησιακή διαδικασία δεν απαιτεί κανένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Τα μοντέλα που βασίζονται σε αυτόν τον τύπο εκμάθησης, έχουν ως ανεξάρτητες εισόδους μεταβλητές και ο σκοπός τους είναι να τις ομαδοποιούν σε όμοιες τάξεις (συστάδες). Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τεχνικές όπως η συσταδοποίηση (Clustering). Επιπλέον, σε αυτή την προσέγγιση βασίζεται η βαθιά μάθηση (Deep Learning).
- c) Μάθηση με μερική επίβλεψη (Semi-supervised Learning): Αυτή η μαθησιακή διαδικασία συνδυάζει χαρακτηριστικά τόσο της εποπτευόμενης όσο και της μη εποπτευόμενης μάθησης. Χρησιμοποιεί ένα περιορισμένο σύνολο δεδομένων, για εκπαίδευση και οδηγεί σε ένα μερικώς εκπαιδευμένο μοντέλο. Οι τεχνικές ταξινόμησης (Classification) και συσταδοποίησης (Clustering) χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον τύπο εκμάθησης.
- d) Ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning): Σε αυτήν τη διαδικασία μάθησης ένας «πράκτορας» μαθαίνει σε ένα «περιβάλλον», λαμβάνοντας μια ανατροφοδότηση των δικών του ενεργειών, με στόχο την επίτευξη της μέγιστης συνολικής αθροιστικής ανταμοιβής που λαμβάνει ως ανατροφοδότηση από την κάθε ενέργεια του.
- 2) **Βαθιά μάθηση (Deep Learning - DL)**: Είναι η ικανότητα των έξυπνων συστημάτων να μιμούνται τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου σε εργασίες όπως η λήψη αποφάσεων και η επεξεργασία δεδομένων. Αυτή η περιοχή ανήκει στην τεχνητή νοημοσύνη αλλά είναι ένα επιμέρους πεδίου της μηχανικής μάθησης. Στις ακόλουθες γραμμές παρουσιάζονται οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι βαθιάς μάθησης [11], [13]–[15]:
- a) Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (Deep Neural Networks – DNN): Πρόκειται για ένα νευρωνικό δίκτυο του οποίου το κύριο χαρακτηριστικό είναι το βάθος του, που χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των κρυφών επιπέδων του. Αυτά τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται για τη μοντελοποίηση προβλημάτων μη γραμμικής σχέσης.
- b) Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks – CNN): Είναι ένα νευρωνικό δίκτυο επεξεργασίας εικόνας. Η αρχιτεκτονική των νευρώνων βασίζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των εικόνων που επεξεργάζονται (δηλαδή, πλάτος,

- ύψος, βάθος κ.λπ.). Αυτό το είδος νευρωνικού δικτύου είναι ιδανικό για εφαρμογές όπως η σημασιολογική κατάτμηση (semantic segmentation), η ταξινόμηση εικόνων (image classification), η ανίχνευση αντικειμένων (object detection), κ.λπ.
- c) Αυτόματοι κωδικοποιητές (Autoencoders): Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την ονομασία δεδομένων. Αποτελείται από τον κωδικοποιητή, που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή χρήσιμων χαρακτηριστικών από τα επίπεδα εισόδου και τον αποκωδικοποιητή, που αναπαράγουν τα δεδομένα εισόδου με μεγαλύτερη ακρίβεια στην έξοδο. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας απορρίπτεται ο θόρυβος των δεδομένων.
- d) Αναδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks): Αυτά τα νευρωνικά δίκτυα είναι κατάλληλα για διαχρονικό και διαδοχικό χειρισμό δεδομένων. Σε αντίθεση με άλλα νευρωνικά, αυτά είναι σε θέση να διαχειρίζονται διανύσματα εισόδου και εξόδου μεταβλητού μεγέθους. Η εφαρμογή τους σχετίζεται με την αναγνώριση ομιλίας, τη μετάφραση, την επεξεργασία βίντεο και ήχου.
- e) Βαθιά ενισχυτική μάθηση (Deep Reinforcement Learning): Αυτή η μέθοδος είναι ο συνδυασμός της ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning) και της βαθιάς μάθησης (Deep Learning). Χρησιμοποιείται κυρίως για χειρισμό μη δομημένων «περιβαλλόντων». Ένας «πράκτορας» εκτελεί ενέργειες μιας συγκεκριμένης πολιτικής, προκειμένου να επηρεάσει ένα «περιβάλλον». Ανάλογα με το παρατηρούμενο αποτέλεσμα της νέας κατάστασης, ο «πράκτορας» λαμβάνει ένα σχόλιο που αξιολογεί τις ενέργειές του. Ως «περιβάλλον» χαρακτηρίζεται ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων, το οποίο πρέπει να λυθεί από έναν «πράκτορα», δηλαδή με απλά λόγια από πρόγραμμα υπολογιστή.

Οι κύριες περιπτώσεις χρήσης τεχνητής νοημοσύνης στη ευφυή βιομηχανία παρουσιάζονται παρακάτω [16]:

- **Τεχνητή νοημοσύνη στην παραγωγή (AI in Manufacturing)**: Η βελτίωση της παραγωγικότητας, της ποιότητας και της ασφάλειας κατά τη διάρκεια της παραγωγής εξαρτάται από τη άμεση ανίχνευση των προβλημάτων και τα αναλυτικά στοιχεία αποφάσεων που λήφθηκαν από ευφυή βιομηχανικά συστήματα τεχνητής νοημοσύνης για την αντιμετώπιση τους.
- **Τεχνητή νοημοσύνη στην διαχείριση πληροφορίας (AI in Information Technology Management)**: Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να ενισχύσει τη διαδικασία

αυτοματοποίησης και την ποιότητα κατασκευής με το χειρισμό δεδομένων και πληροφοριών, μέσω της τεχνικής της ταξινόμησης, μοτίβων «traffic patterns» καθώς και με άλλες βελτιστοποιήσεις.

- **Τεχνητή νοημοσύνη στην διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας (AI in Supply Chain Management):** Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να φέρουν επανάσταση στις εταιρείες αναλύοντας το ιστορικό αγορών τους. Η μηχανική εκμάθηση μπορεί να βρει πρότυπα και να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερο σχεδιασμό αγορών και λήψη αποφάσεων, τα οποία τελικά θα μειώσουν το λειτουργικό κόστος και τον κίνδυνο των προμηθευτών και θα βελτιώσουν την απόδοση παράδοσης.
- **Τεχνητή νοημοσύνη στην κυβερνο-ασφάλεια (AI in Cybersecurity):** Η τεράστια κυκλοφορία πληροφοριών συνεπάγεται τον κίνδυνο διαρροών δεδομένων, λόγω έλλειψης ασφάλειας. Αυξημένα επίπεδα ασφάλειας μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας τεχνικές με αλγόριθμους μηχανικής μάθησης.
- **Τεχνητή νοημοσύνη στην διαχείριση οικονομικών υπηρεσιών (AI in Intelligent Processing in Financial Service):** Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό οικονομικής απάτης, με τον έλεγχο των χρηματοοικονομικών συναλλαγών.
- **Τεχνητή νοημοσύνη στη διαφήμιση (AI in Marketing):** Εξατομικευμένο και πιο στοχευμένο μάρκετινγκ μπορεί να επιτευχθεί με την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης μέσω αναλυτών μηχανικής μάθησης.
- **Τεχνητή νοημοσύνη στις πωλήσεις (AI in Retail Sales):** Όλο και περισσότερες εταιρείες χρησιμοποιούν τεχνολογίες AI (π.χ. επαυξημένη πραγματικότητα, εικονικοί βοηθοί, bots βιομηχανίας κ.λπ.), οι οποίες αλλάζουν τον τρόπο των παραδοσιακών αγορών και υπηρεσιών, βελτιώνοντας από την εφοδιαστική αλυσίδα, μέχρι και την εξυπηρέτηση πελατών.

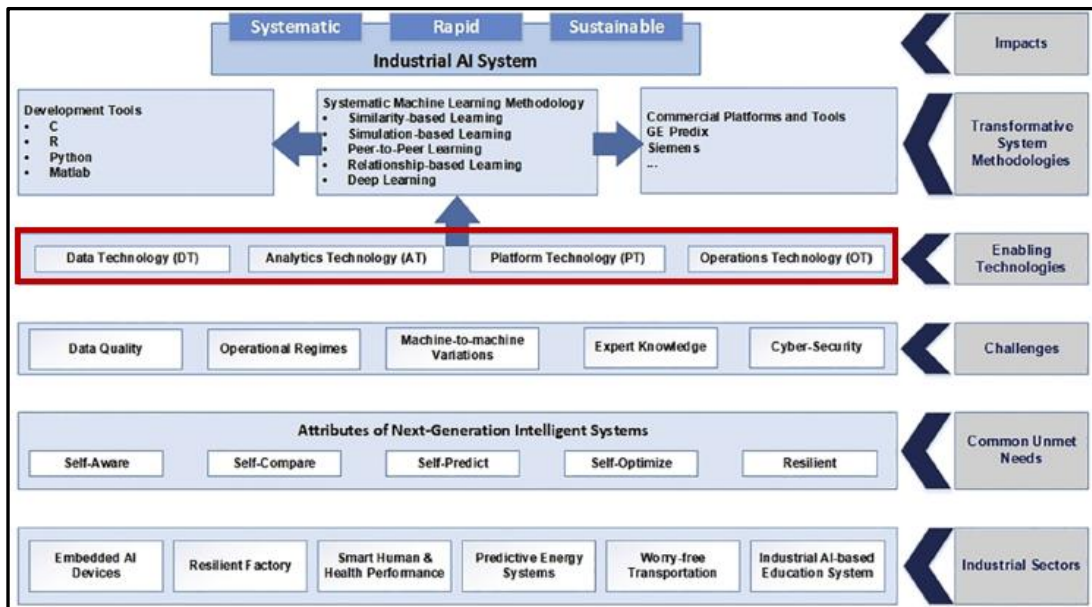
Γίνεται αντιληπτό ότι η τεχνητή νοημοσύνη μέσω του διαδικτύου των πραγμάτων, των συστημάτων κυβερνο-φυσικής παραγωγής και της μηχανικής μάθησης έχουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών στον τομέα της ευφυούς βιομηχανίας.

Στην παρακάτω αναφορά [17] προτείνεται ένα βιομηχανικό οικοσύστημα AI. Το αντίστοιχο διάγραμμα (*Εικόνα 2.2*) μπορεί να φανεί χρήσιμο σε όσους θέλουν να αναπτύξουν μια βιομηχανική στρατηγική AI. Σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση,



ένα βιομηχανικό οικοσύστημα τεχνητής νοημοσύνης βασίζεται σε τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες:

- **Τεχνολογία δεδομένων (Data Technology):** επιτρέπει την αποτελεσματική απόκτηση χρήσιμων δεδομένων και σημαντικών μετρήσεων στη βιομηχανία.
- **Τεχνολογία αναλυτών (Analytics Technology):** εξάγει χρήσιμες πληροφορίες από αισθητήρια δεδομένα.
- **Τεχνολογία πλατφόρμας (Platform Technology):** συμβάλει στην αποθήκευση των δεδομένων της παραγωγικής διαδικασίας, με σκοπό την μελλοντική ανάλυση και ανατροφοδότηση τους.
- **Τεχνολογία λειτουργιών (Operation Technology):** εμπεριέχει τα σχέδια αποφάσεων και δράσεων βάση των πληροφοριών που εξάγονται από τα επεξεργασμένα δεδομένα.



Εικόνα 2.2 Βιομηχανικό οικοσύστημα τεχνητής νοημοσύνης [17]

## 2.2. Τεχνητή νοημοσύνη στην παραγωγική διαδικασία (AI in Production Process)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες και τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, εστιάζοντας στη διαδικασία παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα περιγράφονται: i) εφαρμογές του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things), ii) εφαρμογές της τεχνολογίας ψηφιακών διδύμων (Digital Twin) και iii) εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality), εστιασμένες πάντα στη διαδικασία παραγωγής (Production Process).

### 2.2.1. Εφαρμογές διαδικτύου των πραγμάτων – *Internet of Things (IoT)*

Οι τεχνολογίες διαδικτύου των πραγμάτων «IoT» χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές ενισχύοντας τα συστήματα παρακολούθησης, ανάλυσης και υποστήριξης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Είναι σαφές ότι το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων «Industrial IoT» μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη γενική έννοια του «Industry 4.0». Ένα σύστημα IoT αποτελείται από αισθητήρες, ενεργοποιητές και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων που συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα. Ο κύριος σκοπός αυτών των συστημάτων είναι να μετριάσει ο λανθάνων χρόνος, και να ενισχυθεί η πρόσβαση σε πληροφορίες σε όλο το εύρος της βιομηχανικής παραγωγής, έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνονται καλύτερες και ταχύτερες αποφάσεις με βάση τα συλλεγόμενα δεδομένα [18].

Μια τυπική αρχιτεκτονική βιομηχανικού «IoT» αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία [19]:

- **«Πράγματα – Things»:** Είναι όλες οι βιομηχανικές συσκευές που συνδέονται στο δίκτυο.
- **«Intelligent Edge Gateway»:** Είναι το λογισμικό το οποίο συνδέει τις συσκευές «πράγματα» με το δίκτυο νέφους «IoT Cloud».
- **«Νέφος - IoT Cloud»:** Είναι η κεντρική πλατφόρμα πληροφοριών, η οποία συλλέγει δεδομένα και εφαρμόζει τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, για την ανάλυση τους.
- **«Business Integration and Applications»:** Αναφέρεται στα συστήματα εφαρμογών που είναι σημαντικά για τον προγραμματισμό της παραγωγής.

Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε έργα «IoT» [20]:

- **Μετρητικά δεδομένα - Measurement data:** φυσικές παράμετροι που παρακολουθούνται από αισθητήρες.
- **Δεδομένα συμβάντων - Event data:** απροσδόκητα συμβάντα ή σημαντικές αλλαγές κατάστασης των συστημάτων κατά τη λειτουργία τους.
- **Δεδομένα αλληλεπίδρασης - Interaction and transaction data:** δεδομένα που σχετίζονται με την επικοινωνία μεταξύ συσκευών και την επικοινωνία μεταξύ ανθρώπου και συσκευών.
- **Διαγνωστικά δεδομένα - Diagnostic data:** δεδομένα σχετικά με τη δομική και λειτουργική υγεία των μηχανικών συστημάτων και διαδικασιών.

Ανάλογα με το αναμενόμενο αποτέλεσμα υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες ανάλυσης δεδομένων [19]:

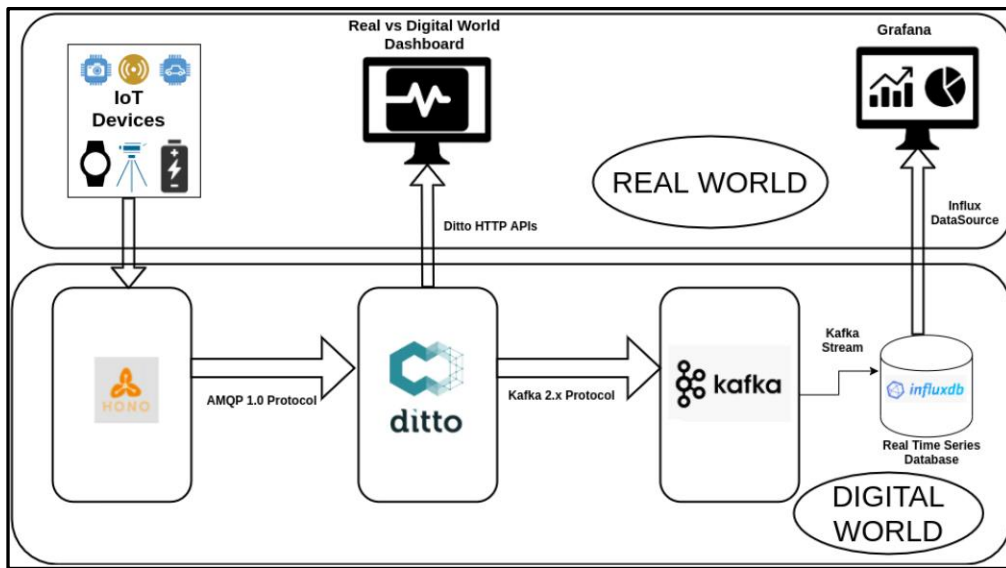
- **Περιγραφική ανάλυση δεδομένων - Descriptive data analysis:** Εφαρμόζει την οργάνωση και διαχείριση δεδομένων για την παροχή μιας σαφούς επισκόπησης της λειτουργικότητας της γραμμής παραγωγής.
- **Προγνωστική ανάλυση - Predictive analysis:** Πραγματοποιεί πρόβλεψη σφαλμάτων πριν από την εμφάνισή τους με την εφαρμογή ανάλυσης τεχνητής νοημοσύνης.
- **Συμβουλευτική ανάλυση - Prescriptive analysis:** Περιέχει προτάσεις λύσεων για οποιοδήποτε πιθανό σφάλμα

Διάφορες πλατφόρμες IoT παρουσιάζονται παρακάτω, με εφαρμογή στην έξυπνη βιομηχανία. Η έρευνα του Kamath εξέτασε τις ακόλουθες πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα [21]:

- [Eclipse Hono](#) [22] παρέχει διεπαφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση και την αλληλεπίδραση πολλών συσκευών IoT ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο επικοινωνίας τους.
- [Eclipse Ditto](#) [23] αφορά ένα πλαίσιο που υποστηρίζει την εφαρμογή προτύπων λογισμικού IoT ψηφιακών διδύμων.
- [Apache Kafka](#) [24] προτείνεται για εφαρμογές ροής σε πραγματικό χρόνο. Καταγράφει, αποθηκεύει και επεξεργάζεται τα ληφθέντα δεδομένα, επιτρέποντας την κατασκευή αγωγών δεδομένων «data pipelines».
- [Influx DB](#) [25] αποτελεί πλατφόρμα εύκολη σε εγκατάσταση και χρήση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση πολλαπλών τύπων δεδομένων για μια χρονική περίοδο.
- [Grafana](#) [26] παρέχει μοντέλα πηγών δεδομένων και υποστήριξη για πολλές βάσεις δεδομένων χρονοσειρών. Επιτρέπει επίσης στους χρήστες να οπτικοποιούν και να ενεργοποιούν ειδοποιήσεις βάσει μετρήσεων από πολλές αποθηκευμένες τοποθεσίες.

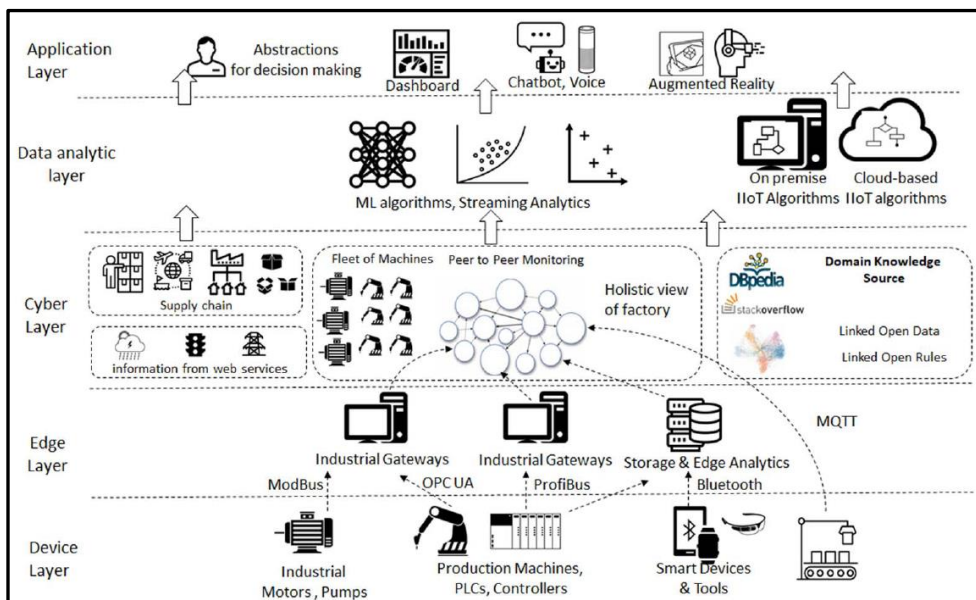
Συνδυάζοντας όλες τις προηγούμενες πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα, παρέχεται ένα καθολικό μοντέλο ψηφιακού διδύμου (digital twin), το οποίο μπορεί να εκμεταλλευτεί τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε πλατφόρμας. Το προτεινόμενο μοντέλο αυτού του έργου

απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.3**. Η κύρια πρόκληση αυτού του μοντέλου είναι η λειτουργία σε πραγματικό χρόνο για την επίτευξη προγνωστικής συντήρησης.



**Εικόνα 2.3** Εφαρμογή ψηφιακών διδύμων δομημένη από πλατφόρμες IoT ανοιχτού κώδικα [21]

Μια άλλη πλατφόρμα που ονομάζεται **SWoTI** παρουσιάζεται παρακάτω [27],[28]. Η πλατφόρμα αυτή αποτελείται από διαφορετικά επίπεδα. Καθένα από αυτά χρησιμοποιεί μια ποικιλία εργαλείων και τεχνικών για τη δημιουργία έξυπνων εφαρμογών που μπορούν να επεξεργαστούν πρωτογενή αισθητήρια δεδομένα. Η αρχιτεκτονική απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.4**.



**Εικόνα 2.4** Η δομή της πλατφόρμας SWoTI [27]

Η ροή ξεκινά με τη συλλογή δεδομένων. Τα δεδομένα εξάγονται από το επίπεδο της συσκευής (**Device Layer**), το οποίο περιέχει τις μηχανές παραγωγής, τα εργαλεία και γενικότερα τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε μια βιομηχανική διαδικασία παραγωγής. Έπειτα (στο **Edge Layer**) μετατρέπονται τα δεδομένα που συλλέγονται σε πληροφορίες χρησιμοποιώντας μεθόδους και τεχνικές αναλυτικών στοιχείων.

Το επόμενο επίπεδο (**Cyber Layer**) λειτουργεί ως συλλογικός κόμβος πληροφοριών, ο οποίος προετοιμάζει δεδομένα για το επίπεδο ανάλυσης δεδομένων. Αυτό το επίπεδο διαχειρίζεται μια τεράστια ποσότητα δεδομένων που συλλέγονται από τα διάφορα μέρη της βιομηχανίας (από τη διαδικασία παραγωγής έως την αλυσίδα εφοδιασμού) και βασίζεται σε τεχνολογία blockchain.

Ως blockchain θεωρείται ένα κατανεμημένο, αποκεντρωμένο και σταθερό σύστημα που διατηρεί τις πληροφορίες και τα δεδομένα των διαφόρων «συναλλαγών πληροφορίας» που ενδέχεται να προκύψουν σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο από άτομο σε άτομο [29].

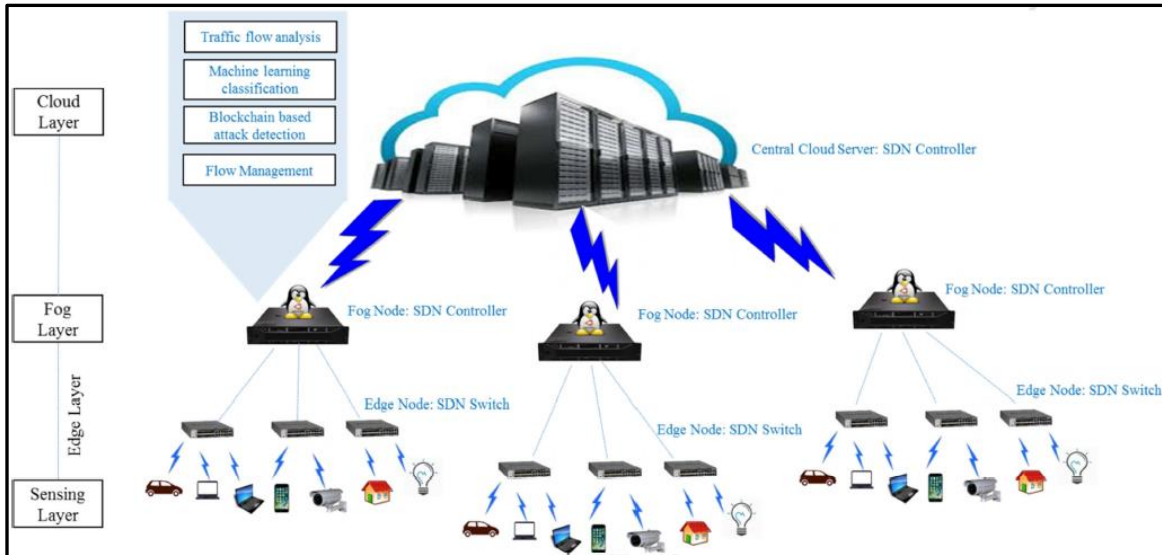
Το επόμενο επίπεδο που ακολουθεί (**Data-analytics Layer**) συσχετίζει τα συλλεγμένα δεδομένα μεταξύ τους εφαρμόζοντας αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, δίνοντας έτσι κατευθυντήριες γραμμές για τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων στο αρμόδιο προσωπικό της βιομηχανίας.

Τέλος ακολουθεί το στάδιο της εφαρμογής (**Application Layer**). Το στάδιο αυτό δημιουργεί προσαρμοσμένες εφαρμογές χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία προσεγγίσεων μηχανικής μάθησης, αξιοποιώντας τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από προηγούμενα επίπεδα. Αυτό το επίπεδο αφορά κυρίως την παρουσίαση και την οπτικοποίηση των κεκτημένων γνώσεων στους χρήστες του συστήματος.

Επιπλέον, παρουσιάζεται μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική ασφαλείας IoT με βάση την τεχνολογία blockchain και ονομάζεται **Block-Sec-IoT-Net**. [30]. Πρόκειται για ένα μοντέλο δικτύου, με βασικό ρόλο τον εντοπισμό κυβερνο-επιθέσεων σε δίκτυα IoT. Στην **Εικόνα 2.5** απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του. Αποτελείται από τα παρακάτω επίπεδα

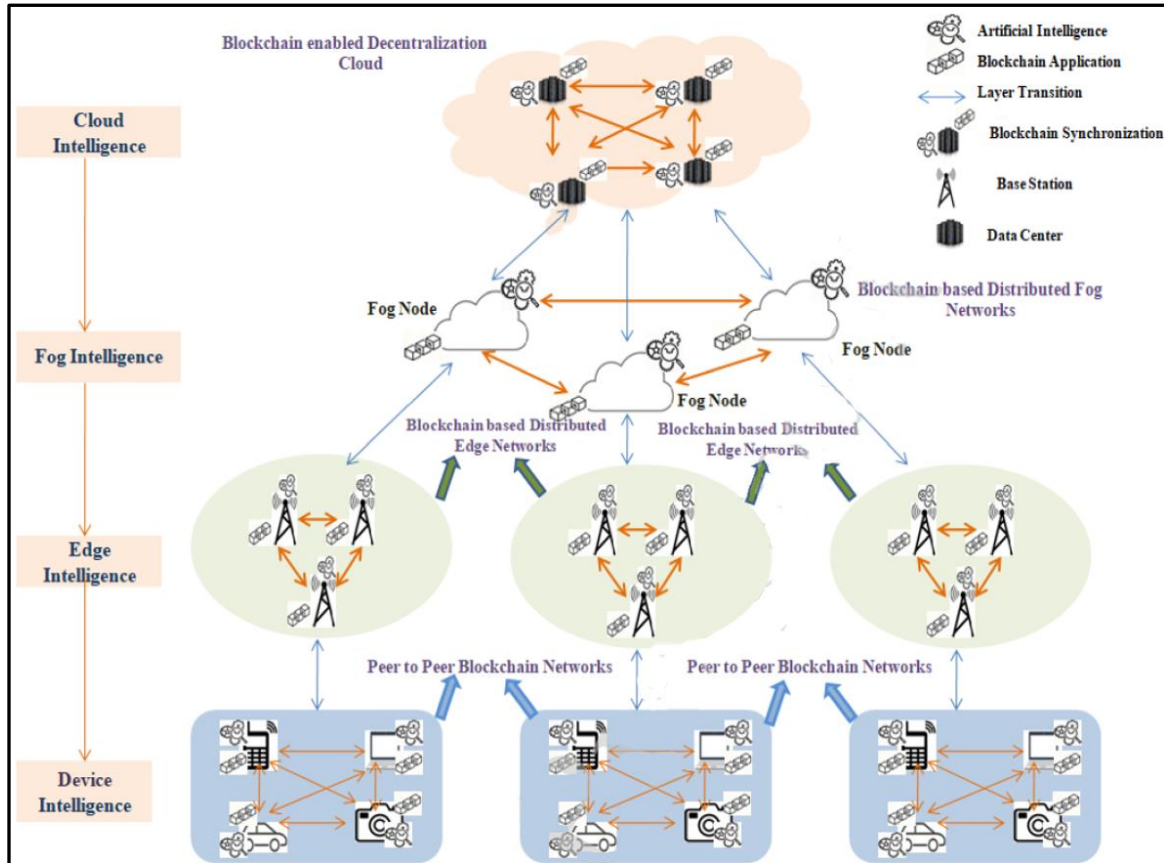
- **Sensing layer:** Σε αυτό το επίπεδο παράγεται μια μεγάλη ποσότητα δεδομένων που ανιχνεύονται από έξυπνες συσκευές και αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση διαφόρων περιβαλλόντων.
- **Edge layer:** Σε αυτό το επίπεδο καταλήγουν τα δεδομένα με σκοπό την ανάλυση και εξαγωγή πληροφοριών.

- **Fog layer:** Σε αυτό το επίπεδο υφίστανται επεξεργασία τα δεδομένα που προέκυψαν από το προηγούμενο επίπεδο, καθώς και συγκρίνονται με ιστορικά δεδομένα, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν ανωμαλίες.
- **Cloud layer:** Σε αυτό το επίπεδο γίνεται η ασφαλής αποθήκευση των τελικών δεδομένων.



Εικόνα 2.5 Αρχιτεκτονική του Block-Sec-IoT-Net [30]

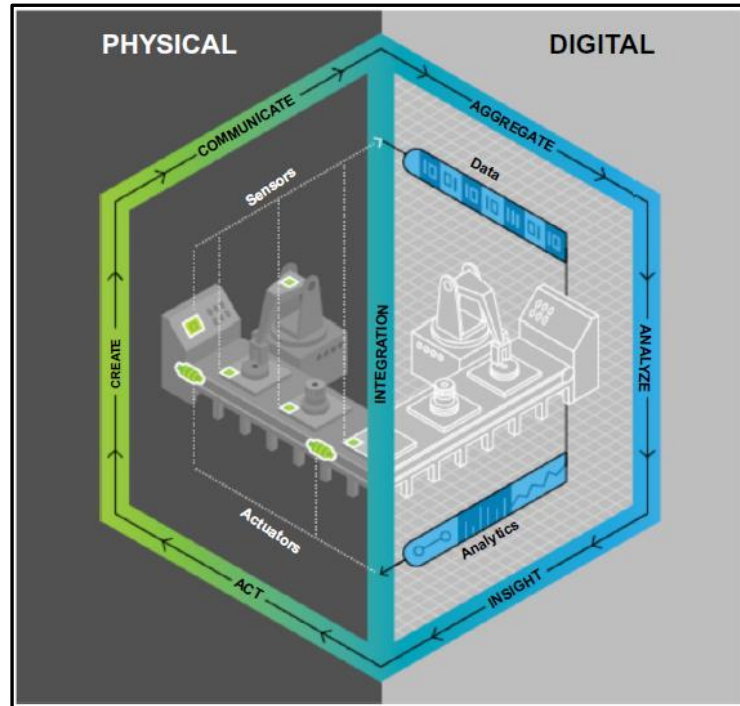
Έπειτα παρουσιάζεται μια ακόμη αρχιτεκτονική IoT με βάση την τεχνολογία blockchain και ονομάζεται **Block-IoT-Intelligence** [31]. Αυτό το έργο αφορά την ανάπτυξη ενός μοντέλου IoT ικανό να επεξεργάζεται και να αναλύει αποτελεσματικά μεγάλο όγκο δεδομένων (bigdata), βασισμένο στην τεχνολογία blockchain και στην τεχνητή νοημοσύνη. Όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 2.6*. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, όπως και στην προηγούμενη, η τεχνολογία blockchain χρησιμοποιείται ως ένας ασφαλής τρόπος επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μεταξύ των κέντρων δεδομένων, των επιμέρους κόμβων και των σταθμών βάσης δεδομένων. Ο αναμενόμενος σκοπός αυτού του μοντέλου είναι να παρέχει σε ασφαλείς εφαρμογές IoT στην ευφυή βιομηχανία.



Εικόνα 2.6 Αρχιτεκτονική του Block-IoT-Intelligence [31]

### 2.2.2. Εφαρμογές ψηφιακών διδύμων – Digital Twins (DT)

Τα ψηφιακά δίδυμα (DT) είναι εικονικά μοντέλα που προσομοιώνουν μια φυσική διαδικασία, υπηρεσία ή ένα σύστημα, πανομοιότυπα με το αντίστοιχο φυσικό σύστημα που το αναπαριστά. Τα πιο σημαντικά στοιχεία που περιλαμβάνουν ένα ψηφιακό δίδυμο (DT) και χαρακτηρίζουν τον πυρήνα του είναι το μοντέλο δομής, τα δεδομένα λειτουργίας, οι συνδέσεις, οι διαδρομές επικοινωνίας μεταξύ της εικονικής και φυσικής συσκευής και, τέλος, οι παρεχόμενες υπηρεσίες. Το ψηφιακό δίδυμο (DT) μιας διαδικασίας κατασκευής παρουσιάζεται στην *Εικόνα 2.7*.



Εικόνα 2.7 Μοντέλο κατασκευής ψηφιακού διδύμου [32]

Τα μοντέλα ψηφιακών διδύμων, παρουσιάζουν **τέσσερα είδη λειτουργιών**:

1. Μπορούν να αναπαραστήσουν τις πραγματικές ιδιότητες, συμπεριφορές και κανόνες του φυσικού αντικειμένου με υψηλή πιστότητα και έτσι να σχηματιστεί ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο που καταγράφει όλες τις αλλαγές του φυσικού αντικειμένου.
2. Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα στον εικονικό χώρο για να δημιουργήσουν μια σειρά από προσομοιωμένες συμπεριφορές, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως «ιδανικές συμπεριφορές» για την καθοδήγηση της λειτουργίας του φυσικού αντικειμένου που αναπαριστούν και ελέγχουν.
3. Έχουν την ικανότητα πρόβλεψης προβλημάτων του φυσικού αντικειμένου, ακόμη και πριν την εμφάνισή τους, με σκοπό την ανάπτυξη προληπτικών στρατηγικών ελέγχου.
4. Τα μοντέλα μπορούν να επικυρώσουν τις επιδόσεις ενός προϊόντος ή ενός συστήματος πριν ολοκληρωθούν και έτσι να υπάρχει πλήρης εικόνα της λειτουργικότητας των προϊόντων.

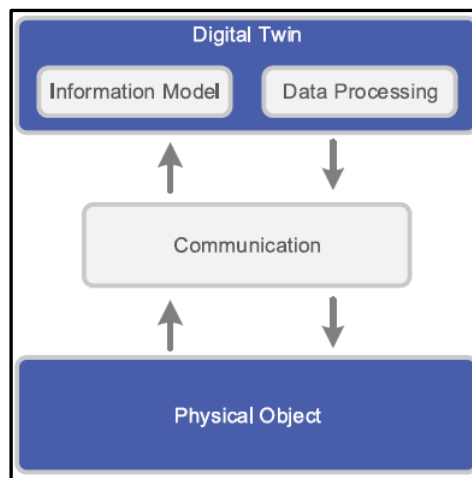
Η δομή ενός ψηφιακού διδύμου αποτελείται από **τρία βασικά μέρη**.

1. Το μοντέλο πληροφοριών που περιέχει τις προδιαγραφές του φυσικού αντικειμένου.



2. Το μηχανισμό επικοινωνίας μέσω του οποίου μεταφέρονται αμφίδρομα δεδομένα μεταξύ ψηφιακού και φυσικού αντικειμένου.
3. Τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, η οποία εξάγει πληροφορίες από τα συλλεγόμενα δεδομένα, με στόχο την ζωντανή αναπαράσταση του φυσικού αντικειμένου.

Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τη σωστή λειτουργία του ψηφιακού δίδυμου. Στη συνέχεια (*Εικόνα 2.8*) παρουσιάζεται το μοντέλο ενός ψηφιακού δίδυμου.



**Εικόνα 2.8** Δομή ενός ψηφιακού δίδυμου [33]

Σε κάθε φυσικό αντικείμενο αντιστοιχεί ένα προκαθορισμένο μοντέλο πληροφοριών που αντιπροσωπεύει τις προδιαγραφές του. Η επιλογή του κατάλληλου προτύπου καθορίζει το μοντέλο πληροφοριών για την περιγραφή των διαφόρων φυσικών αντικειμένων του τομέα παραγωγής. Η επικοινωνία και κατ' επέκτασιν ο μηχανισμός επικοινωνίας είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για τη λειτουργία των ψηφιακών δίδυμων. Ο συγχρονισμός μεταξύ ενός ψηφιακού δίδυμου και του αντίστοιχου αντικειμένου που αναπαριστά στον φυσικό χώρο βασίζεται στην αμφίδρομη επικοινωνία και στη μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Οι αλλαγές κατάστασης σε ένα φυσικό αντικείμενο ανιχνεύονται από αισθητήρες και μεταδίδονται στο ψηφιακό δίδυμο, που βρίσκεται στον κυβερνοχώρο. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο αποτελούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας βιομηχανικών εφαρμογών που μπορούν να βοηθήσουν στη συλλογή δεδομένων από τις φυσικές συσκευές.

Η αποτελεσματική επεξεργασία του μεγάλου όγκου δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από τον φυσικό χώρο είναι το πιο σημαντικό στοιχείο ενός ψηφιακού δίδυμου. Για την σωστή εξαγωγή πληροφοριών πρέπει να δοθεί έμφαση σε τρία βασικά χαρακτηριστικά, στο

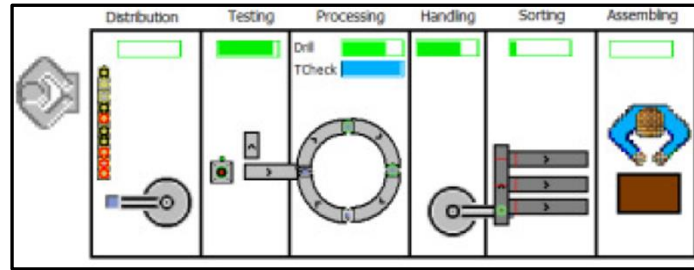
νόημα που κρύβεται στα δεδομένα, στην επικαιρότητα παροχής τους και στην υψηλή ποιότητα από την οποία πρέπει να χαρακτηρίζονται.

Το νόημα που κρύβεται στα δεδομένα πρέπει να στηρίζεται στη σωστή εξαγωγή πληροφοριών και όχι μόνο στην στατιστική ανάλυση των σχέσεων που έχουν τα χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Κατά τη διαδικασία ανάλυσης της έννοιας ενός χαρακτηριστικού, πρέπει να γίνεται συσχέτιση του με τα υπόλοιπα που βρίσκονται στον πραγματικό κόσμο, ούτως ώστε να φαίνεται η πραγματική επιρροή που έχει συνολικά η βιομηχανική διάταξη. Επιπρόσθετα, η ανάλυση βιομηχανικών δεδομένων απαιτεί την επεξεργασία τους με μικρή έως ελάχιστη καθυστέρηση, μιας και η έγκαιρη παροχή των δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία της παραγωγής. Τελευταίο και εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ποιότητα των δεδομένων, η οποία μερικές φορές είναι πιο σημαντική από τον όγκο της. Οι βιομηχανικές εφαρμογές διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων, απαιτούν δεδομένα υψηλής ποιότητας που καλύπτουν όλο το φάσμα του συστήματος ή της διαδικασίας που πρέπει να αναλυθεί. Ο θόρυβος των δεδομένων και η εσφαλμένη λήψη τους θα προκαλέσουν σφάλμα στην ανάλυση τους και θα οδηγήσουν σε λανθασμένα αποτελέσματα χειρισμού της βιομηχανικής διάταξης [33], [34].

Λαμβάνοντας υπόψη την αναφορά [35], οι κύριες τεχνολογίες και εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης που εφαρμόζονται σε ψηφιακά δίδυμα είναι κυρίως συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN), αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (RCNN), η μέθοδος των k-Πλησιέστερων Γειτόνων (k-Nearest Neighbor) και οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines - SVM).

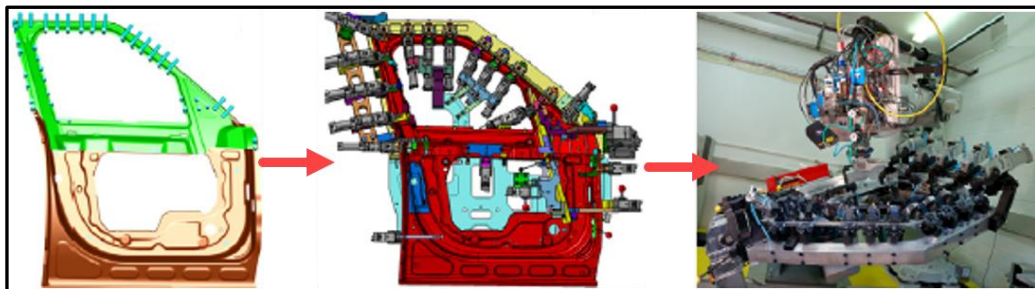
Διάφορα μοντέλα ψηφιακών διδύμων παρουσιάζονται παρακάτω, με εφαρμογή στην ευφυή βιομηχανία. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα **ψηφιακό δίδυμο για διάγνωση σφαλμάτων περιστροφικών μηχανημάτων (digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing)** [34] στην **Εικόνα 2.9**. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του περιστρεφόμενου συστήματος, συλλέγονται δεδομένα και στη συνέχεια τροφοδοτούνται στο ψηφιακό δίδυμο, για την ανίχνευση τυχόν σφαλμάτων. Σε αυτό το πλαίσιο διάγνωσης εφαρμόζονται τεχνικές μηχανικής μάθησης σε συνδυασμό με τεχνικές προσομοίωσης (Multiphysics simulation). Αυτή η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σφάλμα διάγνωσης αυτού του πιλοτικού πρωτοτύπου ψηφιακού διδύμου μπορεί να περιοριστεί σε περίπου 5%, καθιστώντας δυνατή τη διάγνωση της επιπλοκής του ρότορα και την πρόβλεψη της εξέλιξής του, σε περίπτωση που δεν επιδιορθωθεί. Ωστόσο





Εικόνα 2.10 Μοντέλο προσομοίωσης ψηφιακού διδύμου βιομηχανικής γραμμής παραγωγής [36]

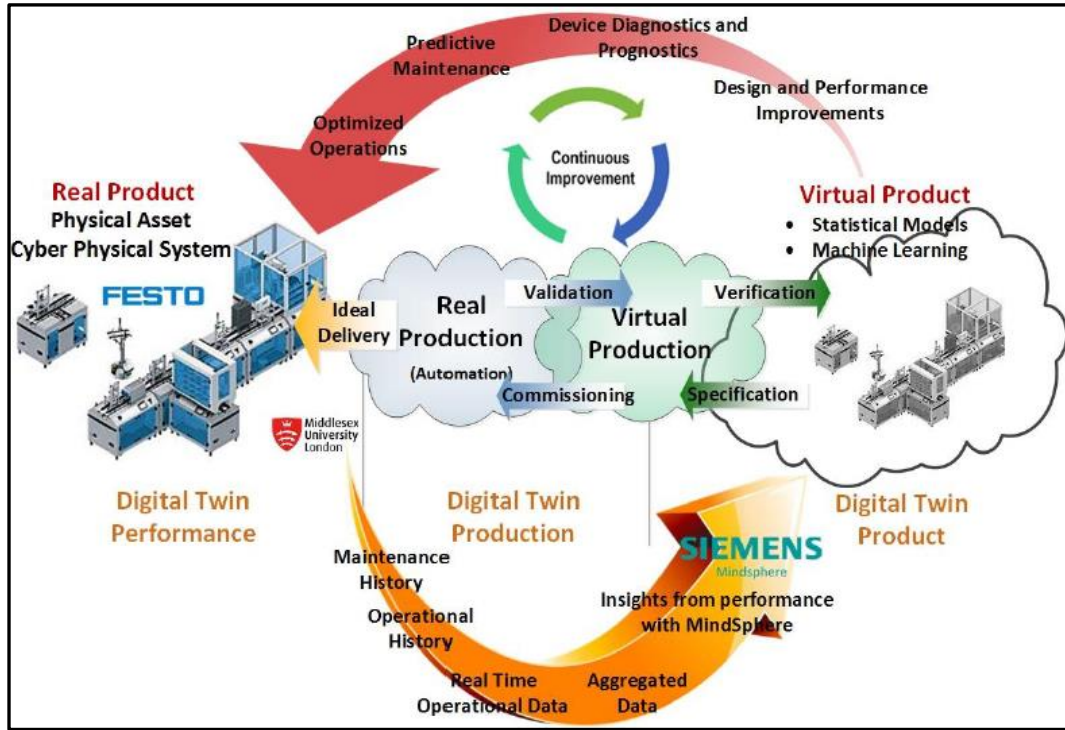
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα **ψηφιακό δίδυμο βαθιάς μάθησης με σκοπό την απομακρυσμένη συγκόλληση με λέιζερ δομών αλουμινίου (deep learning enhanced digital twin for remote laser welding of aluminum structures)** [37]. Αυτό το έργο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη συστημάτων συναρμολόγησης αλουμινίου (Εικόνα 2.11) χρησιμοποιώντας μια ψηφιακά αναπτυγμένη διαδικασία συγκόλλησης με λέιζερ. Πρόκειται για ένα μοντέλο ψηφιακού διδύμου βασισμένο στη βαθιά μάθηση, που επικεντρώνεται στη βελτίωση της ποιότητας συναρμολόγησης, προσομοιώνοντας όλα τα γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος. Για την ανάπτυξη του συστήματος συναρμολόγησης εφαρμόζεται μια διαδικασία κλειστού βρόχου (closed-looped-in-process - CLIP), όπου συνδυάζονται τεχνικές ανάλυσης και προσομοίωσης με στόχο τη βέλτιστη επίτευξη συγκόλλησης σημειώνοντας ποσοστό επιτυχίας πάνω από 96%.



Εικόνα 2.11 Απεικόνιση διαδικασίας συγκόλλησης κατασκευών αλουμινίου με λέιζερ.[37]

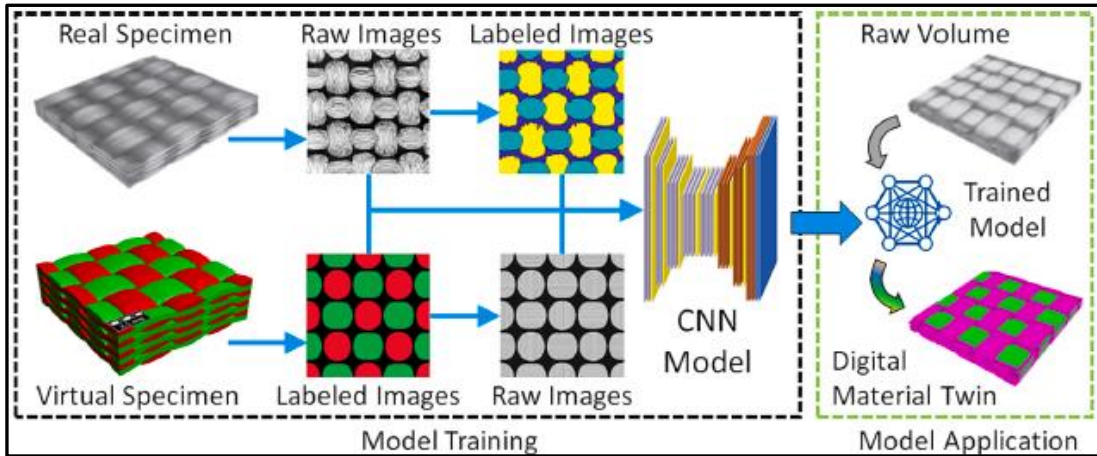
Η επόμενη μελέτη αντιπροσωπεύει ένα **ψηφιακό δίδυμο εστιασμένο σε συστήματα παραγωγής επόμενης γενιάς (digital twin framework targeting next generation manufacturing)** [38]. Ο σκοπός αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη ενός ψηφιακού αντιγράφου, το οποίο αντιπροσωπεύει μια γραμμή συναρμολόγησης προϊόντων. Το πλαίσιο ανάπτυξης αυτού του κυβερνο-φυσικού εργοστασίου (cyber-physical factory) υποστηρίζεται από τους Festo και Siemens, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Αυτό το σύστημα είναι σε θέση να διαγνώσει αστοχίες, στην παραγωγή και να εφαρμόσει

προγνωστική συντήρηση. Η εφαρμογή αυτή έχει υλοποιηθεί σε εργαστηριακό περιβάλλον και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να μεταφερθεί στο περιβάλλον μιας βιομηχανίας.



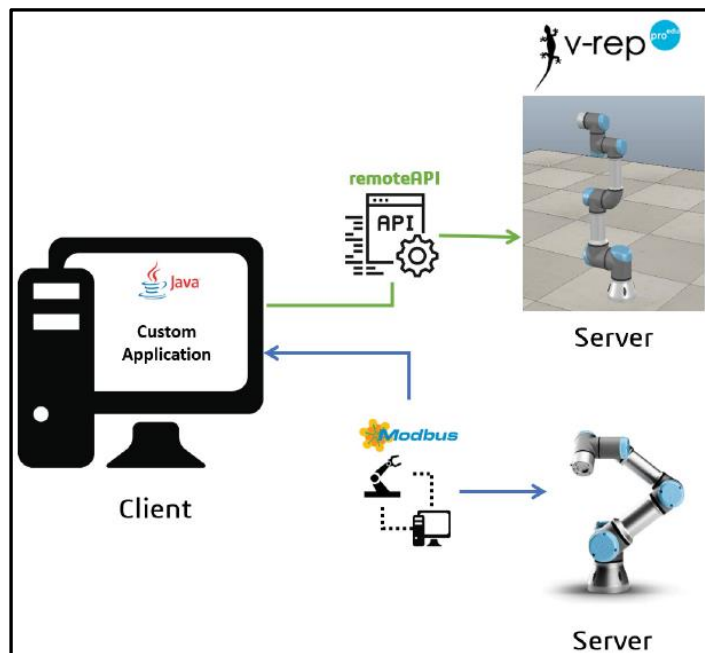
Εικόνα 2.12 Ψηφιακό δίδυμο κυβερνο-φυσικού εργοστασίου [38]

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια εφαρμογή δημιουργίας ψηφιακών διδύμων υλικών από ινώδεις ενισχύσεις (**deep learning based semantic segmentation of  $\mu$ CT images for creating digital material twins of fibrous reinforcements**) [39]. Σε αυτό το έργο διερευνάται η επεξεργασία τμηματοποίησης εικόνων ινωδών υλικών ( $\mu$ CT image segmentation), με στόχο τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων που αναπαριστούν τη δομή τους. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.13**. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται σε βαθιά μάθηση ενώ εφαρμόζονται, ένα συνελκτικό νευρικό δίκτυο (Deep Convolutional Neural Network - DCNN) και ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης. Και τα δύο συστήματα εφάρμοσαν με επιτυχία την τμηματοποίηση, ωστόσο η προσέγγιση βαθιάς μάθησης φάνηκε να έχει πιο ακριβείς και γρηγορότερες προβλέψεις σε σύγκριση με την προσέγγιση μηχανικής μάθησης.



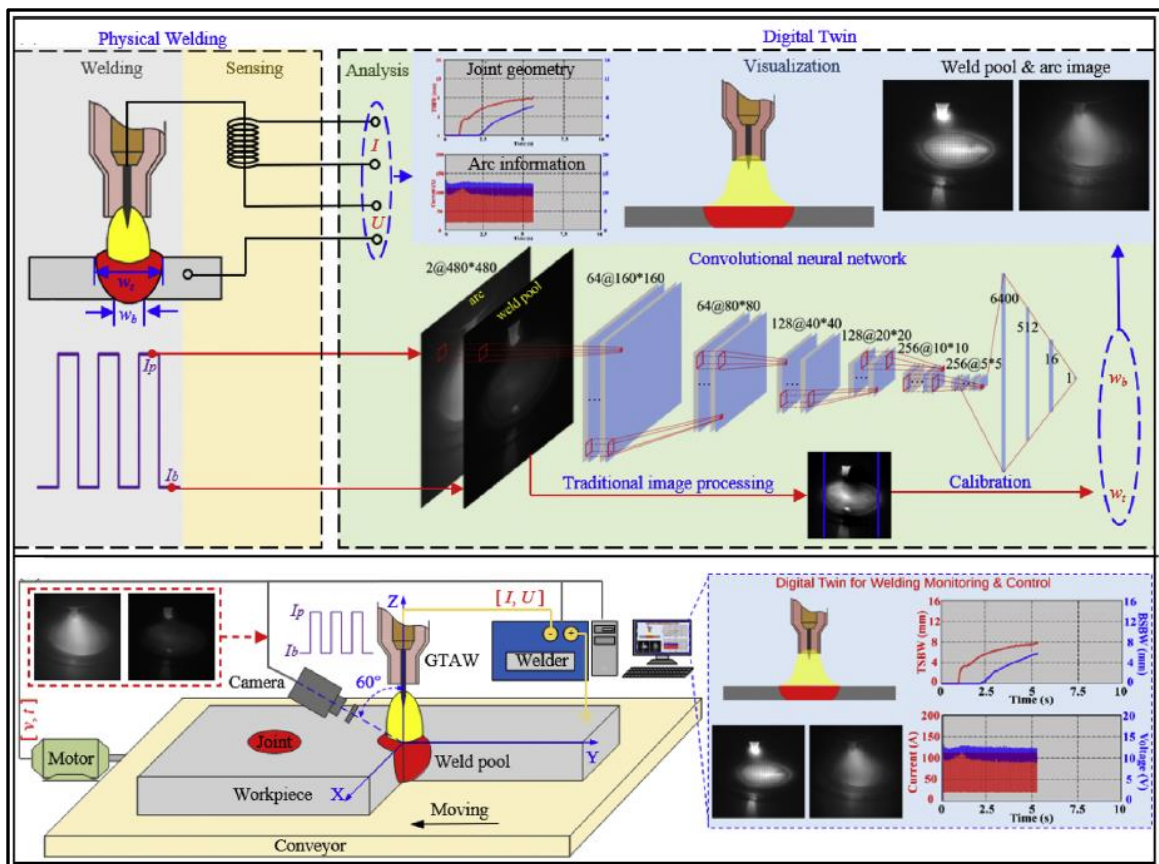
**Εικόνα 2.13** Μοντέλο ψηφιακού διδύμου που αναπαριστούν τη δομή ινωδών υλικών [39]

Η επόμενη μελέτη αφορά το **ψηφιακό δίδυμο ενός συνεργατικού ρομπότ UR3 (virtualized digital twin of a UR3 collaborative robot)** [35]. Η αρχιτεκτονική αυτού του μοντέλου παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.14**. Για την αναπαράσταση αυτού του έργου χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα προσομοίωσης V-REP σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus και το remoteAPI, σε γραφικό περιβάλλον JAVA. Αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη διασύνδεση του φυσικού και εικονικού περιβάλλοντος, καθώς και για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Αυτό το έργο χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και ανάπτυξη από την πλευρά της λήψης αποφάσεων που ελέγχει το εικονικό ρομπότ, καθώς και το σύστημα βελτιστοποίησης και παρακολούθησης.



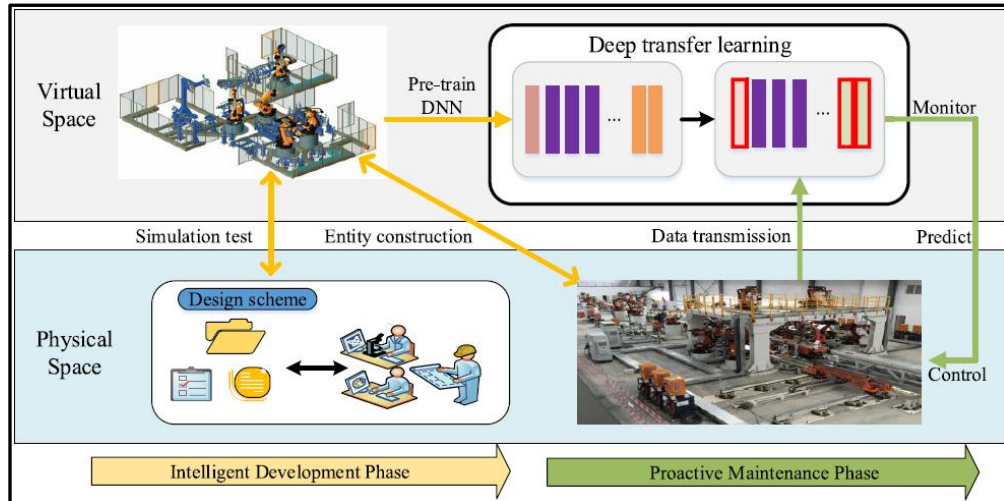
**Εικόνα 2.14** Μοντέλο ψηφιακού διδύμου ενός συνεργατικού ρομπότ UR3[35]

Έπειτα περιγράφεται ένα ψηφιακό δίδυμο βαθιάς μάθησης για την παρακολούθηση της ποιότητας συγκόλλησης (deep learning-empowered digital twin for visualized weld joint growth monitoring and penetration control) [40]. Όπως απεικονίζεται και στην *Εικόνα 2.15*, αυτό το ψηφιακό δίδυμο συλλέγει εικόνες κρίσιμων σταδίων της διαδικασίας συγκόλλησης, τις οποίες τροφοδοτεί σε ένα συνελκτικό νευρικό δίκτυο (Deep Convolutional Neural Network). Εκεί πραγματοποιείται η επεξεργασία εικόνας και η εξαγωγή χαρακτηριστικών της, με σκοπό την πρόβλεψη της γεωμετρίας, της ποιότητας και άλλων τεχνικών χαρακτηριστικών της κόλλησης.



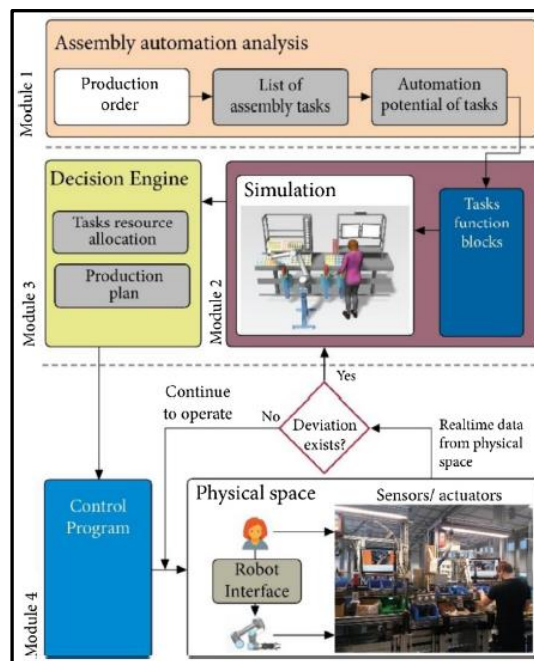
**Εικόνα 2.15** Μοντέλο ψηφιακού διδύμου παρακολούθησης της διαδικασίας συγκόλλησης [40]

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται ένα ψηφιακό δίδυμο για διάγνωση σφαλμάτων με χρήση βαθιάς μάθησης (digital twin for assisted fault diagnosis using deep transfer learning) [41]. Το προτεινόμενο σύστημα είναι σε θέση να διαγνώσει σφάλματα σε δύο φάσεις της παραγωγής, εφαρμόζοντας ένα νευρωνικό δίκτυο βαθιάς μάθησης (Deep Neural Network - DNN). Το πρώτο στάδιο είναι κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης προϊόντων και το δεύτερο κατά τη φάση προληπτικής συντήρησης. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου αυτού απεικονίζεται στην *Εικόνα 2.16*.



**Εικόνα 2.16** Μοντέλο ψηφιακού διδύμου διάγνωσης σφαλμάτων δύο φάσεων της παραγωγής [41]

Ένα ψηφιακό δίδυμο ρομποτικής διάταξης για υποβοήθηση της διαδικασίας συναρμολόγησης (**digital twin driven human-robot collaborative in assembly**) παρουσιάζεται στη συνέχεια [42]. Το σύστημα αυτό απεικονίζεται στην *Εικόνα 2.17*, και αποτελείται από τέσσερα μέρη, (i) ένα τμήμα αυτοματοποιημένης υναρμολόγησης (assembly automation analysis section), (ii) ένα σύστημα προσομοίωσης (a simulation system), (iii) ένα σύστημα λήψης αποφάσεων (a decision-making system) και (iv) το τμήμα ελέγχου για τον χειριστή και το ρομπότ (the control section for the operator and the robot). Χρησιμοποιώντας προσομοίωση σε συνδυασμό με τεχνικές βαθιάς μάθησης, αυτή η εφαρμογή προσομοιάζει τη φάση σχεδιασμού κατά τη διάρκεια της παραγωγής.



**Εικόνα 2.17** Ψηφιακό δίδυμο ρομποτικής διάταξης διαδικασίας συναρμολόγησης [42]



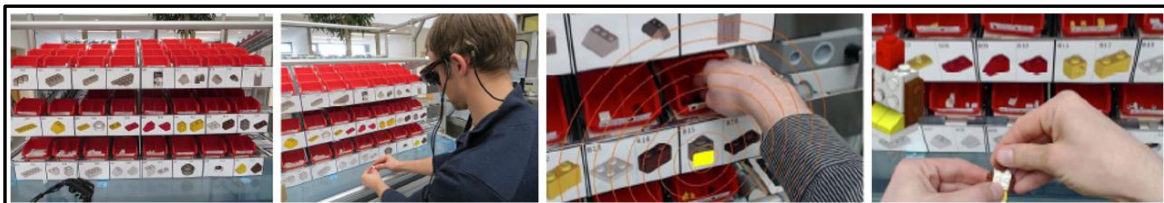
### 2.2.3. Εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας – *Augmented Reality (AR)*

Η εφαρμογή της επαυξημένης πραγματικότητας στον τομέα της βιομηχανίας συνεισφέρει σημαντικά στη βιομηχανία, από το σχεδιασμό προϊόντων μέχρι την ανάπτυξη της παραγωγής. Έτσι προσδιορίζονται ορισμένοι από τους βασικότερους τομείς εφαρμογής της [43], [44]:

- **Δημιουργία χρήσιμων διεπαφών αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου-ρομπότ (Human – Robot collaboration interface).** Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση φέρνει νέες τεχνολογικές προκλήσεις. Η ικανότητα των βιομηχανικών ρομπότ αυξάνεται σημαντικά, μαζί με την προσδοκία ισχυρότερης συνεργατικής αλληλεπίδρασης με το ανθρώπινο δυναμικό. Για να δημιουργηθεί ένα σύστημα στο οποίο τα ρομπότ μπορούν να λειτουργούν παράλληλα με τον άνθρωπο, πρέπει να αναπτυχθούν νέες διεπαφές, βασισμένες στην επαυξημένη πραγματικότητα, που να επιτρέπουν στους χρήστες να αλληλοεπιδράσουν μαζί τους με τον πιο φυσικό τρόπο.
- **Βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης, συναρμολόγησης και επισκευής (Maintenance – Assembly – Repair).** Οι εργασίες συντήρησης, επισκευής και συναρμολόγησης αποτελούν άλλο ένα ερευνητικό πεδίο εφαρμογής της επαυξημένης πραγματικότητας στο χώρο της βιομηχανίας, με βασικό στόχο τη μείωση του κόστους. Οι ανεπτυγμένες εφαρμογές για συντήρηση και επισκευή αποτελούνται από ένα σύνολο εικονικών στοιχείων που παρέχουν ενδείξεις, βοηθήματα ή προτάσεις στους τεχνικούς. Επιπρόσθετα μπορεί να συνοδεύονται από ηχητικές οδηγίες, ετικέτες κειμένου, κινούμενα 3D μοντέλα που περιγράφουν οπτικά και λεπτομερώς τις εργασίες που θα πρέπει να γίνουν από το προσωπικό. Άλλο παράδειγμα της επαυξημένης πραγματικότητας στο χώρο της βιομηχανίας αποτελούν οι εφαρμογές τηλεπαρουσίας, μέσω των οποίων πραγματοποιείται απομακρυσμένος έλεγχος από εξειδικευμένο έμπειρο τεχνικό που καθοδηγεί τους υπόλοιπους συντηρητές εξ αποστάσεως.
- **Εκπαίδευση του προσωπικού (Training).** Η χρήση της τεχνολογίας αυτής για εκπαιδευτικούς σκοπούς σχετίζεται αυστηρά με εργασίες συντήρησης, συναρμολόγησης και επισκευής, καθώς είναι συνήθως το αντικείμενο της μάθησης για έναν χρήστη από τον τομέα της βιομηχανίας. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση επικίνδυνων εργασιών χωρίς να κινδυνεύει το ανθρώπινο προσωπικό.

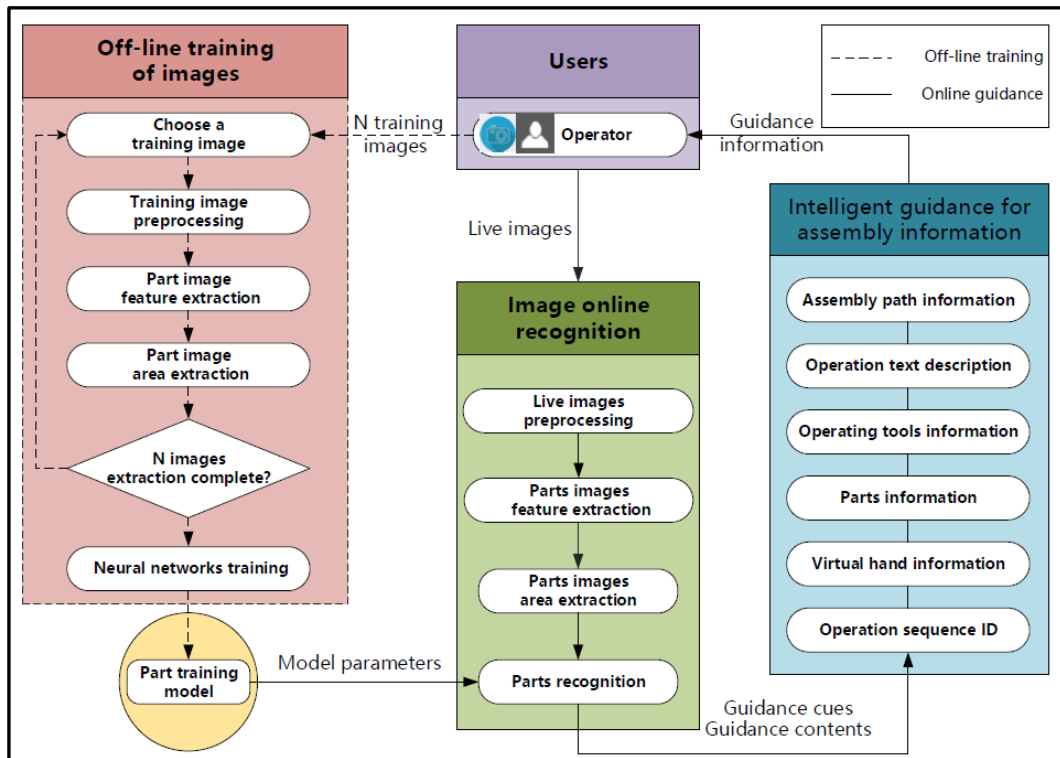
- **Έλεγχος ποιότητας προϊόντων (Product Control Quality).** Η δημιουργία ενός προϊόντος είναι μια πολύπλοκη διεργασία, η οποία πρέπει να ολοκληρωθεί όσο το δυνατόν πιο γρήγορα, με ακρίβεια και δίνοντας πάντα ένα ποιοτικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό πρέπει να γίνεται επιθεώρηση (inspection) σε όλα τα στάδια της παραγωγής του. Δεδομένου ότι η ποικιλία των προϊόντων μιας βιομηχανίας αυξάνεται, η επιθεώρηση γίνεται πιο περίπλοκη. Ωστόσο με τη χρήση της επαυξημένης πραγματικότητας η διαδικασία επιθεώρησης επιτυγχάνεται ευκολότερα, μιας και μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση, κατά την παραγωγική διαδικασία, μεταξύ του πραγματικού αντικειμένου και του ιδανικού προτύπου, το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω τρισδιάστατης απεικόνισης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως έλεγχος ασυμφωνίας (discrepancy check).

Όπως αναφέρθηκε, η βιομηχανική επαυξημένη πραγματικότητα έχει πολλές εφαρμογές. Η υποστήριξη των εργαζομένων σε κατασκευαστικές εργασίες μέσω οπτικοποιημένης καθοδήγησης είναι μία από αυτές (**Supporting workers to manufacturing tasks via visualization AR guidance**) Σε αυτήν την εφαρμογή, οι κύριες εργασίες κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης είναι η επιλογή των εξαρτημάτων και η συναρμολόγηση του προϊόντος. Για αυτές τις εργασίες μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές τεχνικές οπτικοποίησης, ανάλογα με την εργασία του χρήστη, το περιβάλλον και τις δυνατότητες του υλικού. Στην παρούσα εφαρμογή *Εικόνα 2.18*, οι πληροφορίες που βασίζονται στην εικόνα του χώρου εργασίας χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του χρήστη, που παρέχεται από ειδικά διαμορφωμένα διαφανή δίοπτρα τα [Vuzix STAR 1200](#). Η λειτουργία του έργου αυτού περιγράφεται ως εξής: Όταν ένα μέρος φτάνει στο σταθμό συναρμολόγησης, διαβάζονται οι πληροφορίες από τη μνήμη ψηφιακού προϊόντος και παρέχονται οδηγίες σχετικά με την κατάλληλη ακολουθία συναρμολόγησης χρησιμοποιώντας γραφικά απεικόνισης στους εργαζόμενους.



**Εικόνα 2.18** Εφαρμογή δίοπτρων AR κατά το στάδιο συναρμολόγησης [45]

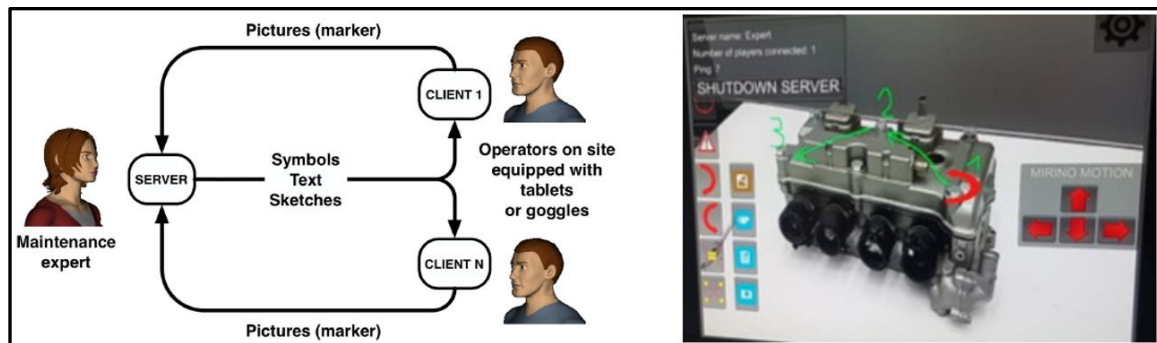
Επιπρόσθετα παρουσιάζεται μια **αυτόματη μέθοδος αλληλεπίδρασης που παρέχει οδηγίες συναρμολόγησης, εφαρμόζοντας επαυξημένη πραγματικότητα (automatic interaction method using part recognition based on deep network for augmented reality assembly guidance)** [46]. Αυτή η εφαρμογή στοχεύει στην ενίσχυση της ακρίβειας κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης στη γραμμή παραγωγής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο «Faster-R-CNN». Η διάταξη της εφαρμογής αυτής φαίνεται στην **Εικόνα 2.19**. Εικόνες καταγράφονται κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης και έπειτα μεταδίδονται στη μονάδα αναγνώρισης εικόνας, όπου ταξινομούνται. Μετά από αυτό, τα αποτελέσματα της ταξινόμησης τροφοδοτούνται σε μια μονάδα πληροφοριών καθοδήγησης, η οποία τελικά καθοδηγεί κατάλληλα τον χειριστή, μέσω των δίοπτρων AR. Το ποσοστό επιτυχίας καθοδήγησης αυτής της εφαρμογής φτάνει το 94% με μέση ταχύτητα αναγνώρισης 0,2sec / καρτέ.



**Εικόνα 2.19** Αρχιτεκτονική συστήματος AR καθοδήγησης γραμμής συναρμολόγησης [46]

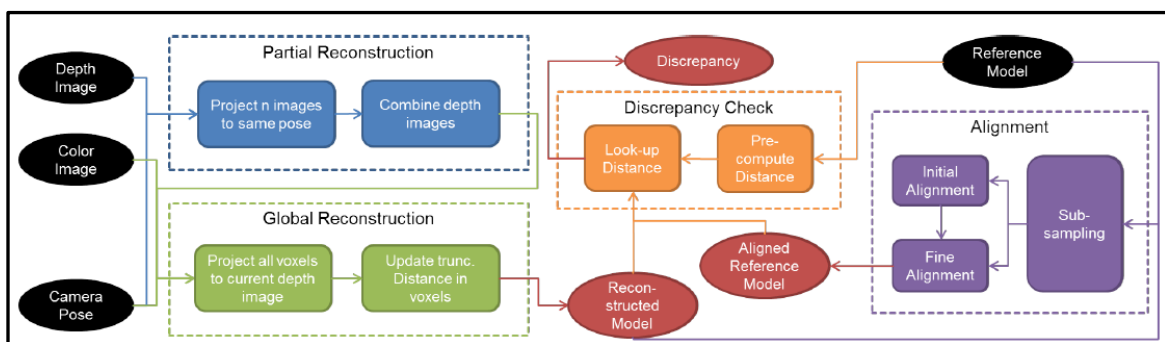
Μια λύση **υποστήριξης απομακρυσμένης συντήρησης μέσω επαυξημένης πραγματικότητας (remote maintenance supporting through augmented reality)** παρουσιάζεται στη συνέχεια [47], καθώς και ένα παράδειγμα **απομακρυσμένης ζωντανής υποστήριξης (example for remote live support for workers via AR based on edge computing)**[48]. Η ιδέα της αρχιτεκτονικής αυτής βασίζεται στην απομακρυσμένη σύνδεση

ενός έμπειρου χειριστή που βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου (server), με έναν χειριστή (client) στην περιοχή συντήρησης. Φωτογραφίες από το σημείο συντήρησης αποστέλλονται (*Εικόνα 2.20*) και μέσω ενός tablet, οι απεικονίζονται οι εικόνες. Με τη χρήση δεικτών και συμβόλων, ο έμπειρος χειριστής καθοδηγεί τον άπειρο χειριστή. Αυτή η εφαρμογή υλοποιείται σε περιβάλλον [Unity3D 4.3.4](#) και με τη χρήση αλγορίθμων Vuforia, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του πραγματικού περιβάλλοντος και επιτρέπουν την υπέρθεση ψηφιακών πληροφοριών στην «πραγματικότητα». Αυτή η εφαρμογή έχει εφαρμοστεί και δοκιμαστεί σε εργαστηριακό περιβάλλον. Φαίνεται να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για απομακρυσμένη συντήρηση, καθώς τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι λειτουργεί σωστά και μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στο χώρο της βιομηχανίας.



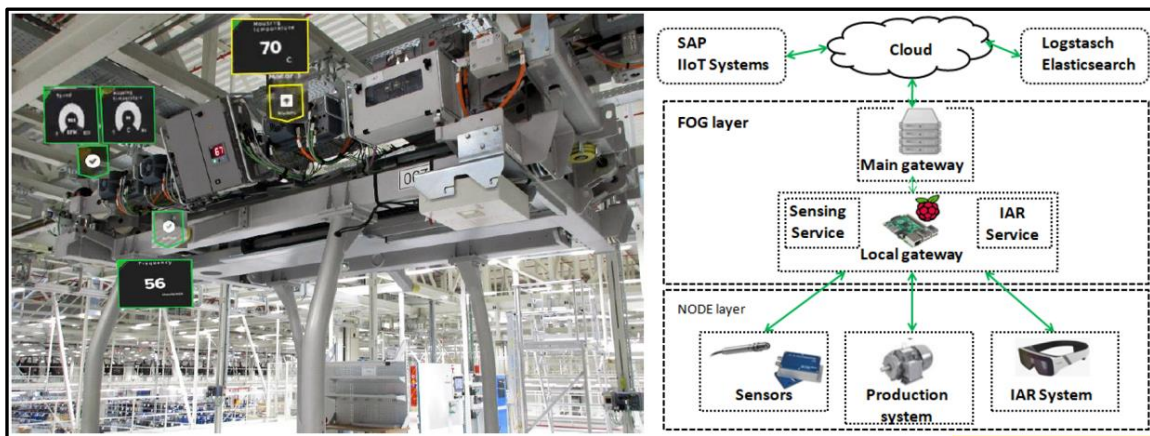
**Εικόνα 2.20** Αρχιτεκτονική συστήματος AR για απομακρυσμένη συντήρηση [47]

Επιπλέον παρουσιάζεται μια εφαρμογή **ελέγχου βλαβών σε βιομηχανικές εφαρμογές με χρήση επαυξημένης πραγματικότητας (augmented reality 3D discrepancy check in industrial applications)** [49]. Η διαδικασία ελέγχου πραγματοποιείται μέσω μιας κάμερας RGB-D ([Microsoft Kinetic v2](#)), που καταγράφει το βιομηχανικό περιβάλλον. Έπειτα εφαρμόζονται διάφορες αλγοριθμικές προσεγγίσεις, με σκοπό τον τελικό έλεγχο για βλάβες. Η αρχιτεκτονική αυτού του μοντέλου απεικονίζεται στην *Εικόνα 2.21*.



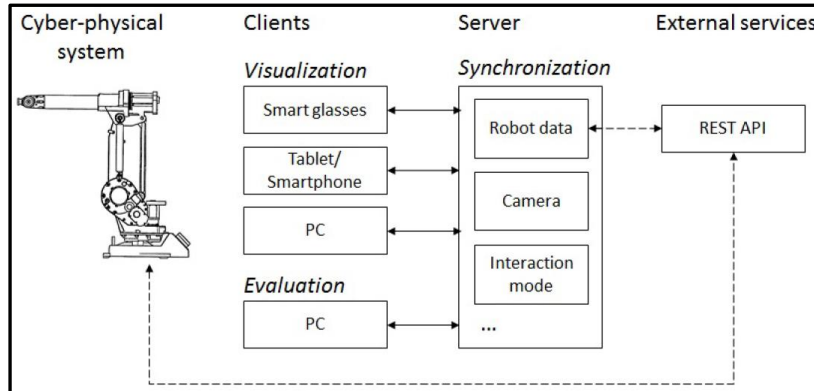
**Εικόνα 2.21** Μοντέλο AR ελέγχου ασυμφωνίας βιομηχανικών εφαρμογών [49]

Ένας άλλος κρίσιμος τομέας βιομηχανικού ενδιαφέροντος είναι ο **ευφυής έλεγχος για προγνωστική συντήρηση με τη χρήση επαυξημένης πραγματικότητας (intelligent predictive maintenance control using augmented reality)** [50]. Η έρευνα αυτή επικεντρώνεται στην υποστήριξη των εργαζομένων κατά τη διάρκεια της συντήρησης σε πραγματικό χρόνο, μέσω έξυπνων δίοπτρων AR. Ο κύριος στόχος αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη ενός ελέγχου διεργασιών σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να οπτικοποιηθούν τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες στο οπτικό πεδίο του τεχνικού. Οι κρίσιμες τιμές από το πεδίο των αισθητήρων επισημαίνονται με ενδείξεις και ειδοποιήσεις στο οπτικό περιβάλλον, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.22*.



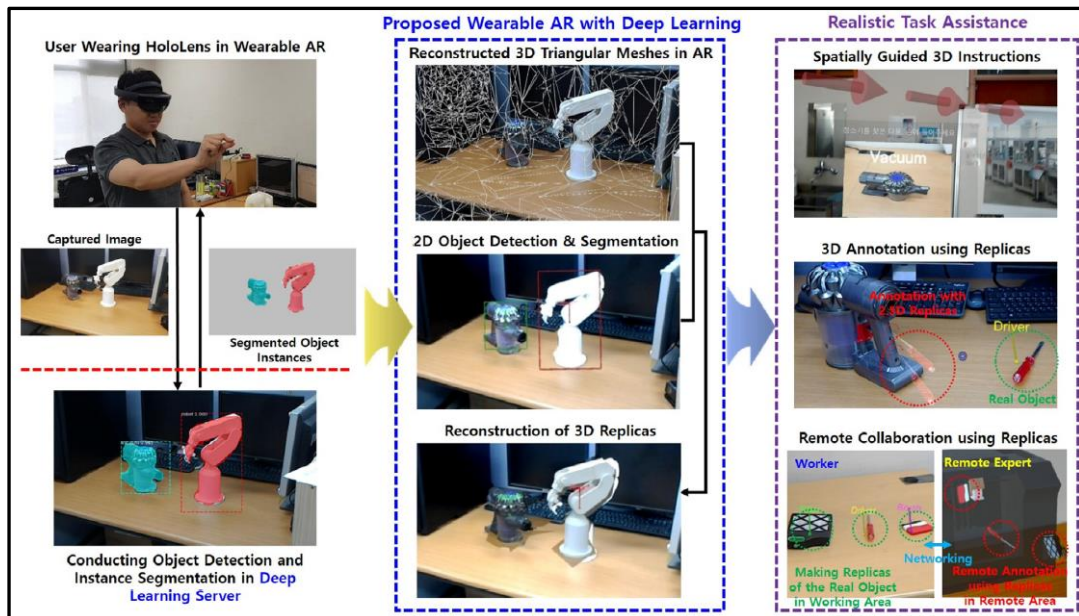
**Εικόνα 2.22** Αναπαράσταση σε πραγματικό χρόνο των σφαλμάτων μέσω επαυξημένης πραγματικότητας [50]

Μια πειραματική έρευνα επαυξημένης πραγματικότητας με βιομηχανικά ρομπότ (**augmented reality experimental survey with Industrial robots in Industry 4.0 environment**) εξετάζεται στη συνέχεια [51]. Αυτή η μελέτη αντιπροσωπεύει μια εφαρμογή AR, η οποία στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ρομποτικού εργαλείου που θα βοηθάει τους εργαζόμενους στη γραμμή συναρμολόγησης. Οι εργαζόμενοι μπορούν να χειριστούν αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιώντας ευφυή δίοπτρα είτε μέσω κάποιου απτικού περιβάλλοντος (πχ μέσω smartphone). Η αρχιτεκτονική αυτής της εφαρμογής (*Εικόνα 2.23*) περιλαμβάνει τρία επίπεδα. Ο χρησιμοποιημένος εξοπλισμός αντιπροσωπεύει το πρώτο επίπεδο. Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από έναν διακομιστή (server) που παρέχει συγχρονισμένα δεδομένα μεταξύ των εργαζομένων (clients) και επικοινωνεί με το τρίτο επίπεδο, το οποίο αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές πηγές δεδομένων (external services) του κυβερνο-φυσικού συστήματος της ρομποτικής διάταξης (cyber-physical system).



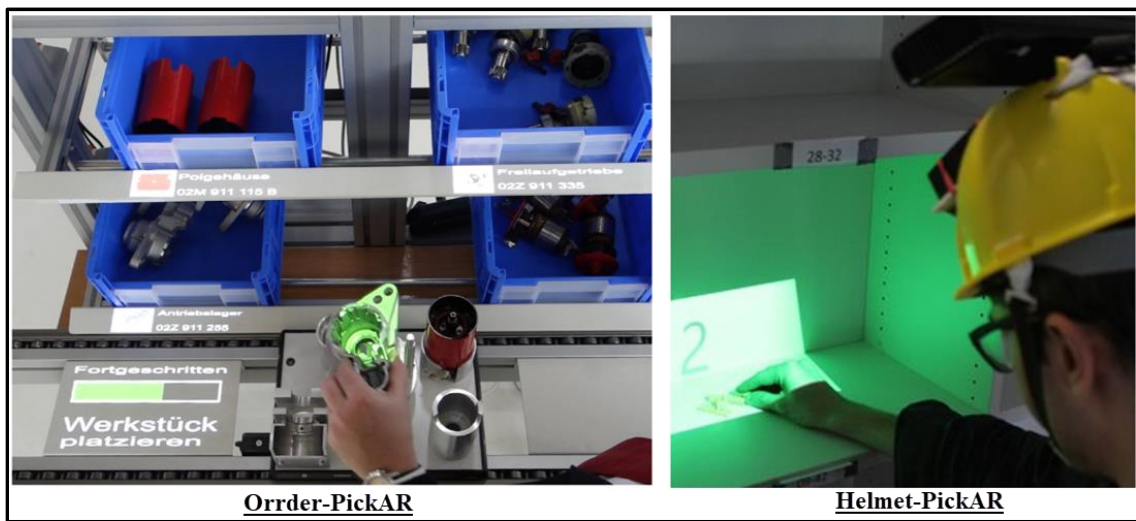
Εικόνα 2.23 Αρχιτεκτονική εφαρμογής AR σε βιομηχανικό ρομπότ [51]

Η επόμενη εφαρμογή αφορά μια **ευφυή βοηθητική διάταξη παραγωγής, βασισμένη σε επαυξημένη πραγματικότητα (deep learning-based smart task assistance in wearable augmented reality)** [52]. Αυτή η μελέτη αφορά ένα έξυπνο σύστημα καθοδήγησης των εργαζομένων που επικεντρώνεται στην ανίχνευση αντικειμένων, βοηθώντας τους σε εργασίες κατασκευής (Εικόνα 2.24). Βασισμένη σε τεχνικές βαθιάς μάθησης, αυτή η διάταξη πραγματοποιεί τμηματοποίηση εικόνων για να εντοπίσει αντικείμενα μέσα από αυτές. Αυτό γίνεται μέσω ενός νευρωνικού δικτύου «Mask R-CNN». Έπειτα είναι σε θέση να καθοδηγήσει τον εργαζόμενο ώστε να επιλέξει το κατάλληλο εργαλείο, ή εξάρτημα που χρειάζεται για να γίνει σωστά η διαδικασία κατασκευής.



Εικόνα 2.24 Ευφυής βοηθητική διάταξη παραγωγής, βασισμένη σε AR [52]

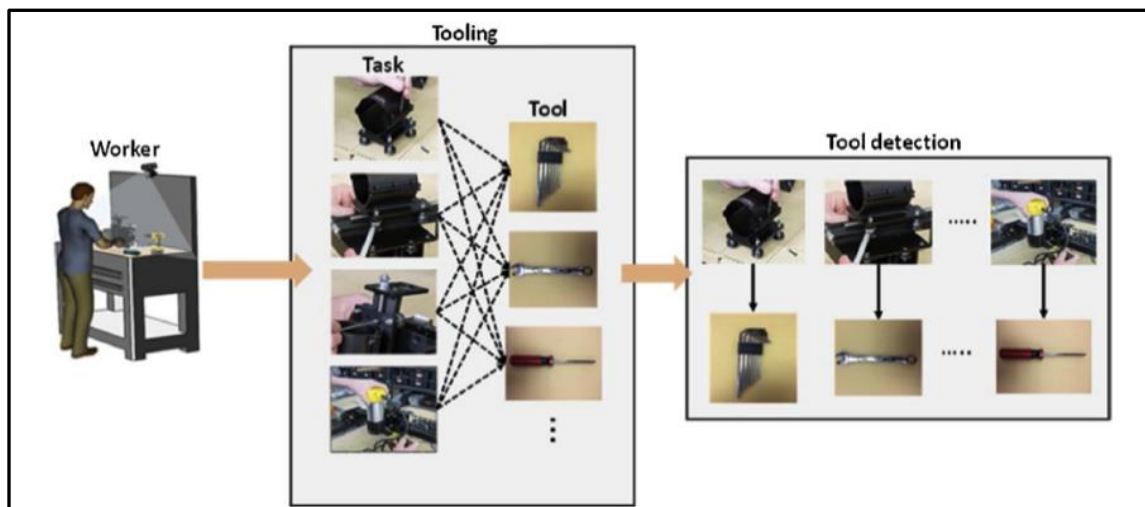
Με βάση το συνδυασμό βιομηχανικής συναρμολόγησης και επαυξημένης πραγματικότητας, παρουσιάζεται ένα έργο με την ονομασία **motion-EAP** [53], [54]. Η κύρια ιδέα αυτού του έργου είναι η δημιουργία μιας διαδραστικής διεπαφής, η οποία μπορεί να βοηθήσει τους εργαζόμενους κατά τη χειροκίνητη συναρμολόγηση στο χώρο εργασίας. Έχουν αναπτυχθεί δύο συστήματα, το ένα βρίσκεται ενσωματωμένο στη γραμμή παραγωγής (Order-Pick-AR) και το άλλο είναι ένα κράνος που φοράει ο εργαζόμενος (Helmet-Pick-AR) (Εικόνα 2.25). Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την επιτόπια απεικόνιση και αναγνώριση της δραστηριότητας των εργαζομένων, παρέχοντας βοήθεια στη διαδικασία χειροκίνητης συναρμολόγησης.



Εικόνα 2.25 Η εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας motion-EAP [53], [54]

Ένας αλγόριθμος ανάλυσης εικόνας, βασισμένος σε επαυξημένη πραγματικότητα (transfer learning algorithm in image analysis with augmented reality headset for Industry 4.0) παρουσιάζεται στη συνέχεια [55]. Αυτή η έρευνα αφορά δίοπτρα επαυξημένης πραγματικότητας (HoloLens 1.0) που επικεντρώνονται κυρίως για να βοηθήσουν τις εργασίες του χειριστή. Το σύστημα μάθησης βασίζεται σε φωτογραφίες που αποτυπώνονται από τα δίοπτρα AR. Μετά τη λήψη εικόνων, οι εικόνες αποθηκεύονται, προκειμένου να αναλυθούν. Με τη βοήθεια ενός νευρωνικού δικτύου «Transfer Neural Network - TNN» εφαρμόζεται ανάλυση εικόνας προκειμένου να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες σχετικές με την ποιότητα της παραγωγής. Οι πληροφορίες αυτές δίνονται στην χειριστή, έτσι ώστε να κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις και βελτιώσεις κατά την παραγωγική διαδικασία.

Ένα σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας για τη διαδικασία μηχανικής συναρμολόγησης (**smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing**) περιγράφεται παρακάτω [56]. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μηχανισμού ανίχνευσης, για τον εντοπισμό εργαλείων που απαιτούνται κατά την παραγωγή, παρέχοντας έναν βοηθητικό οδηγό στους εργαζομένους. Όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.26** αυτό επιτυγχάνεται με μια κάμερα web, που βρίσκεται στην κορυφή της περιοχής συναρμολόγησης. Το σύστημα μηχανικής συναρμολόγησης AR καταγράφει φωτογραφίες και βίντεο του πάγκου εργασίας και τα τροφοδοτεί σε ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης «Faster Region-CNN». Το μοντέλο στη συνέχεια εκπαιδεύεται με ένα παλιό σύνολο δεδομένων, προκειμένου να είναι έτοιμο για ταξινόμηση και ανίχνευση των εργαλείων στο πεδίο της γραμμής παραγωγής. Η προσέγγιση αυτή έχει δοκιμαστεί σε βιομηχανικό περιβάλλον συμβάλλοντας στη μείωση περίπου 30% του χρόνου ολοκλήρωσης της συναρμολόγησης, καθώς και στην αύξηση της απόδοσης των εργαζομένων σε πολύπλοκες εργασίες.



**Εικόνα 2.26** Εφαρμογή ανίχνευσης εργαλείων με επαυξημένη πραγματικότητα [56]

### 2.3. Τεχνητή νοημοσύνη στην προγνωστική συντήρηση (AI in Predictive Maintenance)

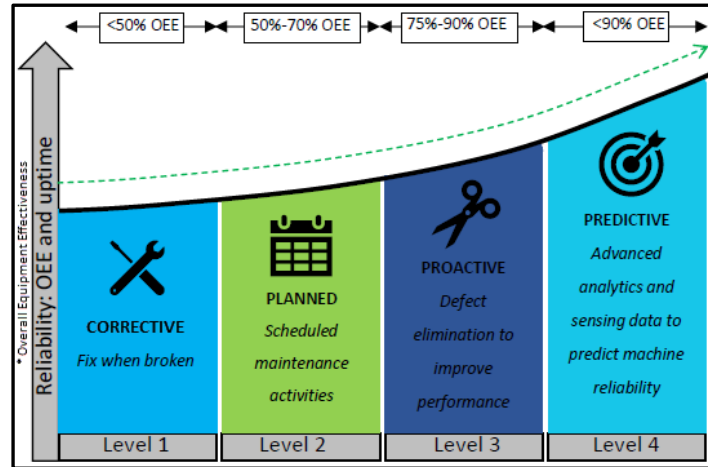
Η διαδικασία παραγωγής για μια βιομηχανία έχει ζωτικό νόημα για τη σωστή λειτουργία της. Αυτό σημαίνει ότι τα απρόβλεπτα σφάλματα και οι τερματισμοί της παραγωγής για μεγάλη διάρκεια μπορούν να βλάψουν όχι μόνο τα προϊόντα, αλλά και τη βιομηχανία οικονομικά. Για το σκοπό αυτό, η συντήρηση είναι πολύ σημαντική παράμετρος. Όντας στην εποχή της ευφυούς βιομηχανίας, σημαίνει την τεράστια εξαγωγή δεδομένων κατά την



παραγωγή από έναν μεγάλο αριθμό ευφύων αισθητήρων. Επομένως, η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων είναι καίριας σημασίας για τη συντήρηση του εξοπλισμού. Οι κύριες κατηγορίες τύπων συντήρησης είναι [57], [58]:

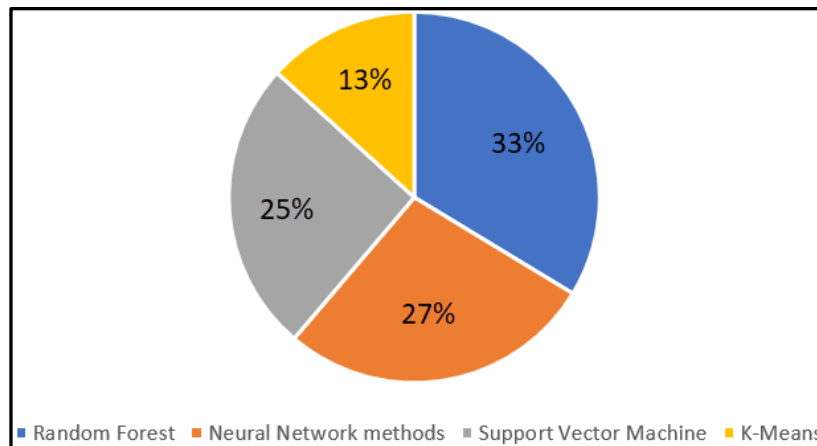
- **Διορθωτική συντήρηση (Corrective Maintenance):** Το μηχάνημα σταματά για συντήρηση σε περίπτωση βλάβης. Είναι η απλούστερη, αλλά η πιο οικονομικά επιβαρυντική στρατηγική. Έχει το μεγαλύτερο χρόνο διακοπής λειτουργίας και το υψηλότερο ποσοστό βλαβών.
- **Προληπτική συντήρηση (Preventive Maintenance - PnM):** Το μηχάνημα σταματά για συντήρηση σε προκαθορισμένα διαστήματα. Είναι μια αποτελεσματική στρατηγική, η οποία μειώνει τις αστοχίες, μιας και εφαρμόζεται περιοδικά σε όλα τα μηχανήματα μιας βιομηχανίας. Ωστόσο, θεωρείται δαπανηρή επιλογή, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να μην είναι απαραίτητη.
- **Συντήρηση βάση συνθήκων (Condition-based Maintenance - CBM):** Οι αισθητήρες δίνουν ανατροφοδότηση σχετικά με τη λειτουργία του μηχανήματος και ενδέχεται να χρειαστεί μη προγραμματισμένη συντήρηση σε περίπτωση ανίχνευσης βλάβης. Είναι μια στρατηγική βελτίωσης της απόδοσης.
- **Προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance - PdM):** Αποτελεί την πιο προηγμένη στρατηγική. Ένα σύστημα παρακολούθησης επιβλέπει τη δομική και λειτουργική υγεία των μηχανημάτων και ενεργοποιεί τη συντήρηση όταν εντοπίζεται κάποιο σφάλμα. Επιπρόσθετα μπορεί να προβλέψει επικείμενες βλάβες, επιτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο την κατάλληλη προετοιμασία για την αντιμετώπιση τυχόν μελλοντικών βλαβών.

Στην *Εικόνα 2.27* παρουσιάζεται μια επισκόπηση των τύπων συντήρησης. Οι στρατηγικές βρίσκονται στον οριζόντιο άξονα, ενώ η συνολική αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα. Το πράσινο βέλος αντιπροσωπεύει την απόδοση της κάθε μεθόδου, η οποία αυξάνεται αισθητά προς την καλύτερη στρατηγική.



Εικόνα 2.27 Επισκόπηση των κατηγοριών συντήρησης [58]

Λαμβάνοντας υπόψη την αναφορά [57], στο σχήμα **Εικόνα 2.28** παρουσιάζονται οι πιο κοινές μεθοδολογίες και μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης σε εφαρμογές προληπτικής συντήρησης (PdM). Αυτές είναι ο αλγόριθμος «Random Forest», τα νευρωνικά δίκτυα (παραδείγματα χάριν ANN, CNN, LSTM, DL), οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine - SVM) and η μέθοδος «K-means».



Εικόνα 2.28 Μεθοδολογίες AI που χρησιμοποιούνται στην προγνωστική συντήρηση [57]

- Random Forests (RF):** Είναι μια υποκατηγορία των δέντρων αποφάσεων (Decision Trees), το οποίο δημιουργεί δέντρα αποφάσεων τυχαία και χρησιμοποιεί μια προσέγγιση μέσης πρόβλεψης. Αυτός είναι ένας εποπτευόμενος αλγόριθμος που εφαρμόζεται κυρίως σε θέματα ταξινόμησης (Classification) ή παλινδρόμησης (Regression). Αυτή η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός των μεταβλητών είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των δειγμάτων. Στην έξυπνη βιομηχανία υπάρχουν διάφορα σενάρια όπου χρησιμοποιείται, όπως σε

δυναμικά μοντέλα πρόβλεψης. Η μέθοδος αυτή έχει πολύπλοκη δομή και είναι πιο χρονοβόρα σε υπολογιστικό χρόνο σε σύγκριση με άλλες τεχνικές μηχανικής μάθησης.

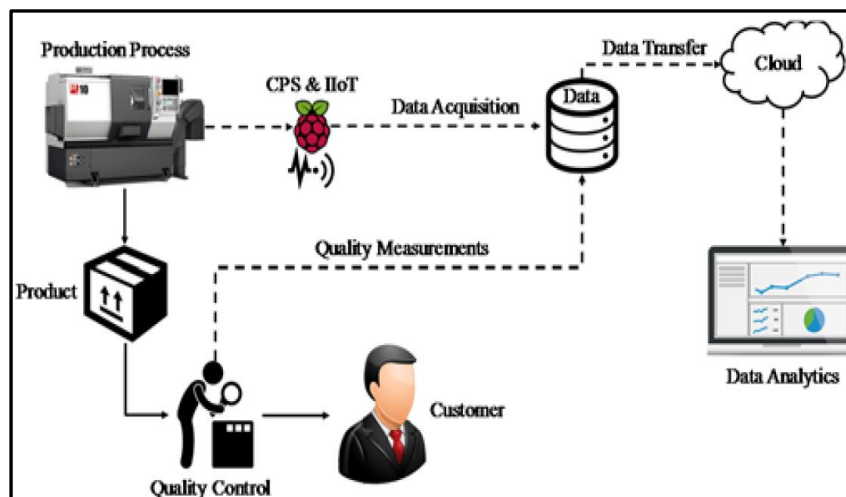
- **Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network methods - NN):** Αντιπροσωπεύουν ένα πανομοιότυπο μοντέλο βιολογικών ανθρώπινων νευρώνων. Πρόκειται για μια προσέγγιση μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται συνήθως στην έξυπνη βιομηχανία σε διάφορες εφαρμογές (soft sensing, predictive control, κ.α.). Στις εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης (PdM) εφαρμόζονται διάφορες υποκατηγορίες NN, όπως:
  - **Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANN):** Αυτά τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να μάθουν από προηγούμενα σύνολα δεδομένων, αλλά και από παραδείγματα. Έχουν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν τη λειτουργία τους καθώς εξελίσσεται το περιβάλλον του προβλήματος. Συνήθως εφαρμόζονται όπου απαιτείται δυναμική μοντελοποίηση (dynamic modeling), πρόβλεψη (prediction), ταξινόμηση δεδομένων (data classification) ή ομαδοποίηση (data clustering).
  - **Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNN):** Είναι μια κατηγορία αλγορίθμων βαθιάς μάθησης.
  - **Βαθιά Μάθηση (Deep Learning - DL):** Η εφαρμογή της βαθιάς μάθησης στην προγνωστική συντήρηση έχει διάφορες υλοποιήσεις όπως αναφέρεται στο [59]. Τα πιο κοινώς εφαρμοζόμενα μοντέλα είναι: i) Deep Feedforward Networks, ii) Long Short-Term Memory, iii) Convolutional Networks and iv) Deep Belief Networks

Σε γενικές γραμμές, τα νευρωνικά δίκτυα (NN) είναι μια μέθοδος που δεν απαιτεί γνώσεις εμπειρογνομόνων, καθώς βασίζεται σε προηγούμενα δεδομένα. Ωστόσο, η εκπαιδευτική διαδικασία τους είναι χρονοβόρα.

- **Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines - SVM):** Χρησιμοποιείται ευρέως σε εργασίες ταξινόμησης (Classification) και παλινδρόμησης (Regression), οι οποίες απαιτούν υψηλή ακρίβεια στην ταξινόμηση δεδομένων. Επιπλέον, χρησιμοποιεί εποπτευόμενες μεθόδους μάθησης για περιπτώσεις αναγνώρισης προτύπων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λύση στα προγνωστικά προβλήματα. Η αρχιτεκτονική της μεθόδου αυτής είναι περίπλοκη και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος εξαρτάται αναλογικά από τον αριθμό των δειγμάτων.

- **K-means:** Είναι μια γνωστή αλγοριθμική προσέγγιση ομαδοποίησης χωρίς επίβλεψη. Πρακτικά, έχει απλή εφαρμογή, παρέχοντας αποτελεσματική απόδοση ειδικά με μεγάλα σύνολα δεδομένων. Βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα, χωρίς να απαιτείται γνώση ειδικού.

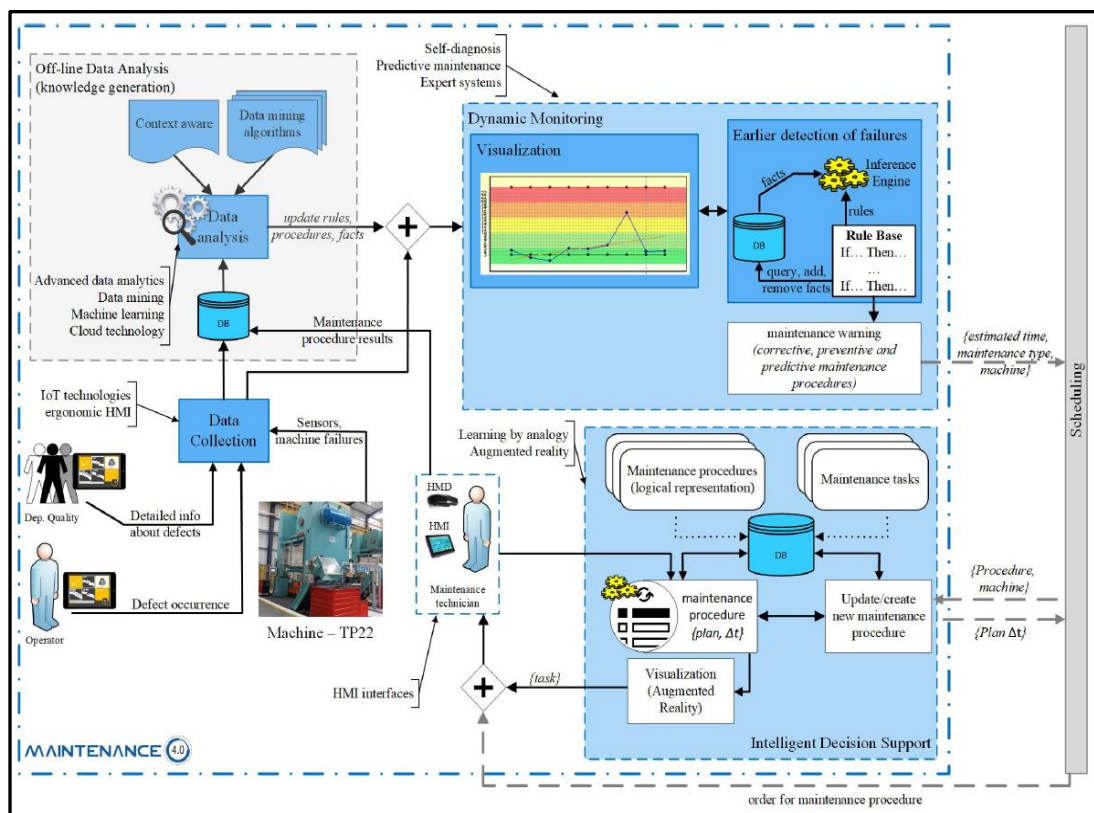
Το υπόλοιπο αυτής της ενότητας παρουσιάζει εφαρμογές συντήρησης, οι οποίες έχουν συλλεχθεί και μελετηθεί από σχετικές βιβλιογραφικές πηγές. Αρχικά γίνεται λόγος για μια προσέγγιση **συντήρησης χαμηλού κόστους για μικρές βιομηχανίες (industry 4.0-enabled low-cost predictive maintenance approach for small manufacturing enterprises - SMEs)** [60]. Αυτή η έρευνα επικεντρώνεται στην επίβλεψη συντήρησης βάσει συνθηκών (Condition-based Maintenance - CBM) της λειτουργίας μιας εργαλειομηχανής CNC (*Εικόνα 2.29*). Στην εφαρμογή αυτή γίνεται προσομοίωση της κατασκευής σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον. Στη συνέχεια, γίνεται καταγραφή δεδομένων θερμοκρασίας, κραδασμών, κ.α. παραμέτρων, μέσω μιας διάταξης [Raspberry Pi3](#) και αποθηκεύονται στο cloud. Έπειτα, η διαδικασία ανάλυσης ξεκινά με βάση μια τεχνική δέντρου απόφασης (decision tree) ταξινόμησης (classification), η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των ελαττωματικών μηχανικών μερών, με βάση ένα όριο ποιότητας. Αυτή η εφαρμογή έχει υλοποιηθεί σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον, αν και έχει αναπτυχθεί για μικρές βιομηχανίες, με ακρίβεια πρόβλεψης συντήρησης 81%.



Εικόνα 2.29 Αρχιτεκτονική συντήρησης εργαλειομηχανής CNC [60]

Μια ακόμη **αρχιτεκτονική ευφυούς συστήματος προγνωστικής συντήρησης (architecture of intelligent and predictive maintenance system)** περιγράφεται παρακάτω

[61]. Πρόκειται για μια προγνωστική προσέγγιση διαχείρισης της υγείας των μηχανημάτων, η οποία λειτουργεί ως συμβουλευτικό εργαλείο συντήρησης για τους εργαζόμενους. Η αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται αποτελείται από μια μονάδα συλλογής δεδομένων, μια μονάδα ανάλυσης, μια μονάδα παρακολούθησης, μια μονάδα προγραμματισμού και μια έξυπνη μονάδα υποστήριξης αποφάσεων (Εικόνα 2.30). Τα βιομηχανικά αισθητήρια σήματα παρακολουθούνται και συλλέγονται στη μονάδα συλλογής δεδομένων, όπου αναλύονται από ένα νευρωνικό δίκτυο «Long-Short-Term-Memory – LSTM», προκειμένου να εξαχθούν οι γνώσεις που απαιτούνται για τη δημιουργία κανόνων του μοντέλου. Αυτοί οι κανόνες οδηγούνται στο δυναμικό σύστημα παρακολούθησης, όπου εξάγονται οι πληροφορίες για τη συντήρηση. Σε αυτό το σύστημα, οι πληροφορίες μπορούν είτε να απεικονιστούν σε διαγράμματα είτε να παρουσιαστούν ως προειδοποίηση, όταν διαγνωστεί κάποιο σφάλμα. Έπειτα οι πληροφορίες αποστέλλονται στη μονάδα προγραμματισμού, όπου αποφασίζεται το πρόγραμμα συντήρησης (δηλαδή, προγνωστικό, προληπτικό ή διορθωτικό). Τέλος, στη μονάδα υποστήριξης αποφάσεων εκτελείται η επιλεγμένη συντήρηση, παρέχοντας στους εργαζόμενους καθοδήγηση μέσω διεπαφών «Human-Machine Interface – HMI».

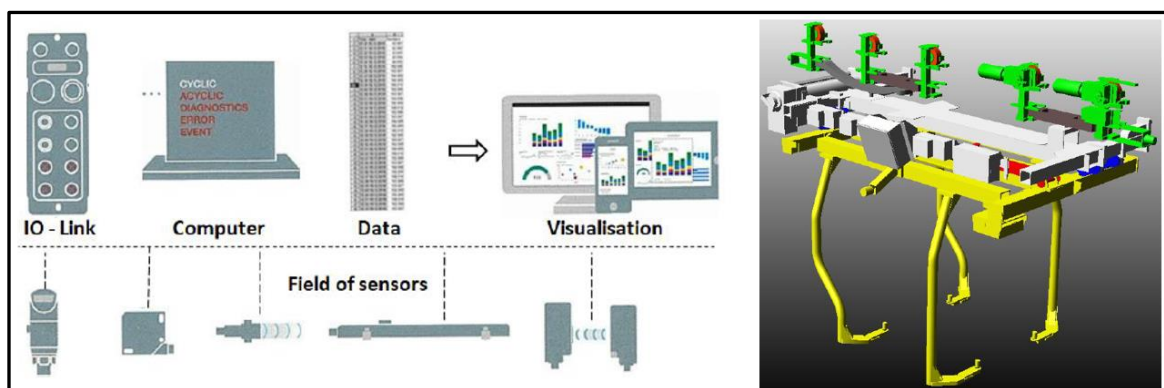


Εικόνα 2.30 Αρχιτεκτονική ευφυούς συστήματος προγνωστικής συντήρησης [60]

Στην επόμενη εφαρμογή περιγράφεται μια προσέγγιση κυβερνο-φυσικού συστήματος για προγνωστική συντήρηση (**cyber-physical system approach for predictive maintenance**) [62]. Αυτή η έρευνα επικεντρώνεται στην εφαρμογή αλγορίθμων βαθιάς μάθησης για σκοπούς προγνωστικής συντήρησης σε βιομηχανικό εξοπλισμό. Στη μελέτη αυτή εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (Convolutional Neural Network - CNN) χρησιμοποιείται για τη λήψη αποφάσεων προγνωστικής συντήρησης.

Επιπρόσθετα έχει αναπτυχθεί μια σχετική προσέγγιση πρόβλεψης συντήρησης για ρομποτικές διατάξεις ημιαγωγών (**predictive maintenance technology for semiconductors wafer transfer robot**) [63]. Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική πρόβλεψης σφαλμάτων, που βασίζεται σε γλώσσες προγραμματισμού Python και R για επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, καθώς και στον αλγόριθμο συσταδοποίησης (clustering) «K-means». Χρησιμοποιώντας δεδομένα από αισθητήρες παρακολούθησης της ρομποτικής διάταξης, το προτεινόμενο μοντέλο είναι σε θέση να εντοπίσει τις μέσες τιμές δεδομένων συχνοτήτων των συστάδων και με αυτόν τον τρόπο να προβλέψει αστοχίες της διάταξης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα άλλο παράδειγμα ευφυούς ελέγχου προγνωστικής συντήρησης χρησιμοποιώντας επαυξημένη πραγματικότητα (**intelligent predictive maintenance control using augmented reality**) [50]. Αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στην υποστήριξη εργαζομένων σε πραγματικό χρόνο, μέσω διόπτρων AR κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Ο κύριος στόχος αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη ενός ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να οπτικοποιηθούν τα δεδομένα που συλλέγονται σε από τους αισθητήρες κατατοπίζοντας τους εργαζομένους στο πεδίο της βλάβης (*Εικόνα 2.31*).



**Εικόνα 2.31** Προγνωστική συντήρηση με εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας [50]

Μια προγνωστική προσέγγιση συντήρησης, ανίχνευσης σφαλμάτων και παρακολούθηση της ποιότητας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (**predictive maintenance approach of sensing and quality monitoring in industrial facilities**) παρουσιάζεται παρακάτω [64]. Αυτό το έργο επικεντρώνεται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις ζυμαρικών, όπου η πρόβλεψη των επιπέδων υγρασίας είναι σημαντική. Στην εφαρμογή αυτή γίνεται χρήση ενός μοντέλου τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Artificial Neural Network - ANN) [65].

Επιπρόσθετα, μια προσέγγιση που ασχολείται με δεδομένα χρονοσειρών σε προγνωστικά προβλήματα συντήρησης (**approach dealing with time-series data in predictive maintenance problems**) παρουσιάζεται παρακάτω [67]. Αυτή η εργασία επικεντρώνεται στην πρόβλεψη πιθανών σφαλμάτων και τυχόν απαιτούμενων συντηρήσεων σε μια γραμμή κατασκευής ημιαγωγών, χρησιμοποιώντας δεδομένα χρονοσειρών. Για την ανάλυση των δεδομένων αυτών χρησιμοποιείται η μέθοδος (Supervised Aggregative Feature Extraction - SAFE), με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων στοιχείων για την παραγωγή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΥΦΥΟΥΣ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

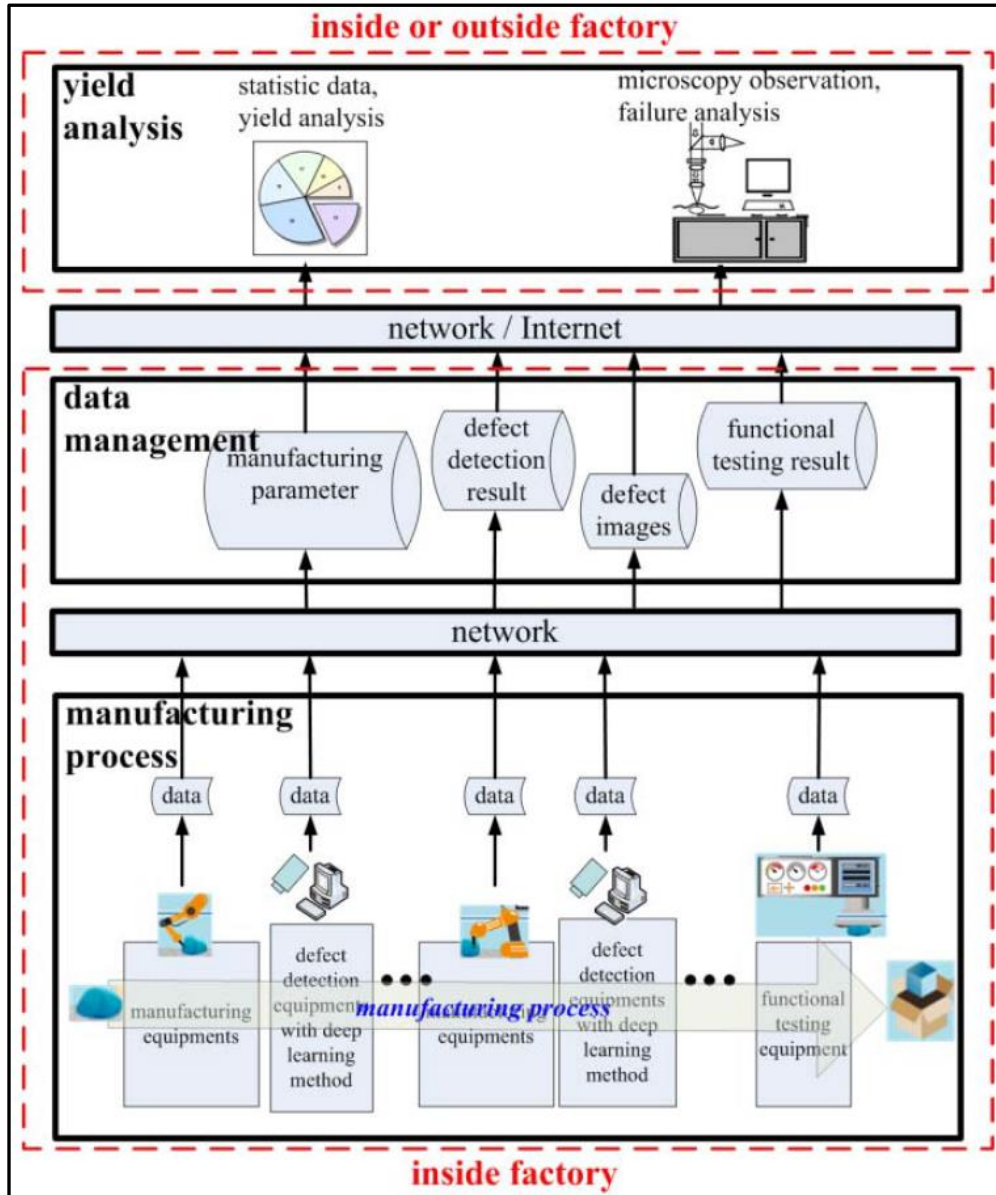
### 5.1. Τεχνητή νοημοσύνη στον εντοπισμό σφαλμάτων (AI in Fault Detection)

Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές κατά τη βιομηχανική παραγωγή, όχι μόνο στην προγνωστική συντήρηση, αλλά και στην ανίχνευση και πρόβλεψη σφαλμάτων. Η εποπτευόμενη μάθηση (Supervised Learning) εφαρμόζεται συνήθως στην πρόβλεψη της βιομηχανικής απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως: i) «Bayesian Network», ii) «Logistic Regression, iii) «K-Nearest Neighbor», iv) «Support Vector Machine» and v) «Decision Trees».

Στο υπόλοιπο μέρος αυτής της ενότητας παρουσιάζονται διάφορες μεθοδολογίες και έννοιες, που μπορούν να εφαρμοστούν στην έξυπνη βιομηχανία προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανίχνευση σφαλμάτων στη διαδικασία παραγωγής.

Αρχικά, παρουσιάζεται ένα **βιομηχανικό δίκτυο IoT με στόχο την ανίχνευση ελαττωμάτων στην παραγωγή. (Industrial IoT for defect detection system with deep learning method)** [68]. Η αρχιτεκτονική του δικτύου αυτού βασίζεται σε βαθιά μάθηση και πιο συγκεκριμένα σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNN). Η διαδικασία ανίχνευσης σφαλμάτων ξεκινά με τη λήψη εικόνας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Όπως φαίνεται στο **Εικόνα 3.1**, αυτό το μοντέλο αποτελείται από τρία μέρη. Η γραμμή παραγωγής (manufacturing process) αποτελεί το πρώτο μέρος όπου συλλέγονται πληροφορίες (δηλ. εικόνες) σχετικά με το παραγόμενο προϊόν, στη συνέχεια είναι το τμήμα διαχείρισης δεδομένων (data management part), όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα και τέλος είναι το μέρος ανάλυσης των δεδομένων (yield analysis part), το οποίο αναλύει και ανιχνεύει τα σφάλματα της γραμμής παράγωγης.





Εικόνα 3.1 Αρχιτεκτονική ανίχνευσης ελαττωμάτων βασισμένη σε βαθιά μάθηση [68].

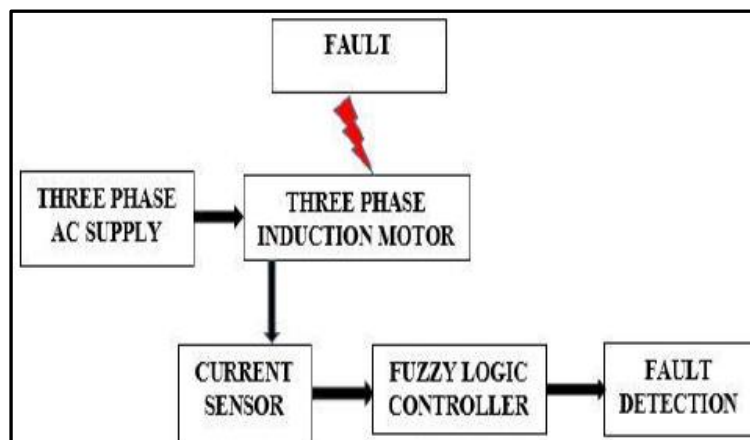
Επιπλέον, γίνεται αναφορά για μια **τεχνική ανάλυσης για την ανίχνευση σφαλμάτων μηχανών εσωτερικής καύσης στην αυτοκινητοβιομηχανία (vibration analysis for fault detection with PCA technique in automobile industry)** [69]. Αυτή η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στους κινητήρες των αυτοκινήτων και πιο συγκεκριμένα στα σφάλματα της διαδικασίας καύσης. Η βασική ιδέα αυτής της έρευνας είναι ο εντοπισμός τυχόν δυσλειτουργίες στην καύση, εφαρμόζοντας την τεχνική ανάλυσης συστατικών (principal component analysis technique - PCA). Μέσω της ανάλυσης δονήσεων εντοπίζονται τυχόν δυσλειτουργίες και στη συνέχεια ταξινομούνται σε κατηγορίες μέσω

ενός αναλυτή [ADASH 4400](#) προκειμένου να καταλήξουν σε ένα τελικό σήμα, το οποίο αντιπροσωπεύει τα σφάλματα (*Εικόνα 3.2*).



**Εικόνα 3.2** Ανίχνευση σφαλμάτων μηχανών εσωτερικής καύσης στην αυτοκινητοβιομηχανία [69]

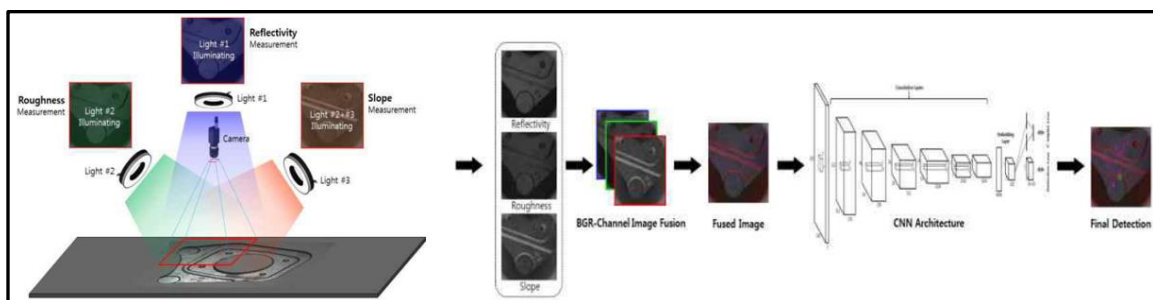
Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται μια εφαρμογή εκτίμησης σφάλματος στο τύλιγμα του στάτη ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα (**AI based stator winding fault estimation in three phase induction motor**) [70]. Αυτή η έρευνα παρουσιάζει μια προσέγγιση ασαφούς λογικής (fuzzy logic) με σκοπό την ανίχνευση βραχυκυκλώματος στην περιέλιξη του στάτη ενός κινητήρα επαγωγής. Το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω (*Εικόνα 3.3*). Πιο συγκεκριμένα, αυτή η διαδικασία βασίζεται στη μέτρηση του πλάτους του ρεύματος που διαρρέει τον στάτη, το οποίο μετριέται από έναν αισθητήρα ρεύματος. Με τη διαδικασία της ταξινόμησης ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής, εντοπίζεται ο τύπος του σφάλματος. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ασαφής λογική είναι ο απλούστερος τρόπος εφαρμογής της ανίχνευσης σφαλμάτων, λόγω του γεγονότος ότι χρειάζεται μόνο σωστούς κανόνες που βασίζονται στη γνώση, χωρίς κανένα γενικό μαθηματικό μοντέλο. Αυτό το παράδειγμα αντιπροσωπεύει μια εύκολη προοπτική ανίχνευσης σφάλματος σε περιβάλλον προσομοίωσης (MATLAB), αν και δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη σε βιομηχανικό περιβάλλον, όπου πιθανώς τα πράγματα θα ήταν διαφορετικά σε θέμα πολυπλοκότητας συγκριτικά με ένα εργαστηριακό περιβάλλον.



**Εικόνα 3.3** Αρχιτεκτονική ανίχνευσης σφαλμάτων σε ένα τριφασικό επαγωγικό κινητήρα [70]

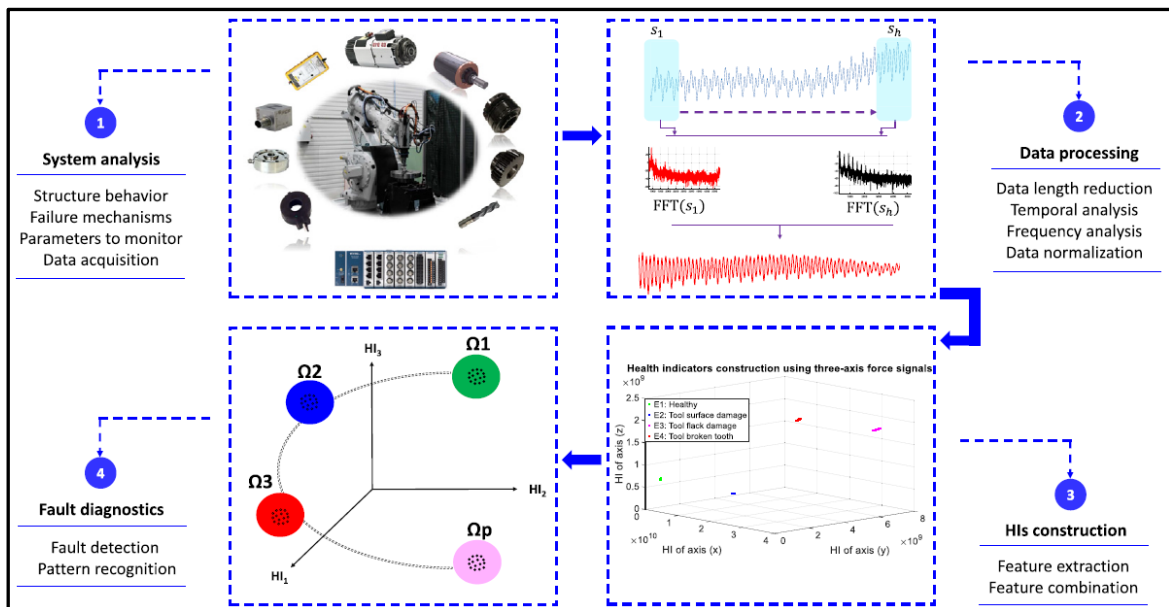
Μια άλλη προσέγγιση **ανάλυσης σφαλμάτων και προγνωστικής συντήρησης κινητήρων επαγωγής** παρουσιάζεται στη συνέχεια (**fault analysis and predictive maintenance of Induction motor using machine learning**) [71]. Η αρχιτεκτονική αυτής της προσέγγισης βασίζεται σε μια τεχνική μηχανικής μάθησης και πιο συγκεκριμένα σε ένα νευρωνικό δίκτυο «Fast Forward Artificial Neural Network», το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λόγους προφύλαξης για την αναγνώριση τυχόν ηλεκτρικών σφαλμάτων που θα μπορούσαν να συμβούν σε τριφασική επαγωγή μοτέρ. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το μοντέλο νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιεί ως εκπαίδευση παλιά δεδομένα μετρήσεων ρεύματος και τάσης του κινητήρα και ανάλογα με τις μετρήσεις που πραγματοποιεί ταξινομεί τη φύση των βλαβών (δηλ. υπέρταση, υπερένταση, κ.λπ.).

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται ένα **τριδιάστατο σύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων βασισμένο σε βαθιά μάθηση που χρησιμοποιεί φωτομετρικό στερεοφωνικό φωτισμό (deep learning based 3D defect detection system using photometric stereo illumination)** (Εικόνα 3.4) [72]. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (Convolutional Neural Network), το οποίο συγχωνεύει εικόνες που λαμβάνονται από τρία ξεχωριστά κανάλια, προκειμένου να ληφθούν πολυδιάστατες πληροφορίες σχετικά με το υλικό. Για τον εντοπισμό του υλικού στις εικόνες, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος εντοπισμού «You Only Look Once - YOLO». Ειδικότερα, έχει κατασκευαστεί ένα φωτομετρικό στερεοφωνικό σύστημα, προκειμένου να ληφθεί ένα τρισδιάστατο σχήμα, μέσω του οποίου απεικονίζονται λεπτομέρειες όπως η σκληρότητα, η κλίση και η ανακλαστικότητα ενός εξεταζόμενου αντικειμένου. Ο κύριος λόγος ανάπτυξης αυτής της εφαρμογής, είναι η ενίσχυση του αυτόματου συστήματος ανίχνευσης μηχανών οπτικής επιθεώρησης, παρόλο που η χρήση του είναι περιορισμένη για το σκοπό αυτό. Η ακρίβεια αυτής της αρχιτεκτονικής είναι περίπου 63%, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να γίνουν βελτιώσεις για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.



**Εικόνα 3.4** Ανίχνευση βλαβών μέσω φωτομετρικού στερεοφωνικού συστήματος [72]

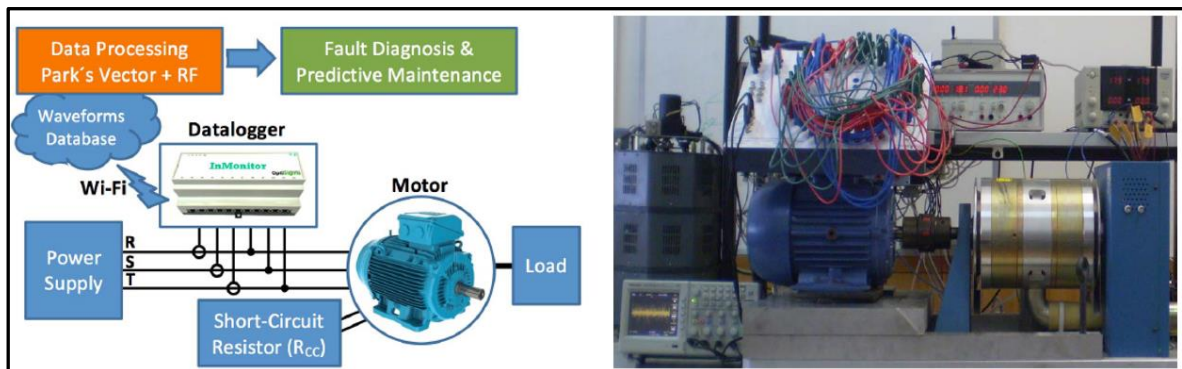
Επιπλέον, αναφέρεται μια μέθοδος διάγνωσης σφαλμάτων (**pattern recognition method of fault diagnostics based on a new health indicator for smart manufacturing**) [73]. Ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης (*Εικόνα 3.5*) είναι να εφαρμόσει τη διάγνωση σφαλμάτων σε διάφορους βιομηχανικούς μηχανισμούς, όπως σε ρουλεμάν και γρανάζια κινητήρων, μειωτήρες, κ.α., για την έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται τριφασικά σήματα ρεύματος και τάσης, καθώς και συσκευές ανίχνευσης κραδασμών, μέτρησης ροπής κ.α.. Τα δεδομένα που συλλέγονται οδηγούνται σε ένα σύστημα ασαφούς λογικής (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) με σκοπό την επεξεργασία τους για την εξαγωγή πληροφοριών για την υγεία των μηχανικών διατάξεων.



**Εικόνα 3.5** Ανίχνευση βλαβών με τη μέθοδο αναγνώρισης μοτίβων (pattern recognition) [73]

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια **προσέγγιση διάγνωσης βλαβών βραχυκυκλώματος στάτη σε κινητήρες επαγωγής (stator winding short-circuits fault diagnosis approach in induction motors using random forest)** [74]. Για εφαρμογές ανίχνευσης σφαλμάτων στις περιελίξεις του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι «Random Forest» και ο μετασχηματισμός Park για. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.6*, εποπτεύονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν σφάλματα σε αυτές. Παρουσιάζονται δύο προσεγγίσεις τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN) για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Η πρώτη προσέγγιση αφορά μια αρχιτεκτονική διπλής ταξινόμησης, η οποία αποτελείται από έναν ταξινομητή κατάστασης υγιούς βλάβης και έναν ξεχωριστό ταξινομητή για να προσδιορίσει σε ποια φάση είναι η δυσλειτουργία. Η

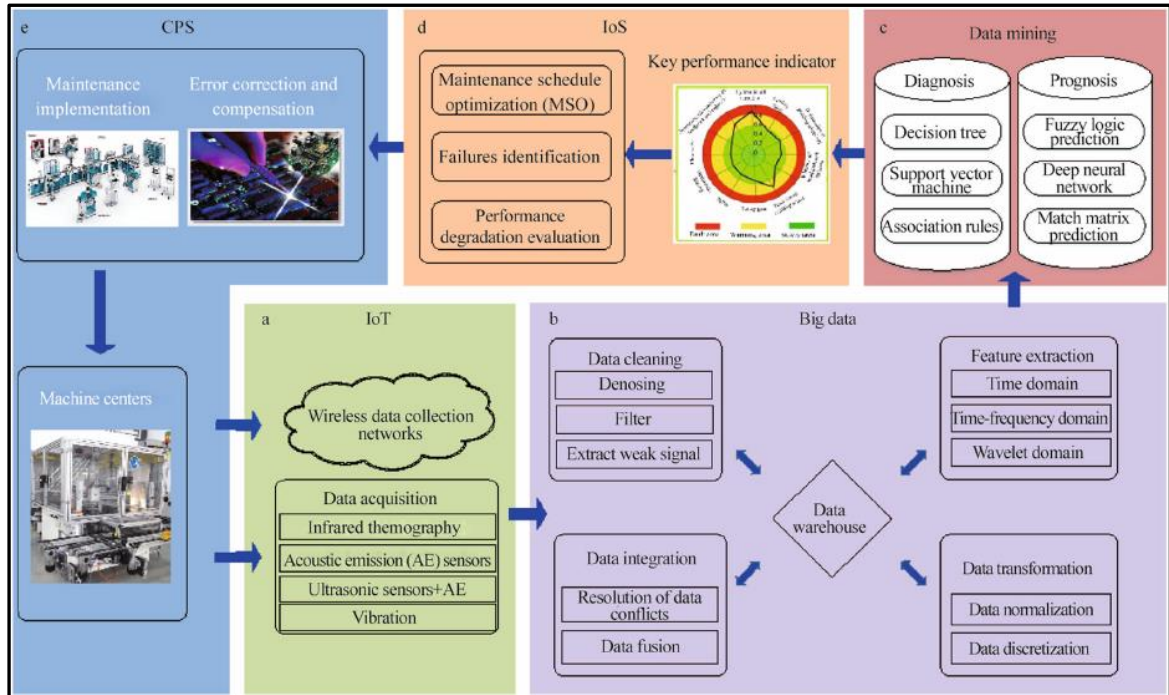
δεύτερη προσέγγιση είναι μια αρχιτεκτονική ταξινομητή, η οποία ταξινομεί μαζί την κατάσταση υγιές-ελαττωματικό και την προβληματική φάση.



**Εικόνα 3.6** Αρχιτεκτονική ανίχνευσης σφαλμάτων τριφασικού επαγωγικού κινητήρα [74]

Μια προσέγγιση ευφυούς προγνωστικής συντήρησης για διάγνωση σφαλμάτων σε μηχανικές διατάξεις (**intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers**) παρουσιάζεται παρακάτω [75]. Η διαδικασία διάγνωσης σφαλμάτων περιλαμβάνει ανάλυση διαφόρων παραμέτρων, όπως θερμοκρασία, κραδασμούς, κατανάλωση ενέργειας, ποιότητα καύσης, ακουστικές εκπομπές κ.α.. Στην **Εικόνα 3.7** παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της διάγνωσης σφαλμάτων και της πρόγνωσης μηχανικών διατάξεων, το οποίο αποτελείται από πέντε μονάδες:

- Στην πρώτη μονάδα (i) (sensor selection and data acquisition module) επιλέγεται το κατάλληλο αισθητήριο σύστημα και η πιο αποτελεσματική στρατηγική συλλογής δεδομένων, προκειμένου να συλλέγονται όλα τα δεδομένα και να αποθηκεύονται.
- Στην δεύτερη μονάδα (data preprocessing module), τα δεδομένα υφίστανται μια προ επεξεργασία, προκειμένου να εξαχθεί ο θόρυβος.
- Στην τρίτη μονάδα (data mining module) γίνεται εξόρυξη δεδομένων και μπορούν να προβλεφθούν μελλοντικές τάσεις, μέσω στατιστικών στοιχείων. Η διαδικασία πρόγνωσης βασίζεται σε ένα τεχνητό νευρικό δίκτυο (ANN) που έχει εκπαιδευτεί για την πρόβλεψη σφαλμάτων.
- Στην τέταρτη μονάδα (decision support module) απεικονίζει το αποτέλεσμα λήψης αποφάσεων και παρέχει την κατάλληλη στρατηγική διόρθωσης σφαλμάτων.
- Τέλος η πέμπτη μονάδα (implementation module) εφαρμόζει την επιλεχθείσα στρατηγική διόρθωσης σφαλμάτων.



**Εικόνα 3.7** Αρχιτεκτονική ευφυούς προγνωστικής συντήρησης για διάγνωση σφαλμάτων σε μηχανικές διατάξεις [75]

## 5.2. Τεχνητή νοημοσύνη στον ποιοτικό έλεγχο (AI in Quality Control)

Στην ενότητα αυτή γίνεται λόγος για την ποιότητα τέταρτης γενιάς “Quality 4.0” που αποτελεί επιδίωξη στη βιομηχανική παραγωγή. Ουσιαστικά η έννοια αυτή στηριζόμενη στις ήδη ανεπτυγμένες τεχνολογίες αποσκοπεί στην υλοποίηση εφαρμογών που μπορούν να αναπτύξουν, να διαχειριστούν και να διατηρήσουν ποιοτικά πρότυπα στις αλυσίδες εφοδιασμού μιας βιομηχανίας. Οι καινοτόμες τεχνολογίες που βρίσκουν εφαρμογή στο γενικότερο πλαίσιο της ευφυούς βιομηχανίας μπορούν να συνεισφέρουν στη βελτίωση της ποιότητας με διάφορους τρόπους. Λόγου χάριν, οι εταιρείες μπορούν με την παρακολούθηση των διαδικασιών και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο να εφαρμόζουν αναλυτικά στοιχεία για να προβλέπουν ζητήματα ποιότητας. Γίνεται αντιληπτό ότι ο ποιοτικός έλεγχος δεν επικεντρώνεται μόνο σε όσα συμβαίνουν μέσα σε ένα εργοστάσιο, αλλά καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τμημάτων, από την αλυσίδα εφοδιασμού, την προμήθεια, την κατασκευή, τις πωλήσεις, μέχρι και τη διοίκηση και διαχείριση της βιομηχανίας.

Σύμφωνα με την Αμερικανική Εταιρεία Ποιότητας “American Society for Quality - ASQ”, καθώς και με το πρότυπο ISO 9001, με τον όρο ποιότητα νοείται το σύνολο των χαρακτηριστικών ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας που βασίζονται στην ικανότητά του να

ικανοποιεί κάποιες συγκεκριμένες ανάγκες των καταναλωτών. Για να διασφαλιστεί η συνολική ποιότητα σε μια βιομηχανία οι διαδικασίες, τα προϊόντα, τα μηχανήματα, ο εξοπλισμός και τα συστήματα πρέπει να πληρούν τις νόμιμες απαιτήσεις ποιότητας που ορίζονται. Είναι προφανές ότι η έννοια της ποιότητας συναντάται ευρέως σε διάφορα τμήματα της βιομηχανίας [76], [77].

Η διαχείριση της ποιότητας “Quality Management” αποτελεί τον κεντρικό άξονα με βάση τον οποίο κρίνεται η συνολική ποιότητα της βιομηχανίας. Περιλαμβάνει όλες εκείνες τις δραστηριότητες σχεδιασμού, οργάνωσης και ελέγχου που υπάγονται στη διασφάλιση της ποιότητας. Αυτές είναι:

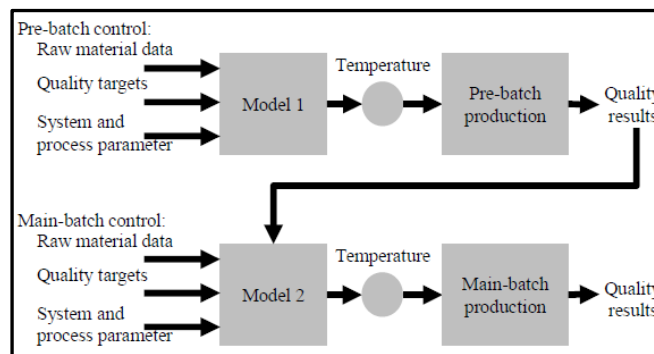
- **Ποιοτικός Σχεδιασμός (Quality Planning):** Εστιάζει στον καθορισμό ποιοτικών στόχων και των απαιτούμενων διαδικασιών προκειμένου να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί σωστά μιας διαδικασία.
- **Ποιοτικός Έλεγχος (Quality Control):** Αφορά τον έλεγχο τήρησης και εφαρμογής της απαιτούμενης ποιότητας μιας διαδικασίας.
- **Διασφάλιση Ποιότητας (Quality Assurance):** Αποτελεί τις απαιτήσεις που πρέπει να εκπληρωθούν για την ύπαρξη της απαιτούμενης ποιότητας.
- **Βελτίωση Ποιότητας (Quality Improvement):** Αφορά το σύνολο των ενεργειών βάση των οποίων αυξάνεται η ικανότητα εκπλήρωσης της ποιότητας σε μια διαδικασία.

Ανεξαρτήτως πεδίου εφαρμογής, η ποιότητα, δεν πρέπει να θεωρείται από τους οργανισμούς μόνο ως ένα απλό εργαλείο παρακολούθησης, αλλά κυρίως ως ένας μηχανισμός πρόβλεψης σφαλμάτων, με σκοπό την αποτροπή τους και την επίλυση τους σε περίπτωση που συμβούν. Όντας σε μια συνεχώς μεταβαλλόμενη πραγματικότητα γεμάτη τεχνολογικές εξελίξεις, νέα προϊόντα και συνεχή ανταγωνισμό, η ύπαρξη ενός καλά εφαρμοσμένου συστήματος ελέγχου ποιότητας βελτιώνει σημαντικά την οργάνωση της βιομηχανίας, παρέχοντας ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην αγορά.

Με την εμφάνιση της 4ης βιομηχανικής επανάστασης, η διαχείριση της ποιότητας έχει εξελιχθεί μέσω της χρήσης ευφυών ηλεκτρονικών διατάξεων, ωστόσο υπάρχουν αρκετές προκλήσεις στο πεδίο εφαρμογής της, μιας και αποτελεί μια νέα αναπτυσσόμενη τεχνολογία

Αρχικά παρουσιάζεται μια εφαρμογή μηχανικής εκμάθησης για έλεγχο της παραγωγής προϊόντων κατά παρτίδες (**application of machine learning for product batch-oriented**

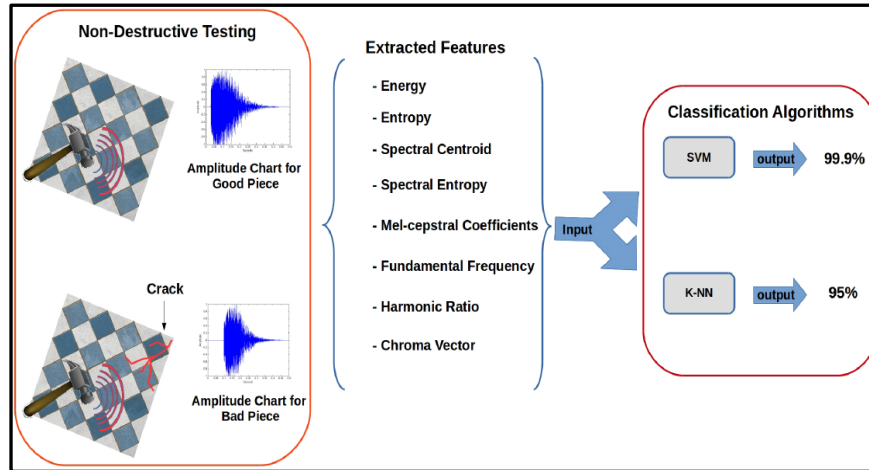
**control of production processes)** [78]. Σε αυτό το έργο αναπτύσσεται ένα σύστημα ελέγχου παρτίδας δύο σταδίων βασισμένο σε μηχανικής εκμάθησης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, εστιάζοντας στην τελική ποιότητα του προϊόντος. Επιπλέον, αναφέρεται ότι ορισμένες προσεγγίσεις με προσανατολισμό στον έλεγχο παρτίδων είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANN), η τεχνική «Support Vector Machine - SVM» και τα μοντέλα «Partial Least Squares - PLS». Όπως απεικονίζεται στο **Εικόνα 3.8**, αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο μοντέλα μηχανικής μάθησης, ένα για τον έλεγχο πριν από την παρτίδα (pre-batch control) και το άλλο για τον έλεγχο της κύριας παρτίδας (main batch control).



**Εικόνα 3.8** Αρχιτεκτονική ελέγχου παραγωγής παρτίδων δύο σταδίων [78]

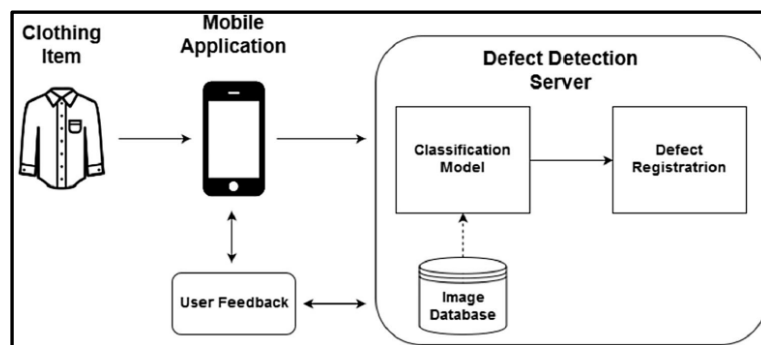
Όσον αφορά τις τεχνικές ποιοτικού ελέγχου στη βιομηχανική παραγωγή, μια άλλη πτυχή είναι οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (Non-Destructive Testing - NDT). Παράδειγμα αποτελεί η παρακάτω εφαρμογή που συνδυάζει **τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου και μηχανική μάθηση για ποιοτικό έλεγχο (non-destructive testing and machine learning for quality control)** [80]. Αυτό το έργο επικεντρώνεται στην ανίχνευση ανομοιογένειας και βλαβών σε προϊόντα και πιο συγκεκριμένα σε κεραμικά πλακίδια, μέσω δοκιμών ακουστικής εκπομπής (acoustic emission testing) (**Εικόνα 3.9**). Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε τεχνικές ταξινόμησης (classification), όπως η «Support Vector Machine - SVM» και η τεχνική «k-Nearest Neighbours». Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει γρήγορη απόκριση, ενώ είναι κατάλληλη για μεταλλικά, ξύλινα ή κεραμικά υλικά.





Εικόνα 3.9 Ποιοτικός έλεγχος, μέσω δοκιμών ακουστικής εκπομπής [80]

Επιπλέον, προτείνεται μια προσέγγιση **μηχανικής μάθησης για τη βιομηχανία ενδυμάτων (ML approach for clothing industry)** [81]. Σε αυτή την εφαρμογή (Εικόνα 3.10) αναπτύσσεται ένα σύστημα ταξινόμησης ποιοτικού ελέγχου, το οποίο εξετάζει την ποιότητα των υλικών παραγωγής και ελέγχει για τυχόν σφάλματα κατά την κατασκευή, παρακολουθώντας τα μέσω κάμερας. Πιο συγκεκριμένα, ως μέθοδος ταξινόμησης χρησιμοποιούνται τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Network - CNN). Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε ένα σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων που τροφοδοτεί ένα δυαδικό μοντέλο ταξινόμησης προκειμένου να εφαρμόσει την ταξινόμηση ποιότητας. Το σύστημα αυτό είναι σε θέση να ταξινομήσει τα παραγόμενα κλωστοϋφαντουργικά αντικείμενα ανάλογα με την ποιότητά τους, ενώ το συγκρίνει με ένα πρωτότυπο αναφοράς.



Εικόνα 3.10 Αρχιτεκτονική ποιοτικού ελέγχου στον τομέα κατασκευής ενδυμάτων [78]

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται ορισμένες μεθοδολογίες και έννοιες, που μπορούν να εφαρμοστούν στην έξυπνη βιομηχανία προκειμένου να διασφαλιστεί ο ποιοτικός έλεγχος που εστιάζεται κυρίως στην παραγωγική διαδικασία. Τα βασικά θέματα που παρουσιάζονται αφορούν: την παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων (Zero-Defect

Manufacturing), την ευφυή μετρολογία (Smart Metrology) και την υπολογιστική όραση (Computer Vision).

### 3.2.1. Εφαρμογές παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων – Zero-defect Manufacturing

Η ιδέα της παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων (Zero-Defect Manufacturing), επικεντρώνεται στη σχεδόν ολοκληρωτική μείωση σφαλμάτων στη βιομηχανική παραγωγή. Είναι σαφές ότι στο πλαίσιο αυτό μπορεί να βελτιωθεί και να επωφεληθεί πολλαπλά η βιομηχανία [82], [83].

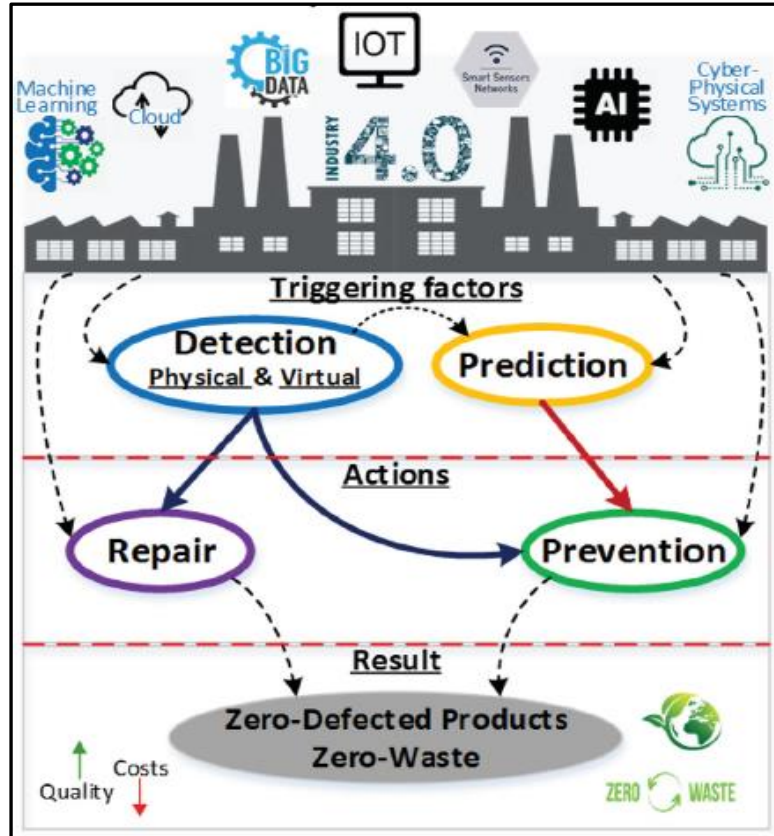
Υπάρχουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά σχετικά με την παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων, όσον αφορά την εφαρμογή, και τη σύνθεσή τους. Έτσι διακρίνεται ως:

- **Προσανατολισμένη στο παραγόμενο προϊόν (Product orientated)**, όπου επικεντρώνεται σε σφάλματα ποιότητας κατασκευής και προσπαθεί να τα διορθώσει
- **Προσανατολισμένη στην παραγωγική διαδικασία (Process orientated)**, όπου επικεντρώνεται στα σφάλματα αι λάθη που συμβαίνουν κατά την παραγωγή και συνδέεται πλήρως με την προγνωστική συντήρηση.

Επιπλέον, αποτελείται από ορισμένα βασικά στοιχεία, που είναι σημαντικό να εφαρμόζονται σε όλες τις διαφορετικές βιομηχανικές διεργασίες. Αυτά περιγράφονται παρακάτω και απεικονίζονται στην *Εικόνα 3.11*:

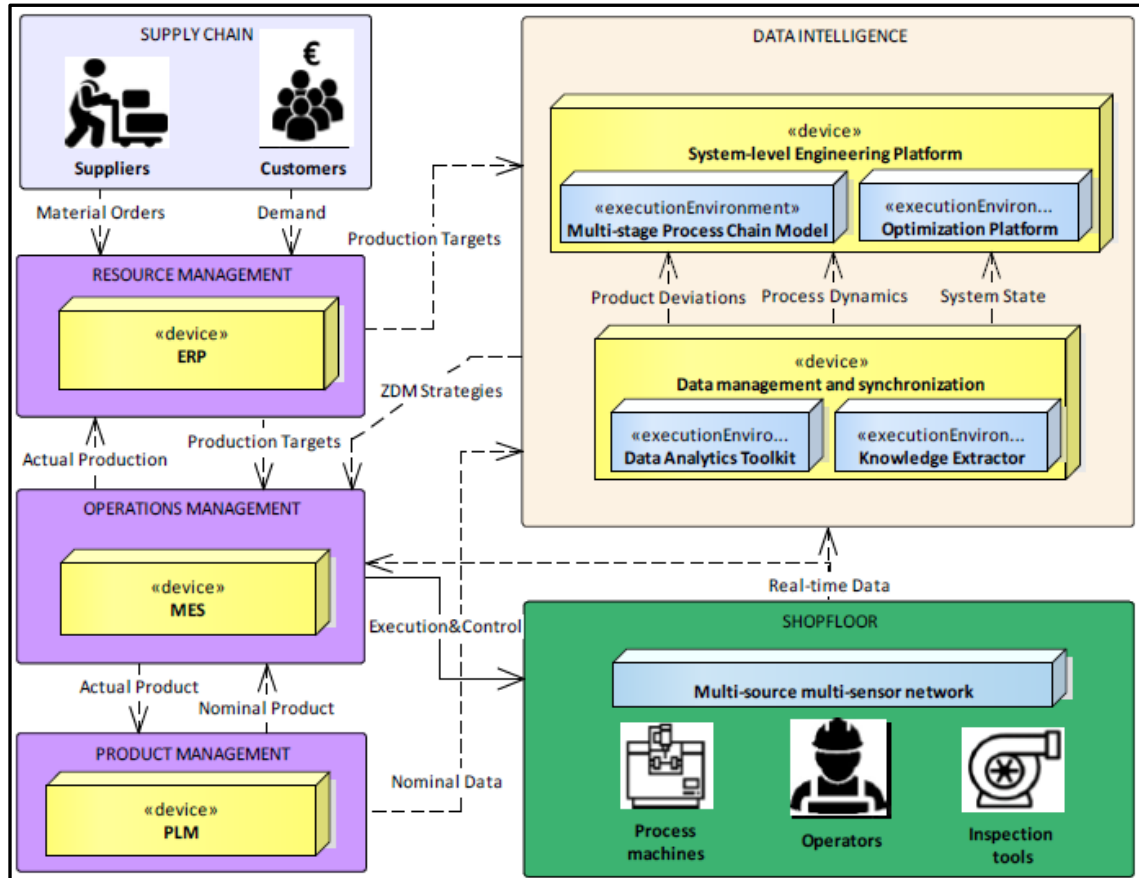
- **Ανίχνευση ελαττωμάτων και αποκατάσταση τους (Defect detection and Reparation)**: Η πιο σημαντική παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει ολόκληρη την παραγωγή είναι η έγκαιρη ανίχνευση μιας δυσλειτουργίας. Όταν προκύψει σφάλμα, εντοπίζεται αμέσως μέσω αισθητήριων ενδείξεων και η διαδικασία αποκατάστασης ξεκινά άμεσα.
- **Πρόβλεψη και πρόληψη ελαττωμάτων (Defect prediction and Prevention)**: Όλα τα δεδομένα και οι πληροφορίες που συνδέονται με μια δυσλειτουργία στην παραγωγή συλλέγονται και αποστέλλονται σε έναν αλγόριθμο πρόβλεψης ελαττωμάτων, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντική πρόβλεψη σφαλμάτων. Φυσικά, τα σφάλματα που εντοπίζονται στη διαδικασία παραγωγής δεν είναι εύκολο να αποφεύγονται πάντα. Αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί να συσχετίζονται με περαιτέρω μικρότερα σφάλματα, τα οποία έχουν εξαπλωθεί περαιτέρω στην παραγωγή, λόγω της μη άμεσης ανίχνευσής τους. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά, είναι επίσης σημαντικό να εφαρμόζονται πολιτικές ελέγχου ποιότητας.

- Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι το **περιβάλλον αλληλεπίδρασης (interaction environment)** μεταξύ όλων των παραπάνω, προκειμένου να υπάρχει ομαλή συνεργασία και λειτουργία.



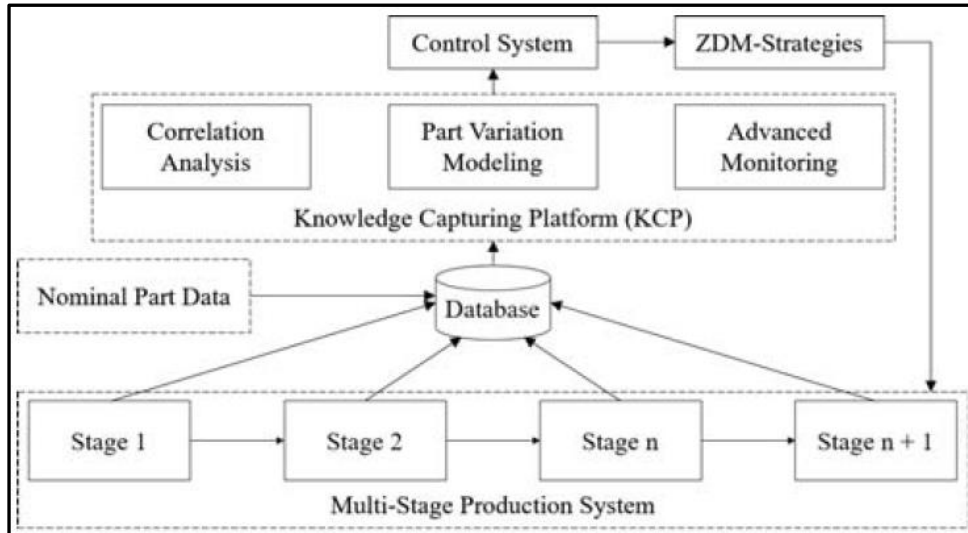
Εικόνα 3.11 Αρχιτεκτονική παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων [83]

Μια αρχιτεκτονική για την εφαρμογή στρατηγικών παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων (ZDM) παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.12* [84]. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας της παραγωγής και αποτελείται από τρία επίπεδα, ένα επίπεδο συλλογής δεδομένων (data gathering layer), ένα επίπεδο διαχείρισης δεδομένων και συγχρονισμού (data management and synchronization layer) και μια πλατφόρμα συστήματος (system engineering platform) για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της παραγωγής.



Εικόνα 3.12 Αρχιτεκτονική εφαρμογής στρατηγικών παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων [84]

Επιπλέον, αναφέρεται μια πλατφόρμα συλλογής γνώσεων για συστήματα πολλαπλών σταδίων παραγωγής με στόχο την εφαρμογή στρατηγικών παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων (knowledge capturing platform in multi-stage production systems for zero-defect manufacturing) [82]. Αυτή η πλατφόρμα (Εικόνα 3.13) έχει αναπτυχθεί σε γραφικό περιβάλλον MATLAB και αποτελείται από τρία τμήματα, ένα μοντέλο «Part Variation Model», ένα σύστημα ανάλυσης συσχέτισης (Correlation Analysis system), καθώς και από προηγμένα συστήματα παρακολούθησης της παραγωγής (Advanced Monitoring systems).



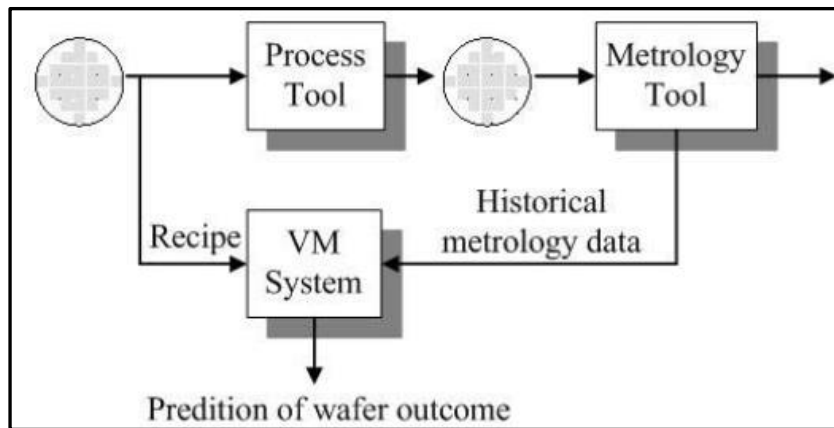
Εικόνα 3.13 Πλατφόρμα συλλογής γνώσεων για συστήματα πολλαπλών σταδίων παραγωγής [82]

Αντίστοιχα παρουσιάζεται ένα μοντέλο συστημάτων πολλαπλών σταδίων παραγωγής με στόχο την παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων (**part variation modeling in multi-stage production systems for zero-defect manufacturing**) [85]. Πρόκειται για μια πλατφόρμα που παρακολουθεί, συλλέγει μετρητικά δεδομένα κατά την παραγωγική διαδικασία, εξάγοντας γνώσεις από αυτά. Επίσης, περιλαμβάνεται ένα παραμετρικό μοντέλο, ικανό να εντοπίσει σφάλματα σε κάθε στάδιο παραγωγής. Τέλος αναφέρεται μια αντίστοιχη προσέγγιση **ανάλυσης συσχέτισης σε συστήματα παραγωγής πολλαπλών σταδίων για την επίτευξη παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων (correlation analysis methods in multi-stage production systems for reaching zero-defect manufacturing)** [86]. Πρόκειται για την ανάπτυξη μιας εφαρμογής λογισμικού ανάλυσης βάσει δεδομένων, η οποία επικεντρώνεται στην επίτευξη παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων.

### 3.2.2. Εφαρμογές ευφυούς μετρολογίας – *Smart Metrology*

Η μετρολογία είναι μια σημαντική επιστήμη στο πεδίο της ευφυούς βιομηχανίας, που στοχεύει στην εξάλειψη πιθανών αποκλίσεων από τις πραγματικές μετρήσεις. Είναι σαφές ότι η αβεβαιότητα καθώς και τα σφάλματα μέτρησης είναι δύσκολο να εξαλειφθούν εντελώς, ωστόσο είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν και να βελτιωθεί η συνολική ποιότητα παραγωγής [87].

Μια **τεχνική μετρολογίας για την παραγωγή ημιαγωγών (virtual metrology technique for semiconductor manufacturing)** παρουσιάζεται παρακάτω [88]. Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική που επικεντρώνεται στην πρόβλεψη της ποιότητας της κρυσταλλικής βάσης των ημιαγωγών (semiconductors wafer quality). Σε αυτήν την προσέγγιση έχουν χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός μεθοδολογιών νευρωνικών δικτύων όπως τα νευρωνικά δίκτυα «Piecewise Linear Neural Network - PLNN» και «Fuzzy Neural Network - FNN». Κατά τη διάρκεια της κατασκευής και μέσω του εξοπλισμού εργαλείων μετρολογίας, παρακολουθείται ολόκληρο το στάδιο παραγωγής. Με βάση ιστορικά μετρητικά δεδομένα, καθώς και την αναπτυγμένη αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων, το σύστημα είναι σε θέση να εντοπίσει τυχόν σφάλματα στον τρόπο κατασκευής τους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι μια αποτελεσματική και χαμηλού κόστους λύση.



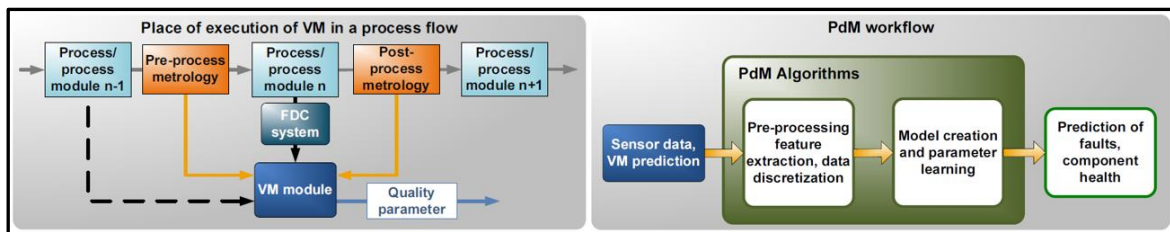
**Εικόνα 3.14** Μοντέλο ευφυούς μετρολογίας για κατασκευή ημιαγωγών [88]

Παραμένοντας στο χώρο βιομηχανικής παραγωγής ημιαγωγικών στοιχείων παρουσιάζεται μια **προσέγγιση μοντέλου ευφυούς μετρολογίας για την πρόβλεψη του μέσου πάχους φιλμ οξειδίου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ημιαγωγικών διατάξεων (virtual metrology model approach for predicting average PECVD oxide film thickness)** [89]. Σε αυτό το έργο εφαρμόζονται δύο μαθηματικά μοντέλα, το «Partial Least Squares – PLS» και το «Decision Tree Ensemble». Τα αποτελέσματα πρόβλεψης έδειξαν μεγάλη ομοιότητα σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα.

Επιπλέον, αναφέρεται μια ακόμη **τεχνική μετρολογίας για την παραγωγή ημιαγωγών (virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing)** [90]. Αυτό το έργο αφορά ένα σύστημα εποπτείας της παραγωγής και πρόβλεψης της ποιότητας της κρυσταλλικής βάσης ημιαγωγικών διατάξεων, έχοντας ως εισόδους αισθητήρια δεδομένα

από την παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό το έργο αναπτύσσονται μοντέλα πρόβλεψης μετρολογίας, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους παλινδρόμησης (regression) και εφαρμόζοντας τεχνικές εξόρυξης δεδομένων.

Επιπλέον, παρουσιάζεται μια **αρχιτεκτονική για την ενσωμάτωση της ευφυούς μετρολογίας και της προγνωστικής συντήρησης (novel framework architecture for integration of virtual metrology and predictive maintenance)** [91]. Σε αυτή την εφαρμογή επισημαίνεται το βασικό πλαίσιο του έργου "IMPROVE", το οποίο επικεντρώνεται στη βελτίωση και ανάπτυξη ημιαγωγών, τόσο με ευφυή μετρολογία και προγνωστική συντήρηση *Εικόνα 3.15*.

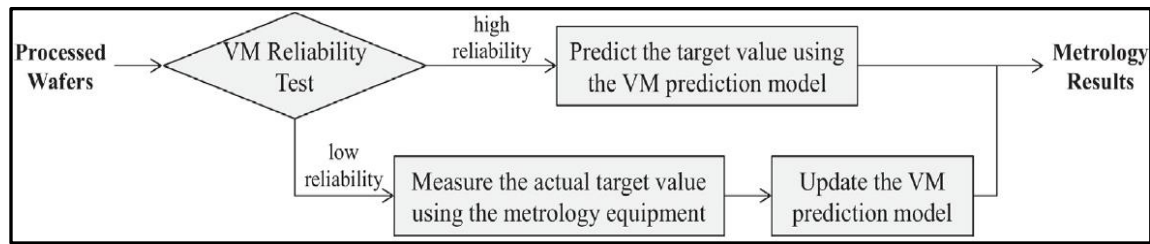


**Εικόνα 3.15** Μοντέλο ευφυούς μετρολογίας και προγνωστικής συντήρησης (IMPROVE) [91]

Όλα τα στάδια της παραγωγικής διεργασίας εποπτεύονται από μηχανισμούς μετρολογίας. Μέσω ενός συστήματος εντοπισμού σφαλμάτων και ταξινόμησης, τα δεδομένα που παρακολουθούνται οδηγούνται στην ενότητα ευφυούς μετρολογίας, όπου εφαρμόζονται στατιστικά μοντέλα για την πρόβλεψη της παραμέτρου ποιότητας της κρυσταλλικής βάσης των ημιαγωγών. Μέσω αλγορίθμων ευφυούς προγνωστικής συντήρησης, δημιουργείται το στατιστικό μοντέλο, μέσω του οποίου θα προβλεφθούν μελλοντικά πιθανά σφάλματα ή οποιεσδήποτε απαραίτητες εργασίες συντήρησης.

Μια ακόμη έρευνα παρουσιάζεται στη συνέχεια και αφορά ένα **σύστημα ευφυούς μετρολογίας για την κατασκευή ημιαγωγών (intelligent virtual metrology system with adaptive update for semiconductor manufacturing)** [92]. Η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται σε μια σύνθεση τεχνητών νευρικών δικτύων (Artificial Neural Network - ANN). Πιο συγκεκριμένα, η δομή αυτού του μοντέλου (*Εικόνα 3.16*) βασίζεται σε μια συνάρτηση αξιοπιστίας (reliability function), της οποίας σκοπός είναι να προσδιορίσει εάν το μοντέλο της εφαρμοσμένης πρόβλεψης μπορεί να οδηγήσει σε μια αξιόπιστη πρόβλεψη, καθώς και σε μια συνάρτηση ενημέρωσης (update function), η οποία χρησιμοποιείται όταν εντοπίζεται

χαμηλή πρόβλεψη στο σύστημα, ενημερώνοντας το μοντέλο πρόβλεψης. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται υψηλή ακρίβεια πρόγνωσης.



**Εικόνα 3.16** Αρχιτεκτονική ευφυούς μετρολογίας για κατασκευή ημιαγωγών [92]

### 3.2.3. Εφαρμογές υπολογιστικής όρασης – Computer Vision

Η υπολογιστική όραση (Computer Vision) είναι ένας άλλος τομέας τεχνητής νοημοσύνης [93], [94, p. 5]. Υπάρχουν διάφοροι τύποι εφαρμογών. Οι πιο συνηθισμένοι είναι:

- **Ταξινόμηση εικόνας (Image classification):** Είναι η διαδικασία κατά την οποία ταξινομείται ένας αριθμός δειγμάτων εικόνας σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Για αυτές τις εφαρμογές, μια μέθοδος AI που χρησιμοποιείται συνήθως είναι τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNN).
- **Ανίχνευση αντικειμένων (Object detection):** Είναι η διαδικασία όπου εξετάζεται ένας αριθμός δειγμάτων εικόνας για να εντοπιστεί ένας συγκεκριμένος τύπος αντικειμένου που απεικονίζεται στις εικόνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εφαρμόζονται συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks), όπως τα «Region-based Convolutional Neural Networks – RCNN» (παραδείγματος χάριν, Fast-RCNN, Faster-RCNN), καθώς και άλλες τεχνικές (You Only Look Once - YOLO, Single Shot Multibox Detector - SSD, Region-based Fully Convolutional Networks - R-FCN)
- **Παρακολούθηση αντικειμένων (Object tracking):** Σε αυτήν τη διαδικασία εντοπίζεται ένα συγκεκριμένο αντικείμενο ή αριθμός αντικειμένων και είναι σε θέση να αναγνωρίσει τη θέση του και να προσδιοριστεί η κινούμενη κατεύθυνση του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εφαρμόζονται μεθοδολογίες όπως «Stacked Auto Encoders - SAE», συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks), όπως τα «Full-Convolutional Network Tracker - FCNT» και «Multi-domain CNN».
- **Κατάτμηση εικόνων (Semantic segmentation):** Πρόκειται για μια διαδικασία όπου μια εικόνα χωρίζεται σε ομάδες pixel. Αυτές οι ομάδες pixel αντιπροσωπεύουν έναν



συγκεκριμένο τύπο αντικειμένου. Η κατάτμηση στοχεύει στην αναγνώριση κάθε στοιχείου, προκειμένου να τα ταξινομήσει σε διαφορετικές κατηγορίες (παραδείγματος χάριν, ανθρώπους, ζώα κ.α.). Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται ευρέως τα «Fully Convolutional Neural Networks». Στην κατηγορία αυτή επάγεται και η κατηγορία «instance segmentation», όπου εφαρμόζονται μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης όπως τα «Mask Region-based Convolutional Neural Networks - Mask-RCNN».

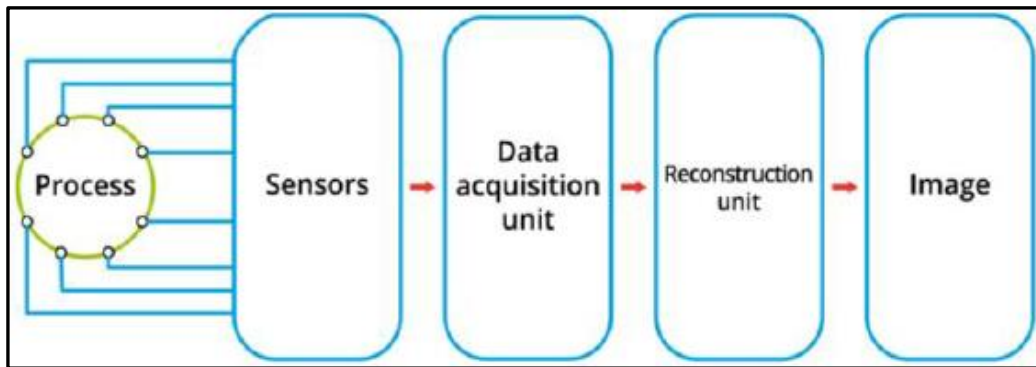
Η συνεισφορά της μηχανικής μάθησης στη βιομηχανία είναι μεγάλη. Σύμφωνα με τη μελέτη που παρουσιάζεται εδώ [93], μπορούν να εξαχθούν ορισμένα βασικά αποτελέσματα για χρήση της μηχανικής μάθησης στην υπολογιστική όραση.

- Οι **τύποι** μηχανικής μάθησης στην υπολογιστική όραση μπορεί να χαρακτηριστούν ως εποπτευόμενοι (supervised), ημι-εποπτευόμενοι (semi supervised) και χωρίς επίβλεψη (unsupervised).
- Οι **πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι** είναι τα νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks - NN), η μέθοδος συσταδοποίησης (clustering) K-means και οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine - SVM).
- Οι πιο **συνηθισμένες εφαρμογές** μηχανικής μάθησης στην υπολογιστική όραση είναι η ανίχνευση αντικειμένων (object detection), η ταξινόμηση (classification) και η πρόβλεψη (prediction), καθώς και η εξαγωγή και επεξεργασία πληροφοριών και χαρακτηριστικών από διαφορετικές πηγές δεδομένων (δηλαδή, κείμενο, επεξεργασία εικόνας, ανάλυση βίντεο)
- Η **εφαρμογή** της υπολογιστικής όρασης στον **τομέα της βιομηχανίας** αντιστοιχεί περίπου στο 12%, της συνολικής εφαρμογής της και επικεντρώνεται κυρίως στην προγνωστική συντήρηση.

Όσον αφορά τις τεχνικές υπολογιστικής όρασης που εφαρμόζονται στην ευφυή βιομηχανία, μελετώνται διάφορα σχετικά έργα. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα **σύστημα ελέγχου ποιότητας για την απόκτηση δεδομένων μέσω επεξεργασίας εικόνας (quality control system for data acquisition and image reconstruction with smart hybrid electrical capacitance tomography - ECT device)** [95]. Πρόκειται για ένα σύστημα μέτρησης βασισμένο σε αισθητήρες που εστιάζει στη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο

ποιότητας μέσω ενός αισθητήρα τομογραφίας ηλεκτρικής χωρητικότητας (Electrical Capacitance Tomography - ECT). Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.17*.

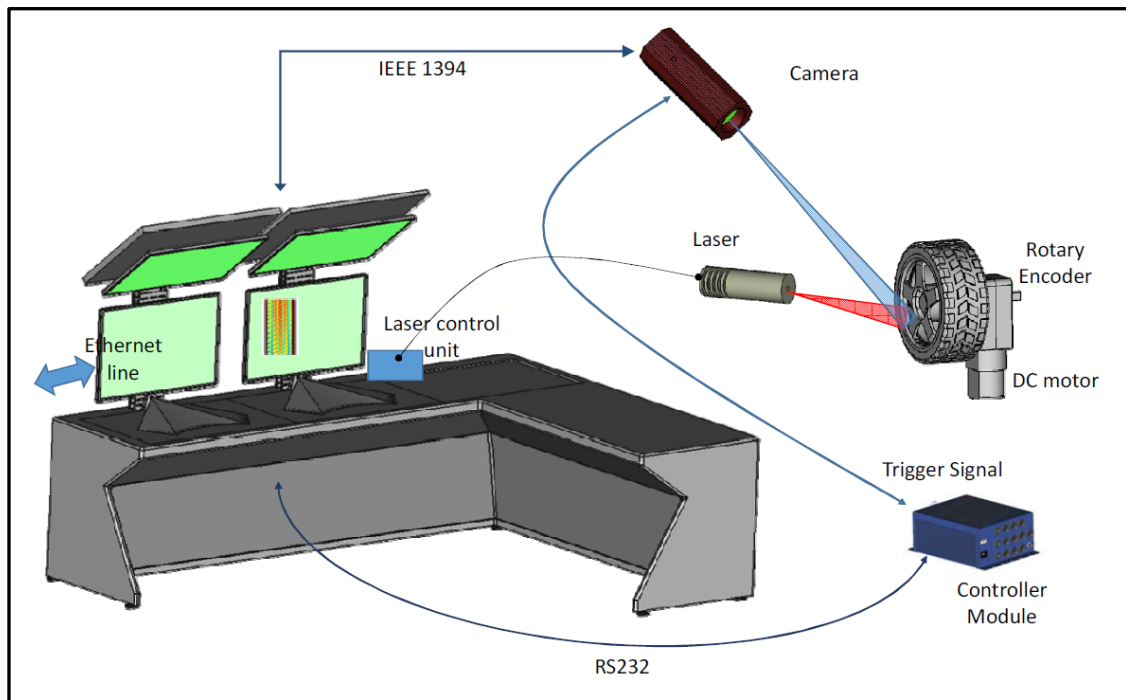
Η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν σύστημα απόκτησης δεδομένων (data acquisition equipment), τον αισθητήρα ECT, από ένα δίκτυο επικοινωνίας (network infrastructure) και έναν υπολογιστή. Ο αισθητήρας απεικονίζει το εσωτερικό του εξεταζόμενου στοιχείου και μέσω του δικτύου συνδέεται με τον υπολογιστικό εξοπλισμό. Ταυτόχρονα, η συσκευή του υπολογιστή μπορεί να λάβει και να επεξεργαστεί όλα τα εισερχόμενα δεδομένα, αναδομώντας την εικόνα σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιώντας την επαναληπτική τεχνική «Levenberg-Marquardt Algorithm», μπορεί να αφαιρεθεί ένα σημαντικό ποσοστό θορύβου στις μετρήσεις, προκειμένου να βελτιωθεί η επεξεργασία αναδόμησης της εικόνας. Έτσι εξάγονται σημαντικά αποτελέσματα που αφορούν στον έλεγχο της ποιότητας και της δομής των παραγόμενων υλικών.



**Εικόνα 3.17** Επεξεργασία εικόνας με αισθητήρα τομογραφίας ηλεκτρικής χωρητικότητας [95]

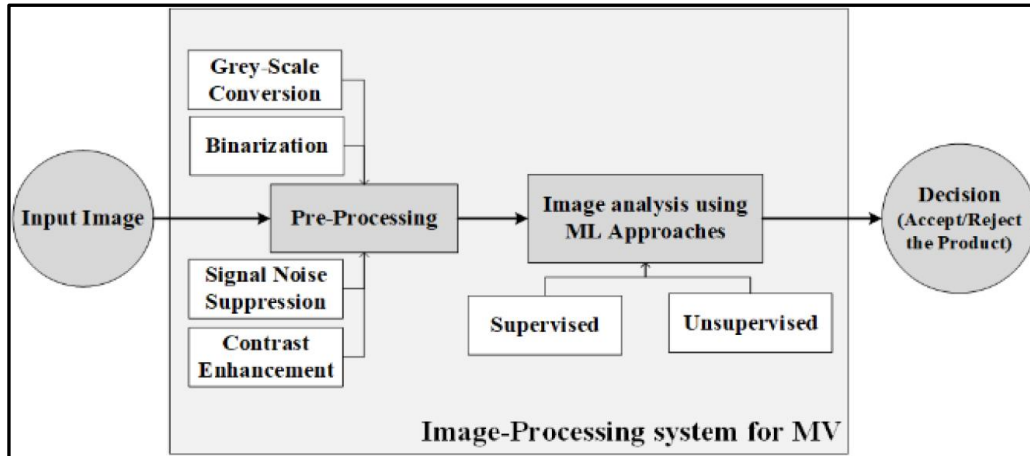
Μια τεχνική **οπτικής παρακολούθησης της ποιότητας στην αυτοκινητοβιομηχανία (inline image vision technique for quality and defect monitoring in Industry 4.0)** παρουσιάζεται στη συνέχεια [96]. Σε αυτό το έργο (*Εικόνα 3.18*) χρησιμοποιείται ένα σύστημα κάμερας με λέιζερ, το οποίο ελέγχει την ακριβή θέση του εξεταζόμενου αντικειμένου κατά τη διαδικασία παραγωγής. Μέσω αυτής της υπολογιστικής όρασης γίνεται ταξινόμηση των εξαγόμενων δεδομένων, ενώ ακολουθεί η τρισδιάστατη ανάλυση της εικόνας του αντικειμένου για πιθανή ανίχνευση ελαττωμάτων. Η έρευνα αυτή επικεντρώνεται κυρίως στην ποιότητα παραγωγής των ελαστικών αυτοκινητοβιομηχανίας και πιο συγκεκριμένη στην εποπτεία της συναρμολόγησης μεταξύ ελαστικών και τροχών. Είναι σε θέση να εντοπίσει σφάλματα όπως παραμορφωμένο σχήμα, ρωγμές ή άλλες ανομοιογένειες, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ταξινόμησης «K-Means». Το έργο αυτό είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ποιοτικού ελέγχου, ωστόσο μπορεί να χρειαστεί

περαιτέρω βελτιστοποίηση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα βιομηχανικά περιβάλλοντα.



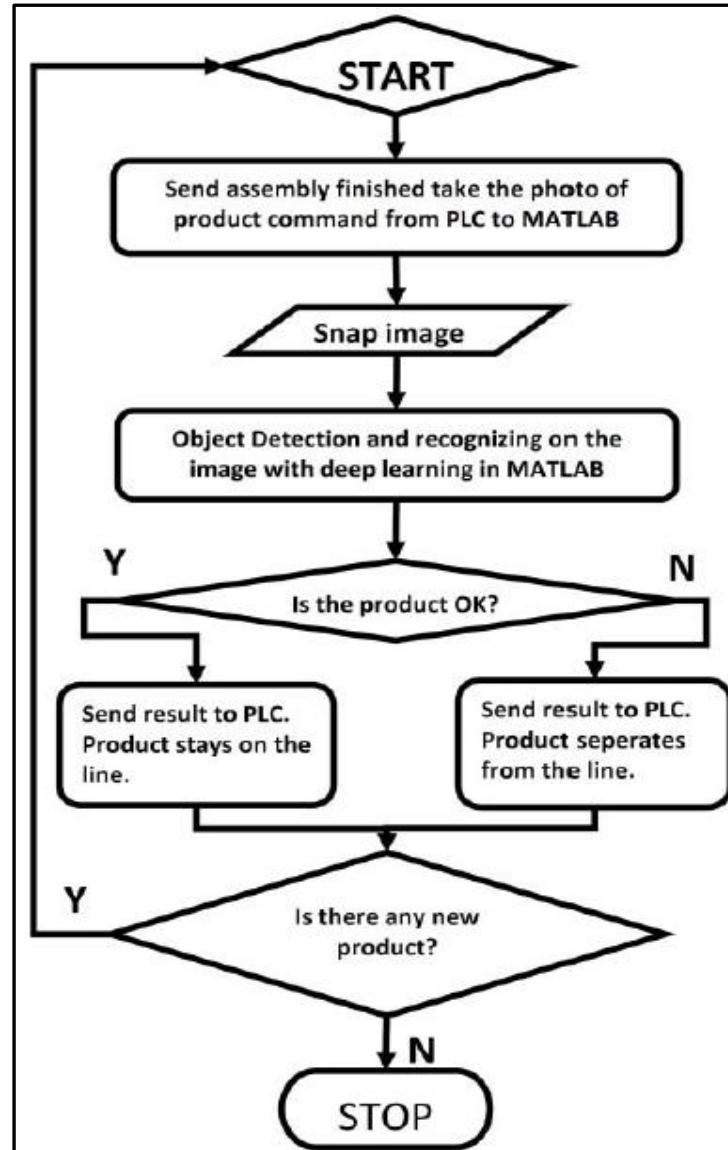
Εικόνα 3.18 Υπολογιστική όραση στον έλεγχο ποιότητας ελαστικών αυτοκινητοβιομηχανίας [96]

Επιπλέον, περιγράφεται ένα άλλο έργο (Εικόνα 3.19) σχετικά με την **οπτική επιθεώρηση ποιότητας προϊόντων σε έξυπνες βιομηχανίες με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης (product quality visual inspection toward smart industries using AI methods)** [10]. Σε αυτήν την έρευνα αναπτύχθηκε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα τεχνητής όρασης με σκοπό την επίβλεψη και την εξάλειψη των ελαττωμάτων ενός προϊόντος κατά τη διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης (Εικόνα 3.19). Η διαδικασία ξεκινάει με τη λήψη εικόνας του προϊόντος, ενώ έπειτα ακολουθεί η προ επεξεργασία της προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της (δηλαδή, βελτίωση αντίθεσης, αποθορύβωση κ.α.). Έπειτα, η εικόνα αναλύεται μέσω εποπτευόμενων (supervised) και μη εποπτευόμενων (unsupervised) τεχνικών ταξινόμησης (classification) μηχανικής μάθησης (δηλαδή, νευρωνικά δίκτυα και «Support Vector Machine») και τέλος εξάγεται η λήψη αποφάσεων σχετικά με την ποιότητα του προϊόντος. Τέλος, ακολουθεί το αποτέλεσμα που καταλήγει στην απόφαση αποδοχής ή απόρριψης του προϊόντος. Η έρευνα αυτή αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της ποιότητας και της παραγωγής σε μια αυτοκινητοβιομηχανία. Αυτό σημαίνει ότι η προτεινόμενη προσέγγιση θα χρειαστεί πιθανώς τροποποιήσεις για να εφαρμοστεί και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.



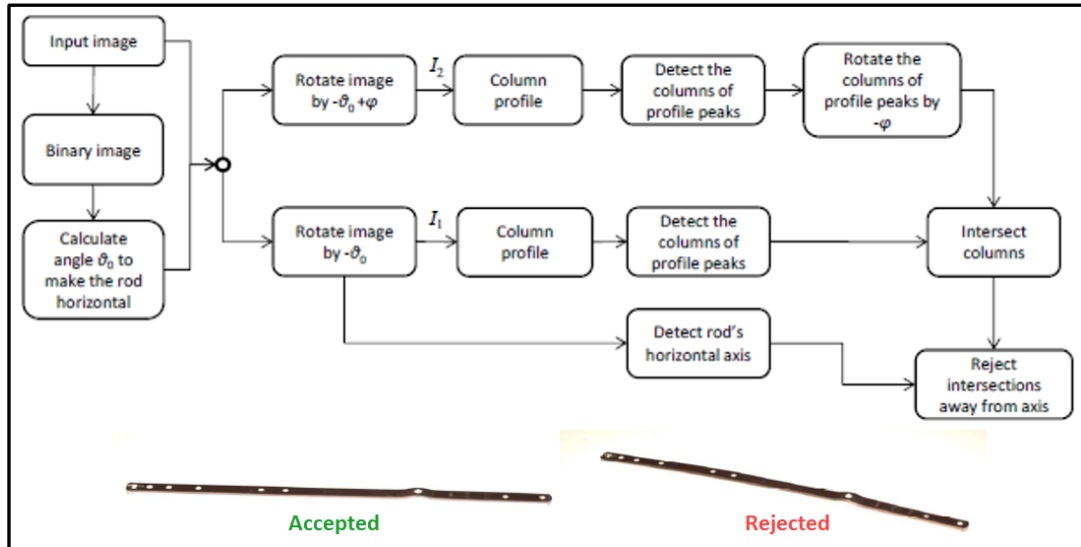
Εικόνα 3.19 Αρχιτεκτονική υπολογιστικής όρασης για έλεγχο ποιότητας προϊόντος [10]

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται μια εφαρμογή ελέγχου οπτικής ποιότητας σε ένα έξυπνο εργοστάσιο χρησιμοποιώντας μεθόδους βαθιάς μάθησης (**visual quality control application on a smart factory prototype by using deep learning methods**) [97]. Σε αυτό το έργο εφαρμόζεται οπτικός ποιοτικός έλεγχος μέσω κάμερας που παρακολουθεί τα προϊόντα σε μια γραμμή συναρμολόγησης. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει μια κάμερα στο τέλος της γραμμής συναρμολόγησης, η οποία απεικονίζει κάθε παραγόμενο αντικείμενο. Στη συνέχεια, η εικόνα μεταφέρεται στο λογισμικό MATLAB, όπου ξεκινά η εξαγωγή πληροφοριών. Η διαδικασία ξεκινά με μια τεχνική μηχανικής μάθησης και πιο συγκεκριμένα μέσω ενός αλγορίθμου ανίχνευσης αντικειμένων βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα. Έπειτα με την εφαρμογή τεχνικών βαθιάς μάθησης «Recurrent Neural Network», «You Only Look Once» εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος αναγνώρισης αντικειμένων για τον διαχωρισμό των ελαττωματικών προϊόντων με τη διαδικασία της ταξινόμησης (classification). Στη συνέχεια, τα ταξινομημένα αποτελέσματα αποστέλλονται σε ένα PLC, το οποίο χειρίζεται τη γραμμή συναρμολόγησης και, τελικά, τα ελαττωματικά προϊόντα απορρίπτονται (Εικόνα 3.20). Συνοψίζοντας, αυτή η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι με την εφαρμογή ενός μεγαλύτερου συνόλου δεδομένων, ο έλεγχος ποιότητας της οπτικής επιθεώρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προϊόντα με υψηλή πολυπλοκότητα. Επιπλέον, ο έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί παράλληλα της γραμμής συναρμολόγησης σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας έτσι έναν ταχύτερο και πιο αποτελεσματικό τρόπο παραγωγής.



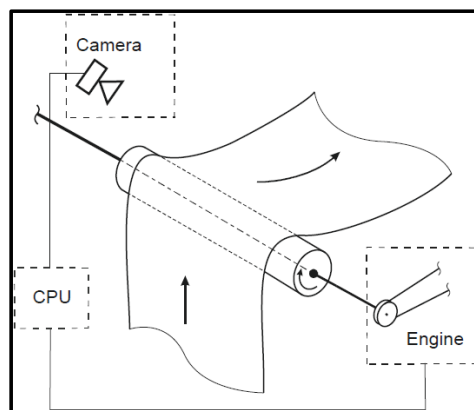
Εικόνα 3.20 Διάγραμμα ροής οπτικού ποιοτικού ελέγχου [97]

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσέγγιση ενός **αλγόριθμου για ποιοτικό έλεγχο της βιομηχανικής παραγωγής μέσω επεξεργασίας εικόνας (real time measurements algorithm for quality control of industrial manufacturing via image processing)** [98]. Αυτή η μέθοδος προτείνεται για τη μέτρηση καμπυλότητας μηχανικών αντικειμένων, και πιο συγκεκριμένα για μεταλλικές ράβδους (*Εικόνα 3.21*), προκειμένου να ελεγχθεί εάν το προϊόν είναι αποδεκτό ή όχι για τη γραμμή παραγωγής. Αυτό το έργο αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περιοχή παραγωγής, και πιθανώς δεν μπορεί να εφαρμοστεί ευκολά σε κάποια άλλη βιομηχανική εφαρμογή.



Εικόνα 3.21 Ποιοτικός έλεγχος μεταλλικών ράβδων [98]

Επιπλέον, αναφέρεται ένα **αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου των ποιοτικών παραμέτρων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (automated control system of textile product parameters that uses computer vision)** [99]. Πιο συγκεκριμένα είναι μια εφαρμογή στη βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας και προτείνεται για ανίχνευση ποιοτικών ελαττωμάτων μεταξύ των εγκάρσιων νημάτων του παραγόμενου υφάσματος (Εικόνα 3.22).



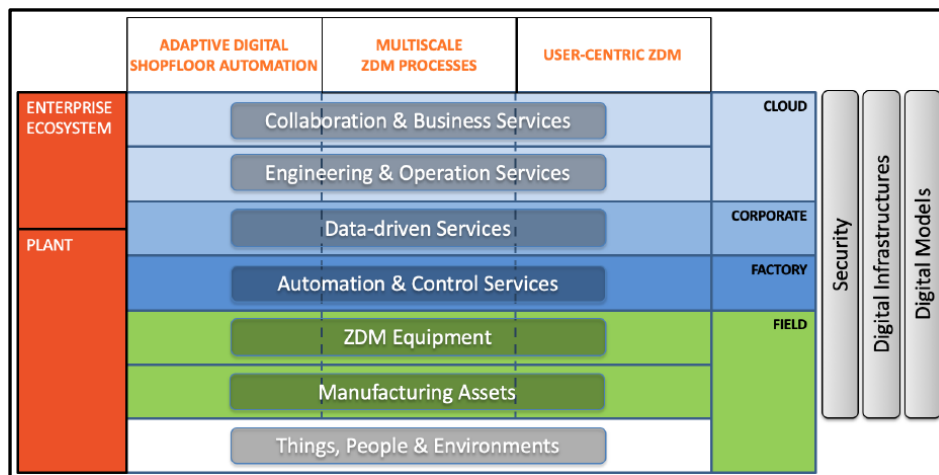
Εικόνα 3.22 Ποιοτικός έλεγχος κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων [99]

Η αρχιτεκτονική αυτής της εφαρμογής βασίζεται σε έναν μικροϋπολογιστή [Raspberry pi](#), μια κάμερα δικτύου (web camera) και σε ένα αλγόριθμο υπολογισμού απόστασης κατασκευασμένο σε περιβάλλον Python ([OpenCV](#)). Προκειμένου να προσδιοριστούν οι γεωμετρικές διαστάσεις των κενών μεταξύ των προϊόντων (δηλαδή, εγκάρσια νήματα), τα μεγέθη και η πυκνότητα της σύνθεσής τους, εφαρμόζεται μια τεχνική υπολογιστική όρασης με τη μέθοδο της ταξινόμησης (classification).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΦΥΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ορισμένα ευρωπαϊκά έργα που παρουσιάζονται στην Ερευνητική Ένωση Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος (European Factories of the Future Research Association - EFFRA).

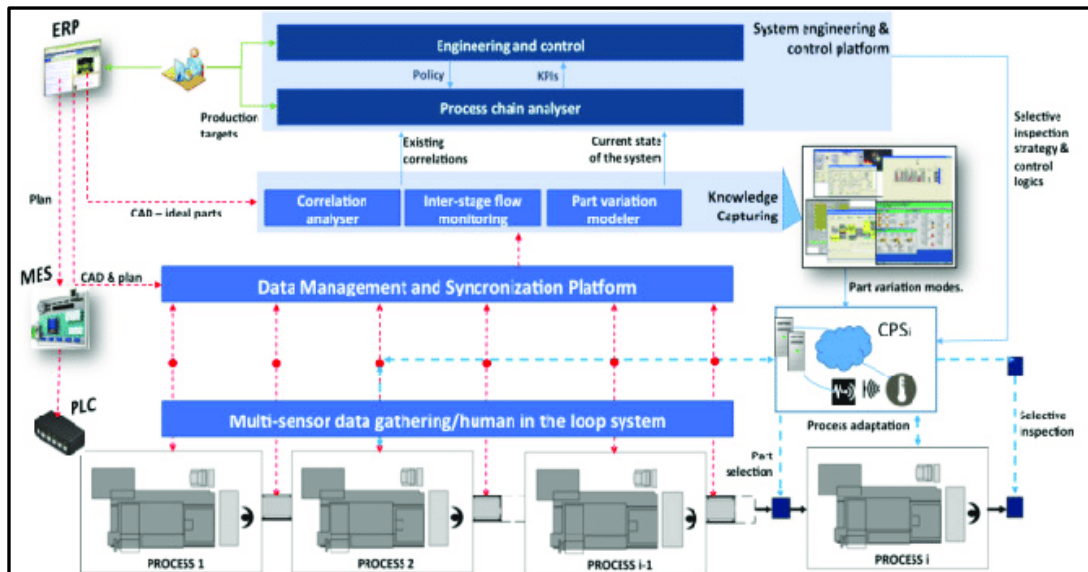
**QU4LITY:** Είναι ένα ευρωπαϊκό έργο με επίκεντρο τη βιομηχανία 4ης γενιάς (Industry 4.0). Το έργο αυτό ο εστιάζει στην ποιότητα παραγωγής και στην αποσφαλμάτωση της. Ο κύριος σκοπός του είναι η ανάπτυξη ενός αυτόνομου ποιοτικού μοντέλου για την επίτευξη μηδενικών σφαλμάτων σε όλες τις φάσεις κατά το στάδιο παραγωγής μικρομεσαίων βιομηχανιών. Η αρχιτεκτονική του έργου αυτού αποτυπώνεται στην *Εικόνα 4.1*. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα που θα επιτευχθούν είναι η αύξηση της λειτουργικής και ενεργειακής απόδοσης, η εξάλειψη της διάδοσης σφαλμάτων στη γραμμή παραγωγής, η βελτίωση της εμπειρίας των πελατών και η εισαγωγή νέων επιχειρηματικών μοντέλων[101]–[104].



**Εικόνα 4.1** Αρχιτεκτονική του έργου QU4LITY [102]

**ForZDM:** Ο στόχος αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη εργαλείων για την υποστήριξη της παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων στη βιομηχανία. Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής γίνεται εφικτή η διάγνωση σφαλμάτων πριν συμβούν, χρησιμοποιώντας προληπτικούς και διορθωτικούς μηχανισμούς με ενέργειες ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Το μοντέλο αναφοράς του έργου αυτού βρίσκεται στην *Εικόνα 4.2*. Το κύριο αναμενόμενο αποτέλεσμα αυτής της μεθοδολογίας είναι η επίτευξη σχεδόν μηδενικού επιπέδου

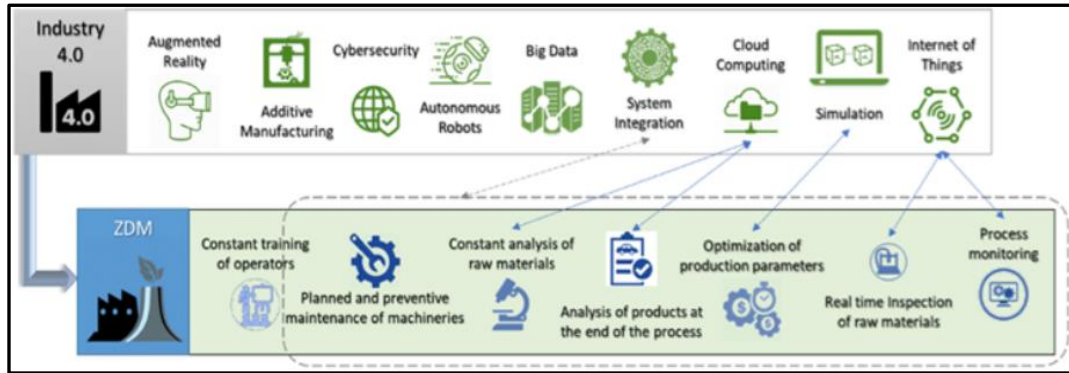
σφαλμάτων σε όλους τους ευρωπαϊκούς κατασκευαστικούς τομείς, δίνοντας έμφαση στην παραγωγή ανταλλακτικών υψηλής αξίας και υψηλής απόδοσης [105], [106].



Εικόνα 4.2 Μοντέλο αναφοράς του έργου ForZDM [105]

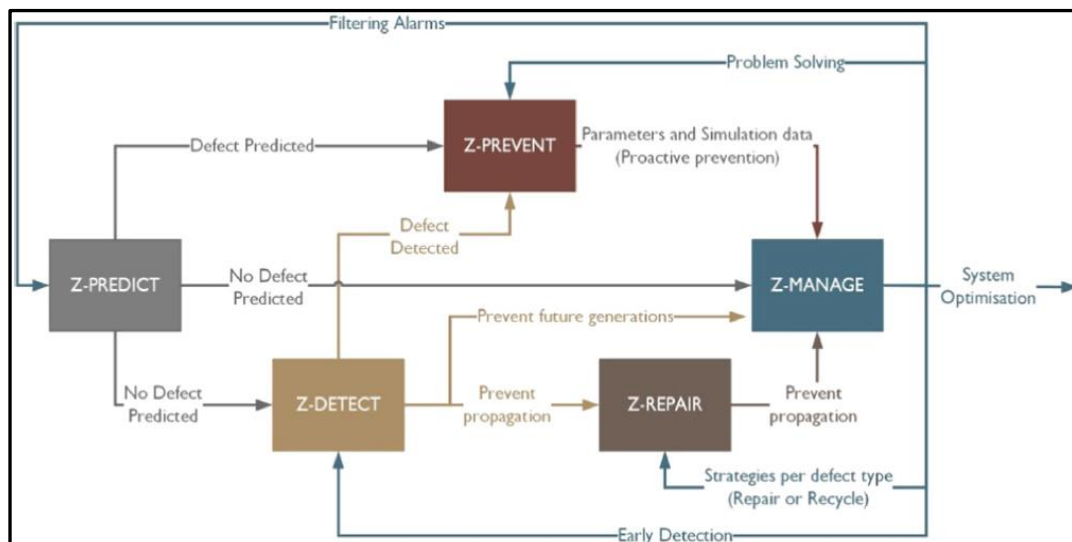
**STREAM-0D:** Αυτό το έργο στοχεύει στην επίτευξη παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων, μειώνοντας τη μεταβλητότητα των παραγόμενων προϊόντων και αυξάνοντας την ευελιξία παραγωγής, μέσω ενός καινοτόμου συστήματος ελέγχου, που βρίσκεται ενσωματωμένο στις γραμμές παραγωγής. Τα ειδικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, όπως οι διαστάσεις και τα υλικά κατασκευής ενδέχεται να διαφέρουν μεταξύ των γραμμών παραγωγής μιας βιομηχανίας. Αυτό καθιστά ολόκληρη την παραγωγή επιρρεπή σε σφάλματα, επηρεάζοντας αρνητικά την ευελιξία της ροής και της διάρκειας της παραγωγής, και την ποιότητα των προϊόντων. Αυτό το πρόβλημα καταφέρνει να λύσει το STREAM-0D. Χρησιμοποιώντας μοντέλα προσομοίωσης, από δεδομένα μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, το STREAM-0D επιτρέπει την πρόβλεψη της ποιότητας του προϊόντος. Μέσω αυτών των μοντέλων, οι εργαζόμενοι μπορούν να ελέγχουν τα κρίσιμα σημεία της παραγωγής προκειμένου να προσαρμόσουν το προϊόν στις ακριβείς προδιαγραφές σχεδιασμού ή να αλλάξουν γρήγορα τις προδιαγραφές για την παραγωγή προσαρμοσμένων παρτίδων. Στην *Εικόνα 4.3* παρουσιάζονται μερικές από τις τεχνολογίες αιχμής που χρησιμοποιούνται σε αυτό το έργο. Ως αποτέλεσμα, αναμένεται η ενίσχυση της αποδοτικότητας της παραγωγής, καθώς και η υψηλή εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος για τη βιομηχανία [107].





Εικόνα 4.3 Τεχνολογίες που βρίσκουν εφαρμογή στο έργο STREAM-0D [107]

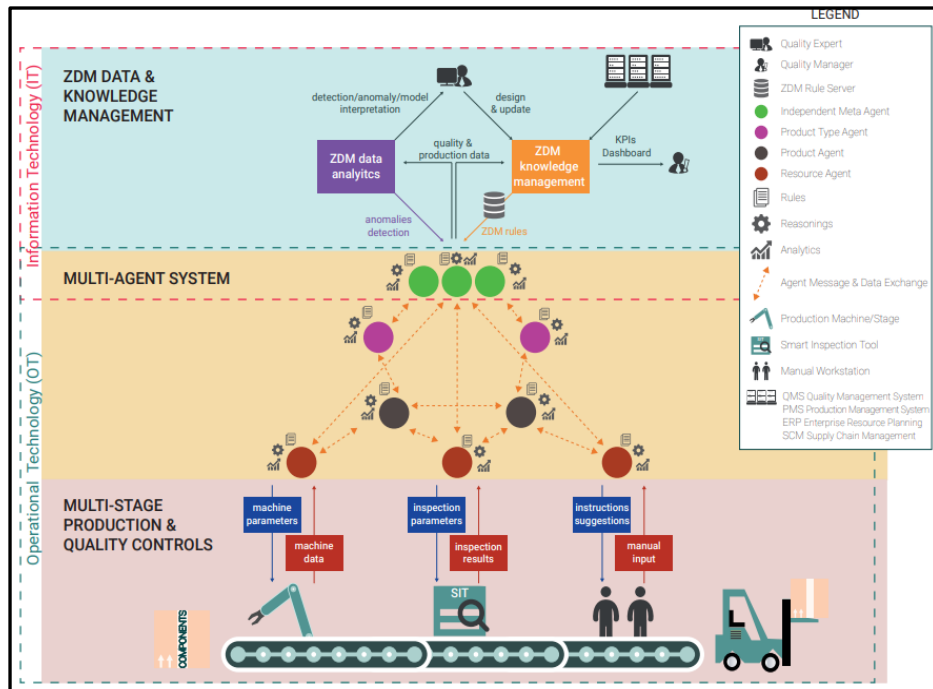
**Z-Factor:** Το έργο αυτό έχει αναπτυχθεί για να προσφέρει στρατηγικές παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων κατά το στάδιο της παραγωγής. Όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.4*, αποτελείται από πέντε βασικές στρατηγικές παραγωγής πολλαπλών σταδίων, Z-PREVENT (πρόληψη σφάλματος), Z-PREDICT (πρόβλεψη σφάλματος), Z-DETECT (εντοπισμός σφάλματος), Z-REPAIR (επισκευή σφάλματος) και Z-MANAGE (διαχείριση παραγωγής και λήψη αποφάσεων) [108], [109].



Εικόνα 4.4 Αρχιτεκτονική του έργου Z-FACTOR [109]

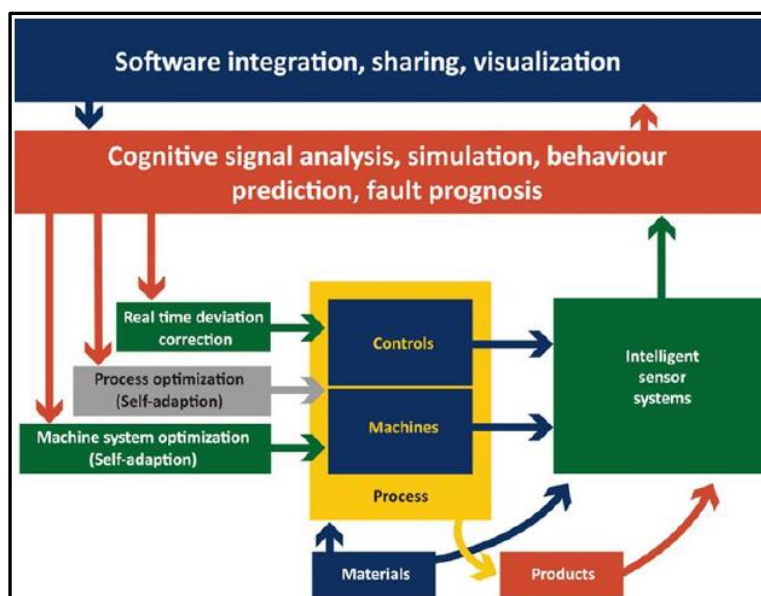
**GOODMAN:** Το έργο αυτό αποσκοπεί στον ποιοτικό έλεγχο της βιομηχανικής παραγωγής. Βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική κατακεκομμένου συστήματος αποτελούμενη από έξυπνα εργαλεία και πράκτορες (agents) (*Εικόνα 4.5*). Ο στόχος του έργου αυτού είναι η συνολική βελτίωση της ποιότητας της βιομηχανικής παραγωγής, παρέχοντας σε μια ευρεία ποικιλία

βιομηχανιών, μια αρχιτεκτονική συστήματος που μπορεί να συνεισφέρει στη εξάλειψη κατασκευαστικών ελαττωμάτων[110], [111].



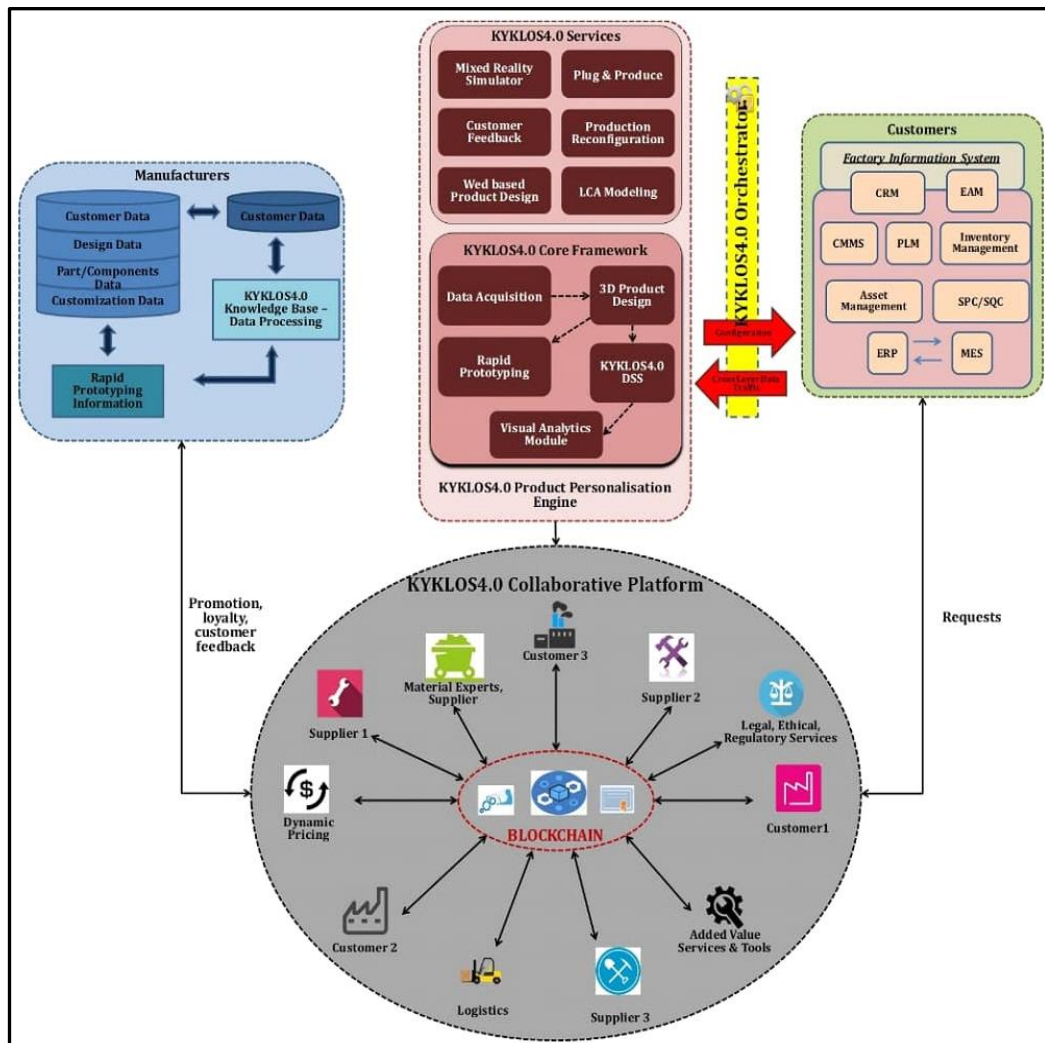
Εικόνα 4.5 Μοντέλο του έργου GOODMAN [111]

**IFaCOM:** Ο στόχος αυτού του έργου είναι η αποσφαλμάτωση της βιομηχανικής παραγωγής. Το έργο αυτό (Εικόνα 4.6) βασίζεται σε ευφυή συστήματα ανίχνευσης και παρακολούθησης, τα οποία εποπτεύουν τη διαδικασία παραγωγής, με σκοπό τη λήψη αποφάσεων για τη ποιοτικότερη βελτίωση της. [112], [113].



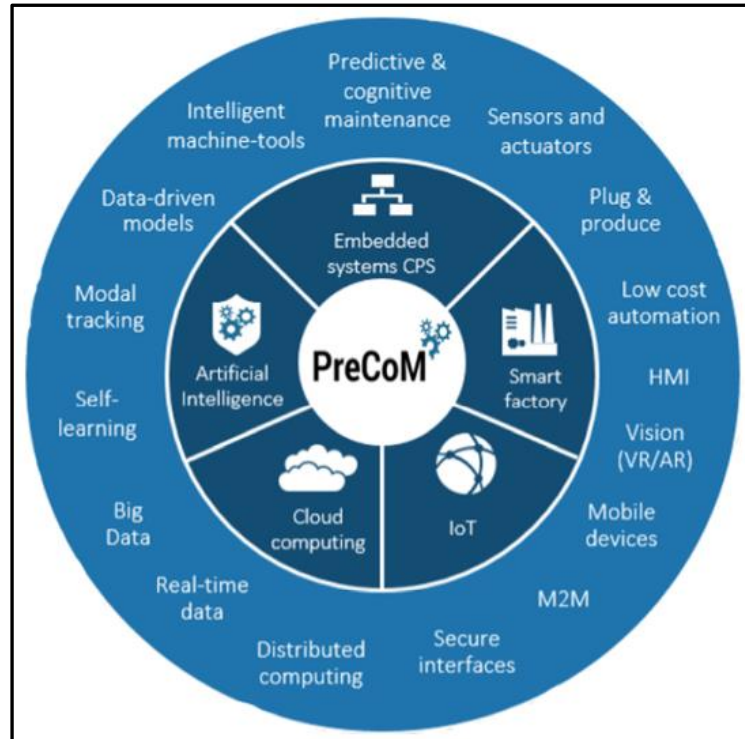
Εικόνα 4.6 Μοντέλο του έργου IFaCOM [112]

**KYKLOS 4.0:** Το έργο αυτό επικεντρώνεται στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και στη μείωση της άσκοπης κατανάλωσης των πρώτων υλών που χρειάζονται κατά τη διαδικασία παραγωγής. Αποσκοπεί στη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Επιπλέον, στοχεύει στην εφαρμογή μιας πελατοκεντρικής προσέγγισης, παράγοντας εξατομικευμένα προϊόντα. Στην *Εικόνα 4.7* απεικονίζεται το μοντέλο αυτού του έργου [114].



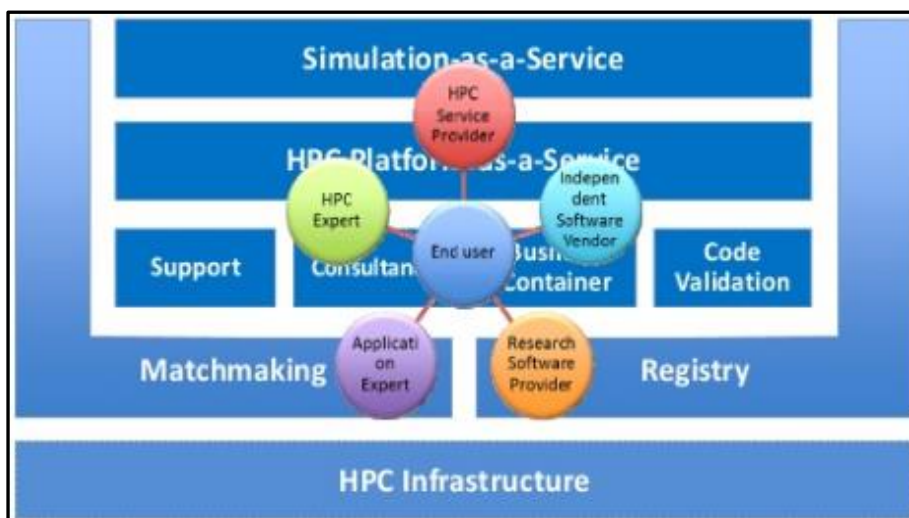
**Εικόνα 4.7** Μοντέλο του έργου KYKLOS 4.0 [114]

**PreCoM:** Πρόκειται για μια πλατφόρμα (*Εικόνα 4.8*) λήψης αποφάσεων συντήρησης. Σκοπός της είναι να εντοπίζει τυχόν σφάλματα στην παραγωγή, να εκτιμήσει τη συνολική ζημιά που μπορεί να προκληθεί εξαιτίας τους και να προβλέψει την εξέλιξη τους στο χρόνο. Αυτό το σύστημα είναι σε θέση να εκτιμήσει τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής των βιομηχανικών μηχανημάτων και να ειδοποιήσει την παραγωγή για οποιαδήποτε ενέργεια αντικατάστασης ή συντήρησης.[115].



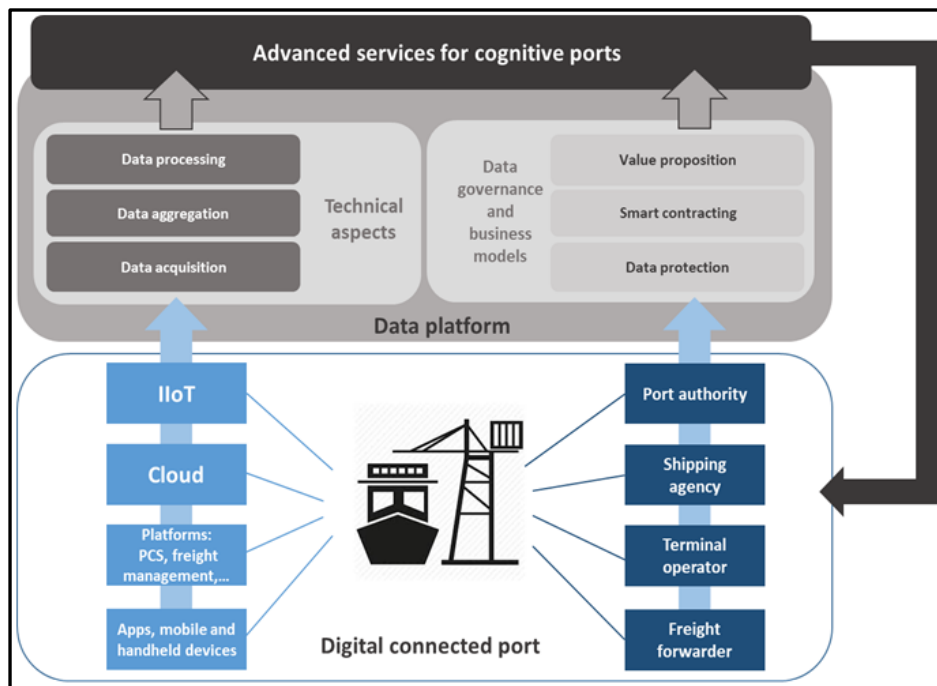
**Εικόνα 4.8** Μοντέλο του έργου PreCoM [115]

**FORTISSIMO2:** Πρόκειται για ένα έργο (Εικόνα 4.9) ικανό να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα των βιομηχανιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης παρέχοντας προηγμένες υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους. Με την εφαρμογή υψηλού προγραμματισμού μοντελοποίησης και αναλυτικών στοιχείων, είναι σε θέση να αυξήσει την ποιότητα σε προϊόντα και υπηρεσίες καλύπτοντας ανάγκες μικρομεσαίων επιχειρήσεων [116].



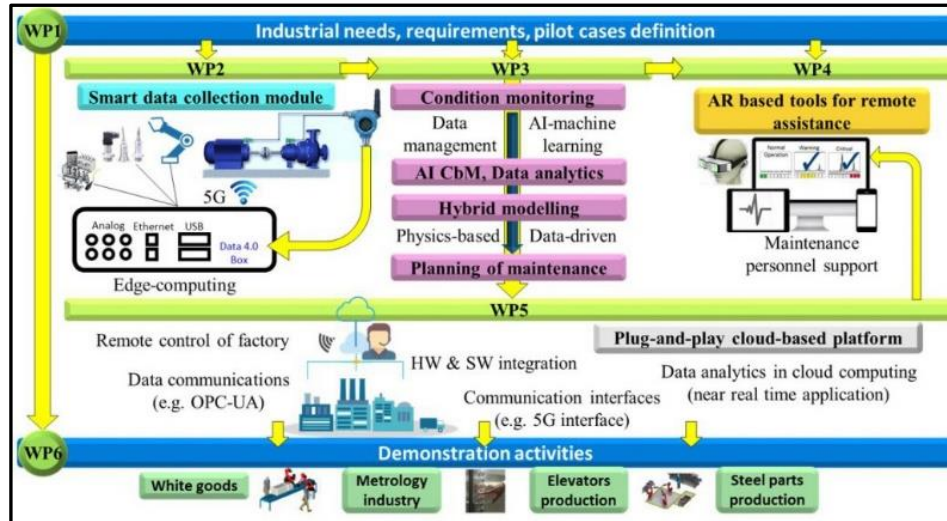
**Εικόνα 4.9** Μοντέλο του έργου FORTISSIMO2 [116]

**DATAPORTS:** Πρόκειται για μια βιομηχανική πλατφόρμα (*Εικόνα 4.10*) η οποία θα επιτρέψει τη διαχείριση δεδομένων προσφέροντας υπηρεσίες σε εταιρείες αλυσίδων εφοδιασμού και μεταφορών. Η υλοποίηση του έργου αυτού αποσκοπεί στη διασύνδεση ευρωπαϊκών λιμένων με υπάρχοντα ψηφιακά συστήματα, με σκοπό την μεταξύ τους συνένωση και αλληλεπίδραση. Με τον τρόπο αυτό θα παρέχονται πληροφορίες και δεδομένα, προσφέροντας νέες υπηρεσίες και προηγμένα επιχειρηματικά μοντέλα.. Η κύρια προσδοκία αυτού του έργου είναι να αντιπροσωπεύσει μια αξιόπιστη πλατφόρμα ανταλλαγής δεδομένων για αλυσίδες εφοδιασμού, καθώς και έναν ασφαλή μηχανισμό ψηφιακής διασύνδεσης μεταξύ των ευρωπαϊκών λιμένων. Με αυτόν τον τρόπο, θα δημιουργηθεί ένας αξιόπιστος και αποτελεσματικός τρόπος διαχείρισης επιχειρήσεων που θα ενισχύσει την ενιαία αγορά της Ε.Ε [117]..



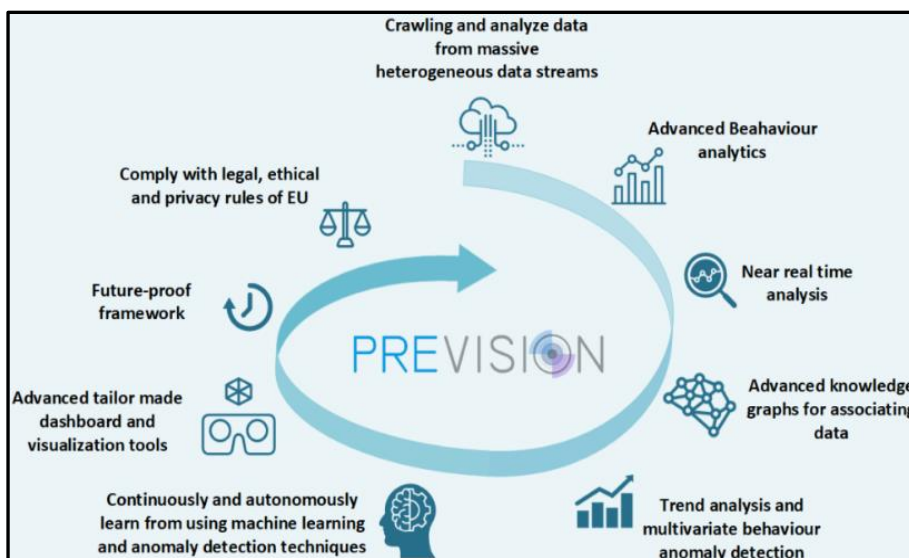
**Εικόνα 4.10** Αρχιτεκτονική του έργου DATAPORTS [117]

**SERENA:** Είναι ένα άλλο ευρωπαϊκό έργο, το οποίο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός νέου σχεδιασμού εφαρμογής τεχνολογιών πρόβλεψης συντήρησης, προκειμένου να βελτιωθεί η διάρκεια ζωής των συστημάτων παραγωγής. Σκοπός αυτού του έργου είναι να παρέχει προηγμένες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης για προγνωστική συντήρηση, λειτουργίες βασισμένες στην επαυξημένη πραγματικότητα για τοπική υποστήριξη της συντήρησης, καθώς και συστήματα βασισμένα σε «Internet of Things – IoT» για συλλογή δεδομένων (*Εικόνα 4.11*) [118], [119].



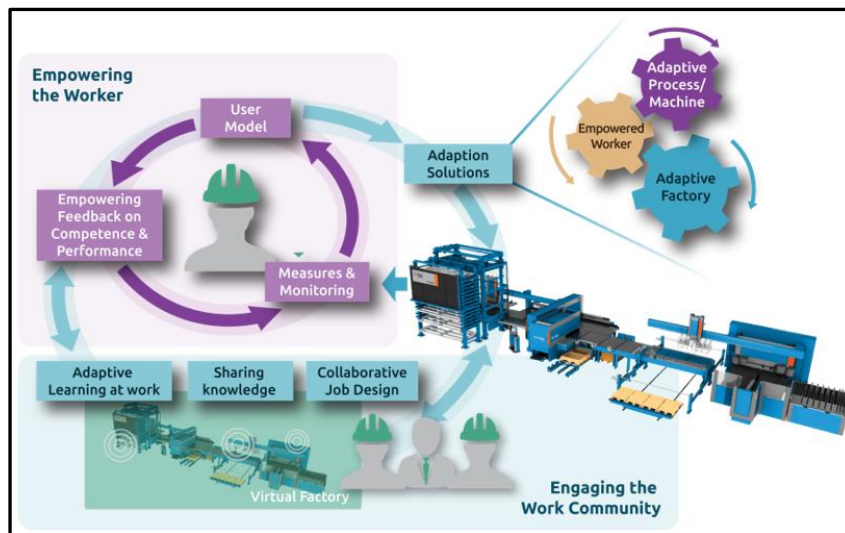
Εικόνα 4.11 Αρχιτεκτονική του έργου SERENA [119]

**PREVISION:** Ο στόχος αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη μιας πλατφόρμας δεδομένων, η οποία παρέχει προηγμένες τεχνικές (Εικόνα 4.12) αντιμετώπισης εγκληματικών πράξεων και τρομοκρατικών ενεργειών στον κυβερνοχώρο. Αυτή η πλατφόρμα θα είναι σε θέση να διαχειρίζεται και να αναλύει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο δεδομένα διαδικτύου, προκειμένου να δημιουργήσει δυναμικά γραφήματα πληροφοριών που αναπαριστούν τυχόν εγκληματικές δραστηριότητες. Ως αποτέλεσμα, η κύρια συμβολή αυτού του έργου, θεωρείται η διασυννοριακή προστασία από το διαδικτυακό έγκλημα [120].



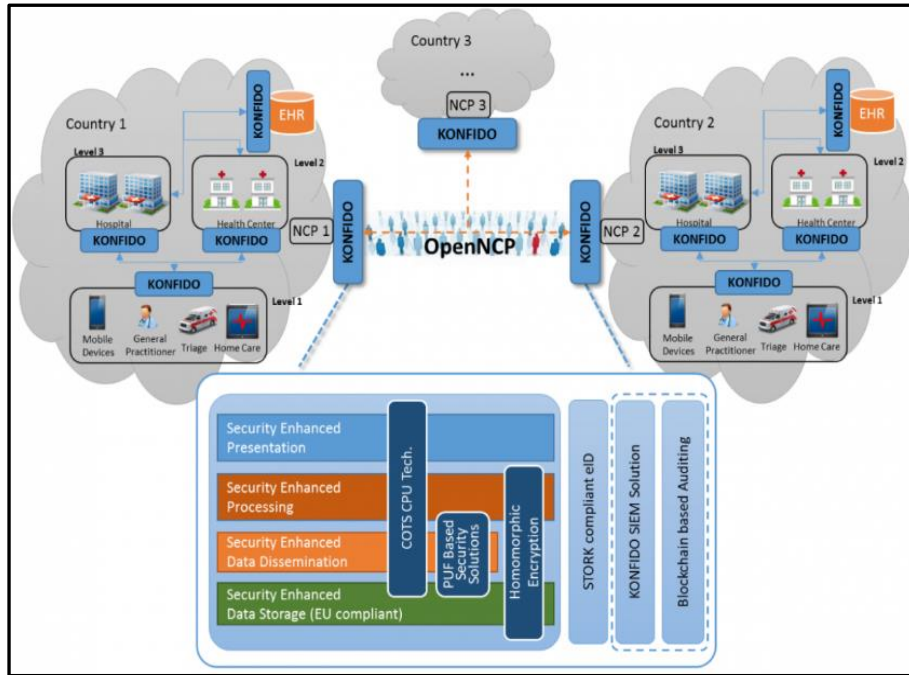
Εικόνα 4.12 Αρχιτεκτονική του έργου PREVISION [120]

**Factory2Fit:** Η ιδέα αυτού του έργου είναι ανθρωποκεντρική και ο στόχος της είναι να συνδυάσει τις διάφορες δεξιότητες των εργαζομένων και να τους δώσει κίνητρα για μια συνολική βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας. Ο πυρήνας αυτού του έργου βασίζεται σε ένα δυναμικό μοντέλο (*Εικόνα 4.13*) χρήστη που περιλαμβάνει φυσικές και γνωστικές ικανότητες. Θεωρώντας τους εργαζόμενους ως εμπειρογνώμονες του τομέα τους, τους κάνει πιο δραστήριους στην απόδοσή τους και συνεπώς πιο ακριβείς στον προγραμματισμό των καθηκόντων τους. Επιπλέον, συνδυάζοντας την εμπειρία τους στην εργασία και τις δεξιότητές τους, με την αντίστοιχη ανατροφοδότηση που θα λαμβάνουν, από το μοντέλο για την απόδοσή τους, θα είναι σε θέση να διορθώσουν τα λάθη τους και έτσι να εκπαιδεύονται συνεχώς [122].



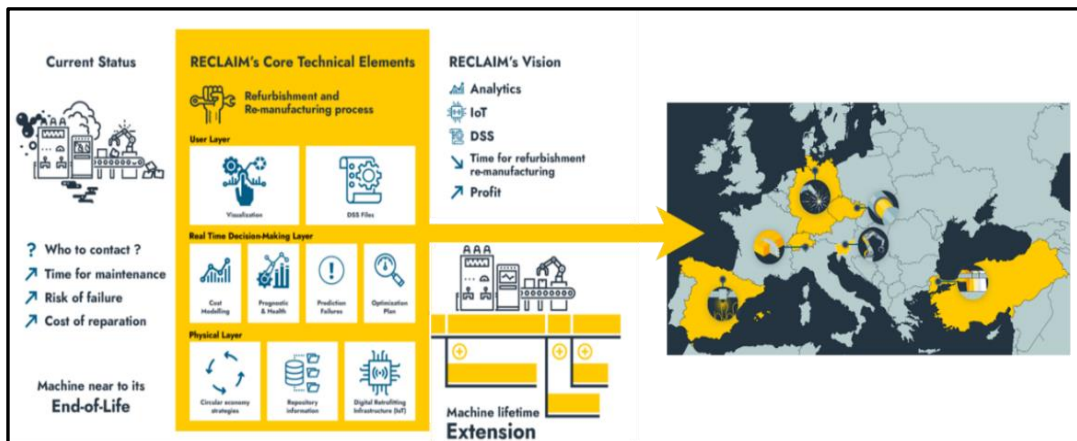
**Εικόνα 4.13** Αρχιτεκτονική του έργου Factory2Fit [121]

**KONFIDO:** Αυτό το έργο (*Εικόνα 4.14*) επικεντρώνεται στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης και πιο συγκεκριμένη στην έννοια του «e-health». Το όραμα αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη ενός διασυνοριακού μηχανισμού «e-health» μεταξύ των χωρών. Φυσικά, ένα τέτοιο μοντέλο χρειάζεται προηγμένη ψηφιακή ασφάλεια για να αποθηκεύει και να διατηρεί τις προσωπικές πληροφορίες απόρρητες. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, αυτό το έργο συνδέεται στενά με νέες επεκτάσεις ασφαλείας (Photonic Physical Unclonable Functions - PUF), προηγμένες κρυπτογραφικές τεχνικές (ομομορφικές), καθώς και με την εφαρμογή ασφαλούς λογισμικού (Security Information and event management SIEM), μηχανισμοί μεταφοράς (π.χ. blockchain) [123], [124].



Εικόνα 4.14 Αρχιτεκτονική του έργου KONFIDO [123]

**RECLAIM:** Το έργο αυτό αποσκοπεί στην ανακατασκευή και επανεπένδυση κατεστραμμένων βιομηχανικών μηχανισμών, με κύριο σκοπό την εξοικονόμηση βιομηχανικών πόρων επαναχρησιμοποιώντας ελαττωματικό εξοπλισμό αντί να τον απορρίπτει. Αυτό το έργο βασίζεται σε ένα πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων (Εικόνα 4.15), με στόχο την επέκταση της διάρκειας ζωής, την αύξηση της παραγωγικότητας και τη διαγνωστική συντήρηση του ηλεκτρομηχανικού βιομηχανικού εξοπλισμού χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αιχμής. Ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα αυτού του έργου θεωρείται η ενίσχυση της αποδοτικότητας και της οικονομίας των βιομηχανιών, με την εκμετάλλευση ήδη χρησιμοποιημένου εξοπλισμού. [125].



Εικόνα 4.15 Αρχιτεκτονική του έργου RECLAIM [125]



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ****5.1. Σύγκριση των παρουσιαζόμενων μοντέλων και μεθοδολογιών**

Οι τομείς που έχουν μελετηθεί σε αυτή τη διατριβή είναι τα ψηφιακά δίδυμα, η επαυξημένη πραγματικότητα, η προγνωστική συντήρηση, η ανίχνευση σφαλμάτων, ο έλεγχος ποιότητας, η παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων, η ευφυής μετρολογία και η υπολογιστική όραση στο πλαίσιο της ευφυούς βιομηχανίας. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνολική σύγκριση όλων των εφαρμογών που παρουσιάζονται καθώς και των μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε καθεμία από αυτές. Για κάθε μία από τις τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, έχουν συλλεχθεί όλες οι εφαρμογές και τα έργα και παρουσιάζονται σε ξεχωριστούς πίνακες. Επιπλέον, υπάρχει μια σύντομη συνολική περιγραφή και σύγκριση μεταξύ τους όπου επισημαίνονται η περιοχή χρήσης (δηλαδή παραγωγή - production, γραμμή συναρμολόγησης - assembly line, εργαλειομηχανές - machine-tools και συντήρηση - maintenance) και η εφαρμοσμένη μέθοδος (δηλαδή, βαθιά μάθηση, μηχανική εκμάθηση κ.λπ.) .

Όπως περιγράφεται στον *Πίνακα 5.1*, παρουσιάζονται όλες οι **εφαρμογές ψηφιακών διδύμων στη διαδικασία παραγωγής** που έχουν μελετηθεί. Οι περισσότερες από αυτές εφαρμόζονται στην περιοχή παραγωγής, για παράδειγμα σε εργοστάσια κυβερνο-φυσικής παραγωγής (cyber-physical factory), στη διάγνωση σφαλμάτων και στον χειρισμό βιομηχανικών γραμμών παραγωγής. Επιπλέον, υπάρχουν εφαρμογές με επίκεντρο τη γραμμή συναρμολόγησης όπου συνεργατικές ρομποτικές διατάξεις χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της παραγωγής. Τέλος, υπάρχουν εφαρμογές που εστιάζονται σε βιομηχανικά εργαλεία και εφαρμογές προληπτικής συντήρησης. Οι **τεχνικές βαθιάς μάθησης «Deep Learning» και «Deep Transfer Learning»** χρησιμοποιούνται στις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές. Παρόλο που, υπάρχουν και άλλοι τρόποι ανάπτυξης ψηφιακών διδύμων, όπως **πλατφόρμες προσομοιώσεων**.

**Πίνακας 5.1** Εφαρμογές ψηφιακών διδύμων στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing	Fault diagnosis in manufacture	ML	2019	[34]
2	Simulation and control of industrial production line	Production – Manufacturing	Plant Simulation OPC data server of Siemens / ML – Genetic Algorithm	2017	[36]
3	Deep Learning enhanced digital twin for remote laser welding of aluminum structures	Production – Manufacturing	DL – Closed-Looped-In-Process (CLIP)	2020	[37]
4	Digital twin for a cyber physical factory	Production – Manufacturing	Cyber Physical Factory by Festo and Siemens / –	2020	[38]
5	Deep Learning based semantic segmentation of $\mu$ CT images for creating digital material twins of fibrous reinforcements	Production – Manufacturing	DL – Deep Convolutional Neural Network – k-Nearest Neighbor	2020	[39]
6	Virtualized digital twin of a UR3 collaborative robot	HRC assembly	V-REP Simulation Plattform / –	2019	[35]
7	Deep Learning-empowered digital twin for visualized weld joint growth monitoring and penetration control	Welding manufacturing	DL – Deep Convolutional Neural Network	2020	[40]
8	Digital twin assisted fault diagnosis using deep transfer learning	Products' development – Proactive maintenance	DL – Deep Neural Network – Deep Transfer Learning	2019	[41]
9	Digital twin driven human–robot collaborative in assembly	HRC assembly	DL	2019	[42]

Στον *Πίνακα 5.2* παρουσιάζονται οι **εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας στη διαδικασία παραγωγής** που έχουν μελετηθεί. Ένα υψηλό ποσοστό από αυτές βρίσκει εφαρμογή στη γραμμή συναρμολόγησης ως συνεργατικές ρομποτικές διατάξεις σε εργασίες των εργαζομένων. Εφαρμογές όπως ο έλεγχος σφαλμάτων (discrepancy test) και η οπτική καθοδήγηση (visual guidance) αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα. Υπάρχουν επίσης εφαρμογές που εστιάζονται σε βιομηχανικά μηχανήματα και στη συντήρησή τους, όπως στη ζωντανή υποστήριξη απομακρυσμένης συντήρησης, καθώς και στον χειρισμό βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων στην παραγωγή. Φυσικά, για την υλοποίηση αυτών των εφαρμογών έχουν δημιουργηθεί συγκεκριμένες διεπαφές ανθρώπου-μηχανής, όπως για παράδειγμα χειρισμός μέσω οθονών αφής, διόπτρων επαυξημένης πραγματικότητας και κράνη εργασίας. Οι **αλγόριθμοι επαυξημένης πραγματικότητας** έχουν αναπτυχθεί για τις

περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης **τεχνικές βαθιάς μάθησης**.

**Πίνακας 5.2** Εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Supporting workers to manufacturing tasks via visualization AR guidance	Assembly line	Vuzix STAR 1200 see-through glasses – AR Algorithms	2014	[45]
2	Automatic interaction method using part recognition based on deep network for augmented reality assembly guidance	Assembly line	Part-Region-based Convolutional Neural Network – Faster-Region-based Convolutional Neural Network	2018	[46]
3	Remote maintenance supporting through augmented reality	Maintenance	Unity3D 4.3.4 software – Vuforia Algorithms	2017	[47]
4	Remote live support for workers via AR based on edge computing	Assembly line	Unity3D 4.3.4 software – Vuforia Algorithms	2017	[48]
5	AR 3D discrepancy check in industrial applications	Assembly line	Microsoft Kinetic v2 – Algorithmic techniques	2016	[49]
6	Intelligent predictive maintenance control using AR	Maintenance	AR smart glasses – AR Algorithms	2019	[50]
7	Industrial robots handling via AR in industrial assembly	Machine tools	AR smart glasses or HMI via Tablet	2016	[51]
8	Deep Learning-based smart task assistance in wearable augmented reality	Assembly line	Mask R-CNN – Faster-Region-based Convolutional Neural Network	2020	[52]
9	AR in industrial assembly - motionEAP	Assembly line	Order-PickAR and HelmetPickAR	2016	[53]
10	Image analysis with AR headset for Industry 4.0	Assembly line	HoloLens 1.0 – DL – Transfer Learning Algorithms	2020	[55]
11	Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing	Assembly line	DL – Faster Region-based CNN	2020	[56]

Συνεχίζοντας στο **Πίνακας 5.3** παρουσιάζονται **εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης κατά τη διαδικασία παραγωγής** που έχουν εξετασθεί. Στις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί **τεχνικές βαθιάς μάθησης** και **μηχανικής μάθησης** όπως ταξινόμησης (Classification), τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks), συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (Convolutional Neural Networks), «Reinforcement Neural Networks», συσταδοποίησης (Clustering) και άλλων αλγορίθμων (Regression Algorithms).

**Πίνακας 5.3** Εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Industry 4.0-enabled low-cost predictive maintenance approach for small manufacturing enterprises	Machine tools – Haas CNC turning center	Classification – Decision Tree – Partitioning and Regression Tree	2018	[60]
2	Architecture of intelligent and predictive maintenance system	Production – Manufacturing	ML – Reinforcement Neural Network – Long-Short-Term-Memory	2018	[61]
3	Cyber-physical system approach for predictive maintenance	Production – Manufacturing	DL – Convolutional Neural Network – Classification	2020	[62]
4	Predictive maintenance technology for semiconductors wafer transfer robot	Machine tools – semiconductors wafer transfer robot	Clustering Algorithm – K-means	2019	[63]
5	Intelligent predictive maintenance control using augmented reality	Production – automotive Industry – electric monorail system	AR smart glasses – AR Algorithms	2019	[50]
6	Predictive maintenance approach of sensing and quality monitoring in industrial facilities	Production – pasta industrial facilities	ML – Artificial Neural Networks – KNIME tool	2019	[64]
7	Novel framework architecture for integration of virtual metrology and predictive maintenance	Production – Manufacturing – semiconductors	DL	2012	[91]
8	Fault classification driven by maintenance management for smart maintenance applications	Production – Manufacturing	ML algorithms comparison: Linear SVM – Decision Trees – Random Forests Nearest Neighbor	2020	[66]
9	Dealing with time-series data in predictive maintenance problems approach	Production – Manufacturing – semiconductors	Supervised Aggregative Feature Extraction method – Regression Techniques	2016	[67]

Στον *Πίνακα 5.4* παρουσιάζονται όλες οι εφαρμογές ανίχνευσης σφαλμάτων στη διαδικασία παραγωγής που έχουν μελετηθεί. Οι περισσότερες από αυτές εφαρμόζονται σε εργαλειομηχανές και λιγότερες από αυτές στο στάδιο παραγωγής. Για παράδειγμα, στη διάγνωση βλαβών σε μηχανικές διατάξεις, στη διάγνωση βλαβών εξαιτίας βραχυκυκλώματος σε περιελίξεις κινητήρων, καθώς και στην ανίχνευση σφαλμάτων βιομηχανικών μηχανισμών όπως ρουλεμάν, γρανάζια κ.α. Στις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές βαθιάς μάθησης και μηχανικής μάθησης όπως συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks) και μοντέλα ταξινόμησης (Classification models).

**Πίνακας 5.4** Εφαρμογές ανίχνευση βλαβών στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	IoT for defect detection system with deep learning method in industry	Production process	DL – Convolutional Neural Network	2018	[68]
2	Vibration analysis for fault detection with PCA technique in automobile industry	Machine tools – combustion engines	PCA technique – Classification	2016	[69]
3	AI based stator winding fault estimation in three phase induction motor	Machine tools – induction motor	Fuzzy Logic – Classification	2018	[70]
4	ML fault analysis and predictive maintenance of Induction motor	Machine tools – induction motor	ML – Fast Forward Artificial Neural Network – Classification	2018	[71]
5	DL based 3D defect detection system using photometric stereo illumination	Machine tools – AOI	DL– Convolutional Neural Network – You Only Look Once	2019	[72]
6	Pattern recognition method of fault diagnostics based on a new health indicator for smart manufacturing	Industrial mechanisms – bearings, gears, etc.	DL– Artificial Neural Networks – ANFIS	2020	[73]
7	Stator winding short-circuits fault diagnosis approach in induction motors using random forest	Machine tools – induction motor	ML – Artificial Neural Networks – Classification – Decision Tree	2017	[74]
8	Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers	Machine tools – machine centers (CNC)	ML – Artificial Neural Networks	2017	[75]

Έπειτα στον **Πίνακας 5.5** παρουσιάζονται οι **εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου στη διαδικασία παραγωγής** που έχουν μελετηθεί. Υπάρχει ένα υψηλό ποσοστό αυτών που χρησιμοποιούνται τόσο στην ποιότητα παραγωγής όσο και στην ποιότητα της διαδικασίας κατασκευής. Για αυτές τις εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί ως επί το πλείστον **τεχνικές μηχανικής εκμάθησης** όπως συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks) και άλλα νευρωνικά δίκτυα (Reinforcement Neural Networks).

**Πίνακας 5.5** Εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Application of machine learning for product batch-oriented control of production processes	Production quality performance	ML – Artificial Neural Networks, Support Vector Machine, Partial Least Squares	2020	[78]
2	Machine learning approach for collaborative robot smart manufacturing inspection for quality control systems	Manufacturing process	DL – Reinforcement Learning Algorithms	2020	[79]
3	Non-destructive testing and machine learning for quality control	Production quality – ceramic materials	Acoustic emission NDT – ML – Classification	2018	[80]
4	ML approach for clothing industry	Manufacturing process – clothing industry	DL – Convolutional Neural Network	2020	[81]

Ο **Πίνακας 5.6** περιέχει συγκεντρωμένες όλες τις εφαρμογές που μελετήθηκαν και αφορούν την **παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων κατά τη διαδικασία παραγωγής**. Όλες εστιάζουν στο πεδίο παραγωγής, στην ποιότητα της και στην εξάλειψη σφαλμάτων. Στις μελέτες αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί **αλγοριθμικές τεχνικές** όπως οι αλγόριθμοι συσχέτισης (Correlation) και «Part-variation algorithms».

**Πίνακας 5.6** Εφαρμογές παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Reference architecture for the implementation of ZDM strategies	Architecture – Production quality performance	Correlation algorithms	2020	[84]
2	Knowledge capturing platform in multi-stage production systems for zero-defect Manufacturing	High-quality production	Classification –Correlation algorithms	2018	[82]
3	Part variation modeling in multi-stage production systems for zero-defect manufacturing	Production – Manufacturing	Part variation algorithms	2019	[85]
4	Correlation analysis methods in multi-stage production systems for reaching zero-defect manufacturing	Production – Manufacturing	Correlation algorithms	2018	[86]

Στον *Πίνακα 5.7* παρατίθενται οι εφαρμογές ευφυούς μετρολογίας στη διαδικασία παραγωγής που έχουν μελετηθεί. Οι περισσότερες από αυτές εφαρμόζονται στην πεδίο παραγωγής ημιαγωγών. Οι κοινώς εφαρμοζόμενες τεχνικές είναι τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks), καθώς και άλλες τεχνικές ταξινόμησης (classification) και αλγόριθμοι όπως ο «**Regression algorithms**».

**Πίνακας 5.7** Εφαρμογές ευφυούς μετρολογίας στη διαδικασία παραγωγής

No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Virtual metrology technique for semiconductor manufacturing	Manufacturing – semiconductors	ML – Artificial Neural Network – Piecewise Linear Neural Network	2006	[88]
2	Virtual metrology models approach for predicting average PECVD oxide film thickness	Manufacturing – semiconductors	ML – Partial Least Squares Regression – Decision Trees – Classification	2011	[89]
3	Virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing	Manufacturing – semiconductors	ML – Regression Algorithms	2011	[90]
4	Novel framework architecture for integration of virtual metrology and predictive maintenance	PdM Manufacturing – semiconductors	ML – Artificial Neural Network	2012	[91]
5	An intelligent virtual metrology system with adaptive update for semiconductor manufacturing	Manufacturing – semiconductors	ML – Artificial Neural Network (Feed-forward Neural Network)	2017	[92]

Τέλος στον *Πίνακα 5.8* βρίσκονται συγκεντρωμένες οι εφαρμογές υπολογιστικής όρασης κατά τη διαδικασία παραγωγής που έχουν ερευνηθεί. Υπάρχει ένα υψηλό ποσοστό αυτών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο παραγωγής, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας. Σε εφαρμογές υπολογιστικής όρασης έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι όπως **τεχνητά νευρικά δίκτυα** (Artificial Neural Networks), **ταξινόμηση** (classification) και **βαθιά μάθηση**.

**Πίνακας 5.8** Εφαρμογές υπολογιστικής όρασης στη διαδικασία παραγωγής






No.	Approach	Area of use	Method	Year of survey	Source
1	Quality control system for data acquisition and image reconstruction with smart hybrid ECT device	Production process optimization	Levenberg-Marquardt Algorithm	2018	[95]
2	Inline image vision technique for quality and defect monitoring in Industry 4.0	Production quality – tires industry	ML – Classification – K-Means	2019	[96]
3	Product quality visual inspection toward smart industries using AI methods	Production quality – vehicle industry	ML – Classification – Neural Networks, Support Vector Machine	2020	[10]
4	Visual quality control application on a smart factory prototype by using deep learning methods	Production quality	ML – Neural Networks (obj. detect) & DL – Recurrent Neural Networks, You Only Look Once (obj. recogn)	2019	[97]
5	Real time measurements algorithm for quality control of industrial manufacturing via image processing	Production quality – metal rods	ML –Nearest Neighbor Interpolation	2016	[98]
6	Automated control system of textile product parameters that uses computer vision	Production quality – fabric industry	OpenCV Python	2018	[99]
7	Machine Vision applications in a learning factory	Production quality – learning factory	DL – Convolutional Neural Networks	2020	[100]

Συνεχίζοντας στους επόμενους πίνακες, παρουσιάζονται εν συντομία τα έργα από την Ερευνητική Ένωση Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος (European Factories of the Future Research Association - EFFRA) που έχουν αναφερθεί και στο [Κεφάλαιο 4](#).

**Πίνακας 5.9** Έργα της Ερευνητικής Ένωσης Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος (EFFRA)

No.	Name of project	Trademark	Title	Source
1	QU4LITY		Autonomous Quality Platform for Cognitive Zero-defect Manufacturing 4.0 Processes through Digital Continuity in the Connected Factory of the Future	<a href="https://qu4lity-project.eu/">https://qu4lity-project.eu/</a>
2	ForZDM		Integrated Zero-Defect Manufacturing Solution for High Value Adding Multi-Stage Manufacturing systems	<a href="https://www.forzdmproject.eu/">https://www.forzdmproject.eu/</a>
3	STREAM-0D		Simulation in Real Time for Manufacturing with Zero Defects	<a href="https://www.stream-0d.com/">https://www.stream-0d.com/</a>



No.	Name of project	Trademark	Title	Source
4	Z-FactOr		Zero-defect manufacturing strategies towards on-line production management for European factories	<a href="https://www.z-fact0r.eu/">https://www.z-fact0r.eu/</a>
5	GOODMAN		Agent Oriented Zero Defect Multi-Stage Manufacturing	<a href="http://goodman-project.eu/">http://goodman-project.eu/</a>
6	IFaCOM		Intelligent Fault Correction and self-Optimizing Manufacturing systems An Advanced Circular and Agile	<a href="http://www.ifacom.org">http://www.ifacom.org</a>
7	KYKLOS 4.0		Manufacturing Ecosystem based on rapid reconfigurable manufacturing process and individualized consumer preferences	<a href="https://kyklos40project.eu/">https://kyklos40project.eu/</a>
8	PreCoM		Predictive Cognitive Maintenance Decision Support System	<a href="https://www.precom-project.eu/">https://www.precom-project.eu/</a>
9	FORTISSIMO2		Factories of the Future Resources, Technology, Infrastructure and Services for Simulation and Modelling 2	<a href="https://www.fortissimo-project.eu/about/fortissimo-2">https://www.fortissimo-project.eu/about/fortissimo-2</a>
10	DATAPORTS		Data Platform for the Connection of Cognitive Ports	<a href="https://dataports-project.eu/">https://dataports-project.eu/</a>
11	SERENA		Versatile plug-and-play platform enabling remote predictive maintenance	<a href="https://serena-project.eu/">https://serena-project.eu/</a>
12	PREVISION		Prediction and Visual Intelligence for Security Information	<a href="http://www.prevision-h2020.eu/">http://www.prevision-h2020.eu/</a>
13	Factory2Fit		Empowering and Participatory Adaptation of Factory Automation to Fit for Workers	<a href="https://factory2fit.eu/">https://factory2fit.eu/</a>
14	KONFIDO		Secure and Trusted Paradigm for Interoperable eHealth Services	<a href="https://konfido-project.eu/">https://konfido-project.eu/</a>
15	RECLAIM		Remanufacturing and Refurbishment Large Industrial Equipment	<a href="https://www.reclaim-project.eu/">https://www.reclaim-project.eu/</a>

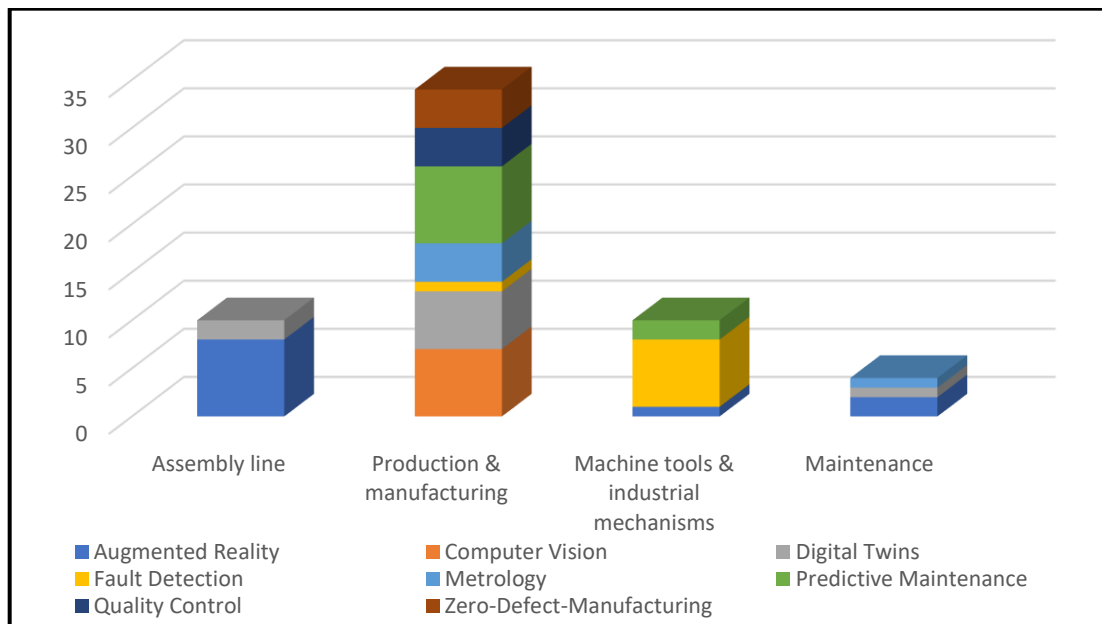
Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα και τις πληροφορίες, που συλλέγονται από τη βιβλιογραφία, σχετικά με τα έργα και τις μελέτες που αναφέρονται στα [Κεφάλαιο 2](#) και στο [Κεφάλαιο 3](#), παρουσιάζονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό, έχουν δημιουργηθεί δύο πίνακες για τις μελέτες αυτές.

Με αυτόν τον τρόπο, οι πληροφορίες και τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί στον **Πίνακας 5.10**. Η πρώτη στήλη περιέχει όλες τις σχετικές τεχνολογίες ΑΙ. η πρώτη σειρά περιέχει τους τομείς της βιομηχανίας που ενισχύονται από κάθε τεχνολογία ΑΙ που παρουσιάζεται. Η τελευταία σειρά είναι ο συνολικός αριθμός των εξεταζόμενων μελετών για κάθε βιομηχανική εφαρμογή και η τελευταία στήλη δείχνει το συνολικό αριθμό των εξεταζόμενων μελετών για κάθε τεχνολογία ΑΙ.

**Πίνακας 5.10** Συνολική σύγκριση «χρήσης» των εφαρμογών που παρουσιάζονται στη βιομηχανία

AI TECHNOLOGY	INDUSTRIAL IMPLEMENTATION				TOTAL
	Assembly Line	Production/ Manufacturing	Machine-tools/ Ind. Mechanisms	Maintenance	
Augmented Reality	8		1	2	11
Computer Vision		7			7
Digital Twins	2	6		1	9
Fault Detection		1	7		8
Metrology		4		1	5
Predictive Maintenance		8	2		10
Quality Control		4			4
Zero-Defect Manufacturing		4			4
<b>TOTAL</b>	10	34	10	4	58

Για μια καλύτερη εικόνα, στην **Εικόνα 5.1** απεικονίζονται οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στον **Πίνακας 5.10**. Παρουσιάζεται η κατανομή των πεδίων βιομηχανικής εφαρμογής στην αντίστοιχη τεχνολογία AI.



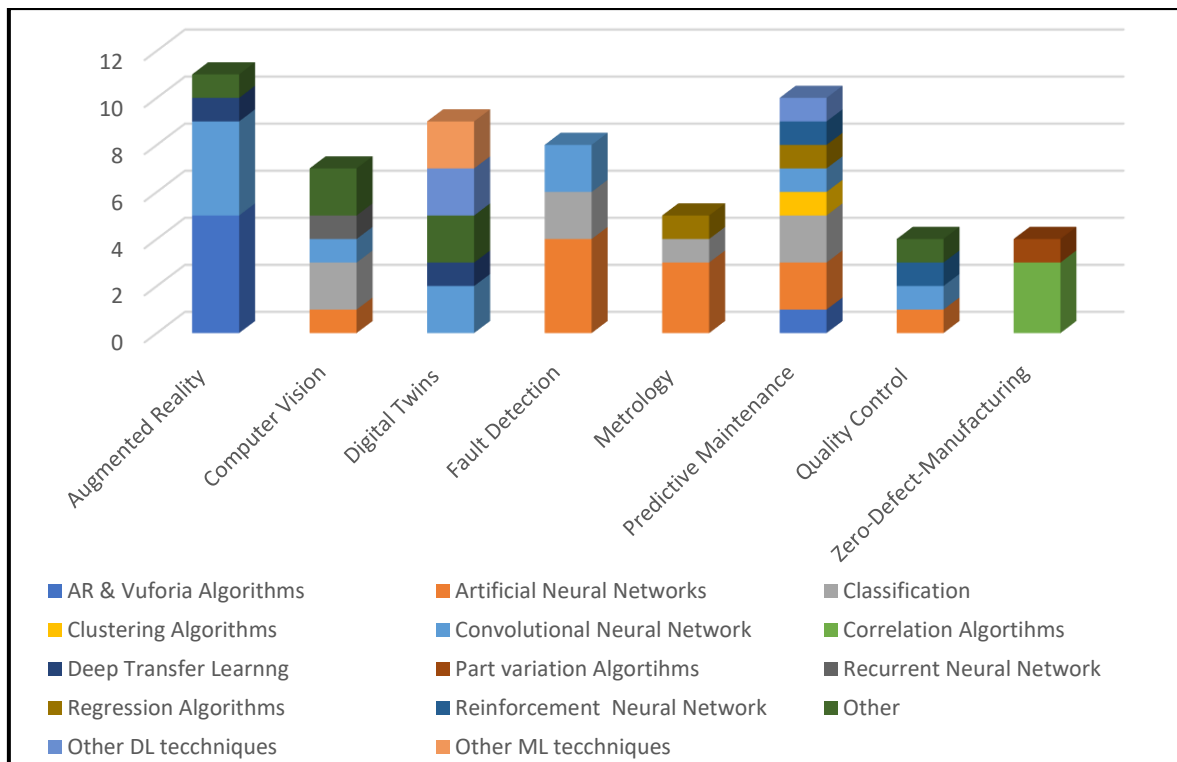
**Εικόνα 5.1** Συνολική σύγκριση «χρήσης» των εφαρμογών που παρουσιάζονται στη βιομηχανία

Κατά την ίδια έννοια, ο **Πίνακας 5.11** δείχνει το σύνολο των εξεταζόμενων βιβλιογραφικών αναφορών για κάθε μεθοδολογία AI. Η πρώτη σειρά περιέχει τις τεχνολογίες AI. Η πρώτη στήλη περιέχει τις μεθοδολογίες AI (που χρησιμοποιούνται σε

κάθε τεχνολογία AI) και στην τελευταία στήλη φαίνεται ο συνολικός αριθμός των μελετών, όπου έχει εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μεθοδολογία AI.

**Πίνακας 5.11** Σύγκριση μεθοδολογιών AI που χρησιμοποιήθηκαν στις εξεταζόμενες εφαρμογές

AI METHOD	AI TECHNOLOGY								TOTAL
	AR	Computer Vision	DT	Fault Detection	Metrology	PdM	Quality Control	ZDM	
AR & Vuforia Algorithms	5					1			6
Artificial Neural Networks		1		4	3	2	1		11
Classification		2		2	1	2			7
Clustering Algorithms						1			1
Convolutional Neural Network	4	1	2	2		1	1		11
Correlation Algorithms								3	3
Deep Transfer Learning	1		1						2
Part variation Algorithms								1	1
Recurrent Neural Network		1							1
Regression Algorithms					1	1			2
Reinforcement Neural Network						1	1		2
Other	1	2	2				1		7
Other DL techniques			2			1			3
Other ML techniques			2						2
<b>TOTAL</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>58</b>



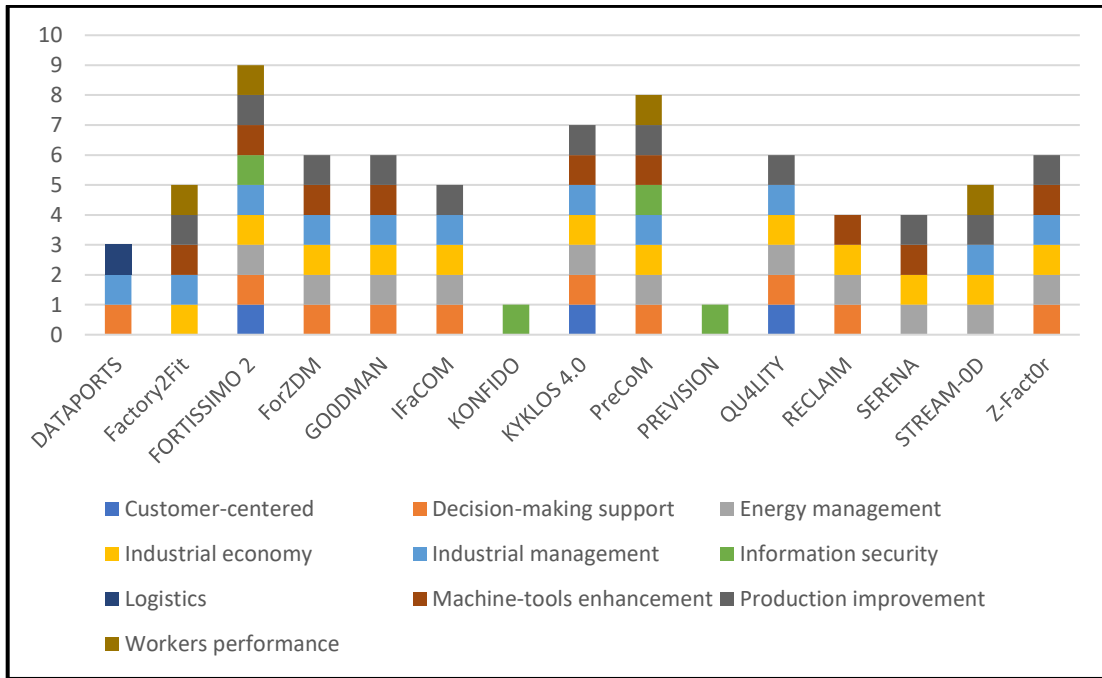
**Εικόνα 5.2** Σύγκριση μεθοδολογιών AI που χρησιμοποιήθηκαν στις εξεταζόμενες εφαρμογές

Τα έργα της Ερευνητική Ένωση Ευρωπαϊκών Εργοστασίων του Μέλλοντος (European Factories of the Future Research Association – EFFRA) που παρουσιάστηκαν συνοψίζονται σε δύο πίνακες. Ο **Πίνακας 5.12** παρουσιάζει σε ποιες βιομηχανικές εφαρμογές συμβάλλει κάθε έργο. Ο **Πίνακας 5.13** παρουσιάζει τις τεχνολογίες ΑΙ που συμβάλλουν στην υλοποίηση κάθε έργου. Και στους δύο πίνακες η πρώτη στήλη παραθέτει τα αναφερόμενα έργα EFFRA. Στον **Πίνακας 5.12** η πρώτη σειρά περιέχει τις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές που μπορούν να βελτιώσουν το αντίστοιχο έργο. Στον **Πίνακας 5.13** η πρώτη σειρά περιέχει τις εφαρμοσμένες τεχνολογίες ΑΙ που έχουν συμβάλει στην υλοποίηση του κάθε έργου.

**Πίνακας 5.12** Συνολική συμβολή έργων EFFRA στους διάφορους βιομηχανικούς τομείς

EFFRA PROJECT	INDUSTRIAL IMPLEMENTATION										
	Customer-centered polices	Decision making support	Energy management	Industrial economy	Industrial management	Information security	Logistics	Machine-tools enhancement	Production improvement	Workers performance	
DATAPORTS		•			•		•				
Factory2Fit				•	•			•	•	•	
FORTISSIMO2	•	•	•	•	•	•		•	•	•	
ForZDM		•	•	•	•			•	•		
GOODMAN		•	•	•	•			•	•		
IFaCOM		•	•	•	•				•		
KONFIDO						•					
KYKLOS 4.0	•	•	•	•	•			•	•		
PreCoM		•	•	•	•	•		•	•	•	
PREVISION						•					
QU4LITY	•	•	•	•	•				•		
RECLAIM		•	•	•				•			
SERENA			•	•				•	•		
STREAM-0D			•	•	•				•	•	
Z-Fact0r		•	•	•	•			•	•		

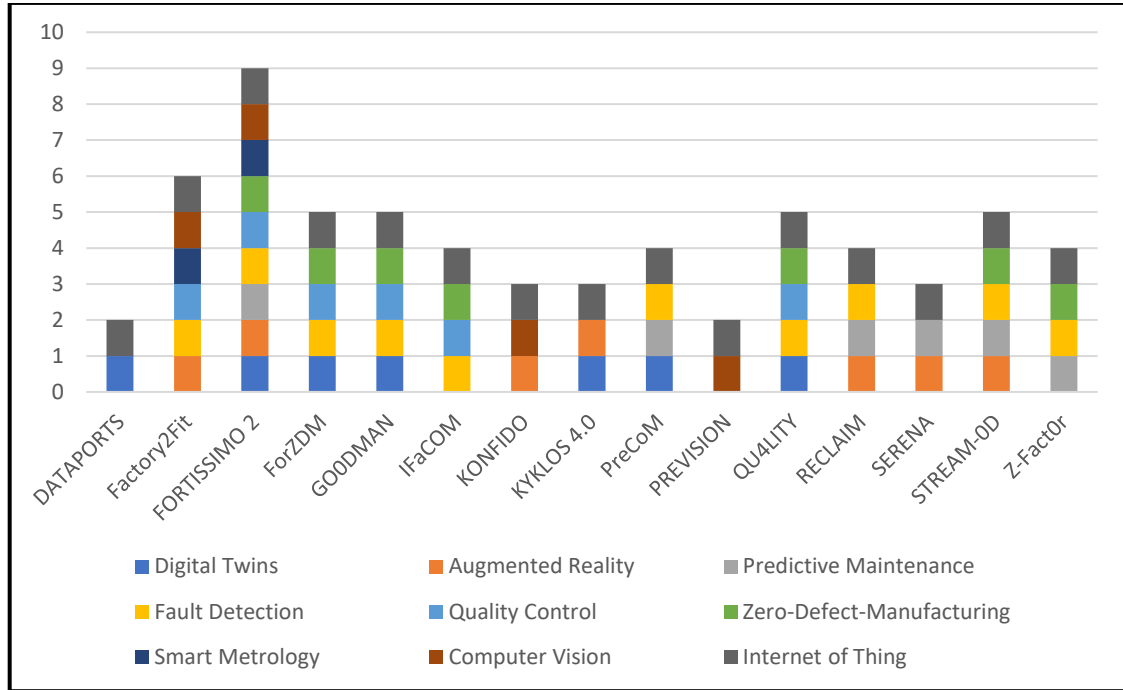
Για καλύτερη κατανόηση, οι πρώτοι πίνακες παρουσιάζονται επίσης σε κατάλληλα σχήματα. Η **Εικόνα 5.3** είναι ένας ποσοτικός προσδιορισμός της συνολικής συνεισφοράς του κάθε έργου στη βιομηχανία και η **Εικόνα 5.4** είναι μια ποιοτική απεικόνιση της δομής του κάθε έργου από τεχνολογίες ΑΙ.



Εικόνα 5.3 Συνολική συμβολή έργων EFFRA στους διάφορους βιομηχανικούς τομείς

Πίνακας 5.13 Τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης που εφαρμόστηκαν στα έργα EFFRA

EFFRA PROJECT	AI TECHNOLOGY									
	DT	AR	PdM	Fault Detection	Quality Control	ZDM	Metrology	Computer Vision	IoT	
DATAPORTS	•									•
Factory2Fit		•		•	•		•	•		•
FORTISSIMO2	•	•	•	•	•	•	•	•		•
ForZDM	•			•	•	•				•
GOODMAN	•			•	•	•				•
IFaCOM				•	•	•				•
KONFIDO		•						•		•
KYKLOS 4.0	•	•								•
PreCoM	•		•	•						•
PREVISION								•		•
QU4LITY	•			•	•	•				•
RECLAIM		•	•	•						•
SERENA		•	•							•
STREAM-0D		•	•	•		•				•
Z-Fact0r			•	•		•				•



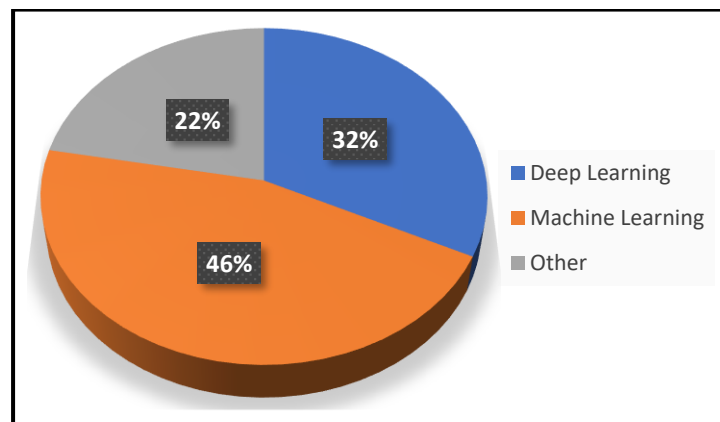
Εικόνα 5.4 Τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης που εφαρμόστηκαν στα έργα EFFRA

## 5.2. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, τα γενικά συμπεράσματα αυτής της διατριβής είναι τα παρακάτω.

1) Λαμβάνοντας υπόψη τις 58 εφαρμογές που ερευνήθηκαν και παρουσιάστηκαν

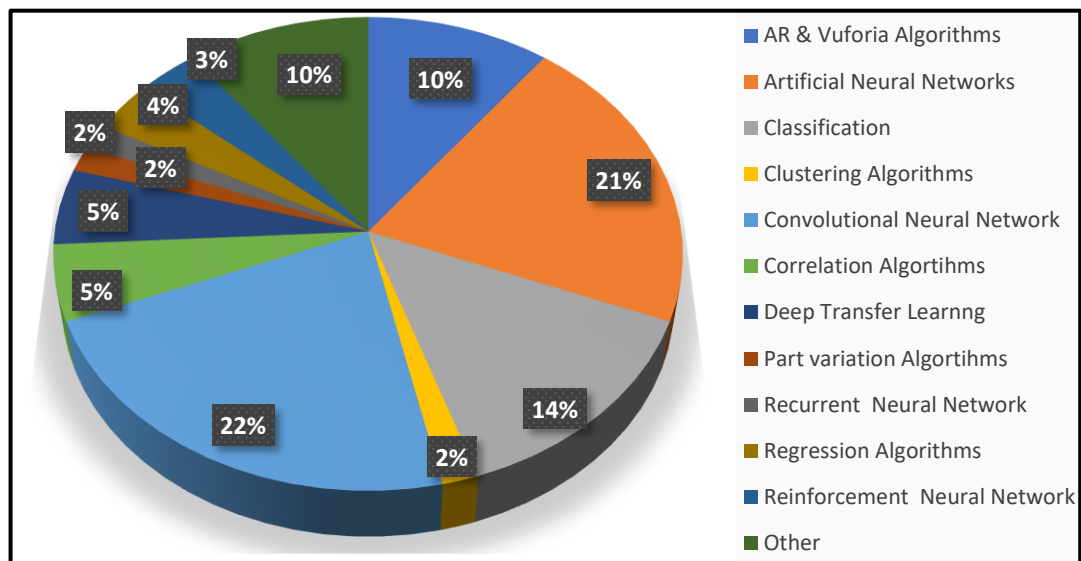
- Η **Εικόνα 5.5** δείχνει ότι υπάρχει ένα ποσοστό **46%** των εφαρμογών που επάγονται σε **μηχανική εκμάθηση**, **32%** στη **βαθιά μάθηση** και **22%** με **άλλους τρόπους** (δηλαδή, προσομοιώσεις λογισμικού, κωδικοποίηση ρυθμον, επιστήμη δεδομένων κ.λπ.).



Εικόνα 5.5 Συνολική εικόνα των εφαρμογών που μελετήθηκαν

## Η

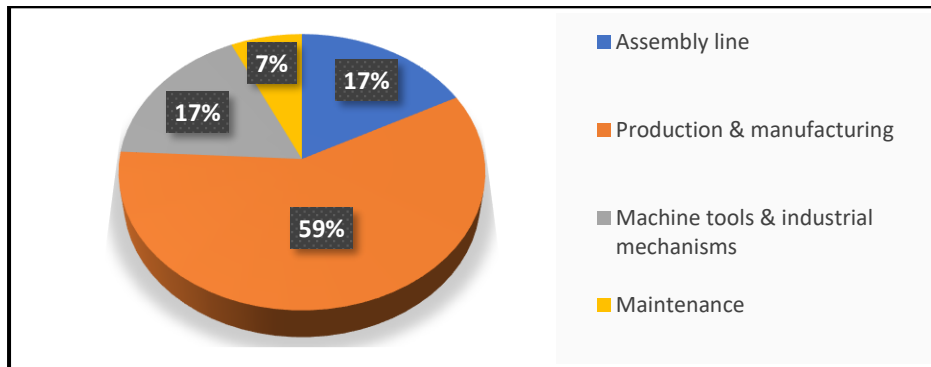
- **Εικόνα 5.6**, που αντιπροσωπεύει τη συνολική χρήση μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης των εφαρμογών που παρουσιάστηκαν, δείχνει ότι τα **τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks)**, τα **συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks)** και οι **τεχνικές ταξινόμησης (Classification methods)** χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές, με **συνολική χρήση 57%**. Πιο συγκεκριμένα, στις εφαρμογές ψηφιακών διδύμων και επαυξημένης πραγματικότητας, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN). Στις εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης, ανίχνευσης σφαλμάτων και ευφυούς μετρολογίας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και η ταξινόμηση (Classification). Επιπρόσθετα, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου και υπολογιστικής όρασης, ενώ σε όλες σχεδόν τις παρουσιαζόμενες αρχιτεκτονικές παραγωγής μηδενικών σφαλμάτων (ZDM) χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι συσχέτισης (Correlation Algorithms).



**Εικόνα 5.6** Συνολική χρήση μεθοδολογιών τεχνητής νοημοσύνης σε βιομηχανικές εφαρμογές

- Η **Εικόνα 5.7** δείχνει ότι οι εφαρμογές που μελετήθηκαν επικεντρώνονται πρωτίστως στη **βελτίωση της παραγωγής (59%)**. Το ποσοστό ευφυών εφαρμογών που εστιάζουν στη βοήθεια υπαλλήλων στη **γραμμή συναρμολόγησης**, είναι μόλις **17%** και αντίστοιχα το ποσοστό εφαρμογών που επικεντρώνονται στη **βελτίωση των**

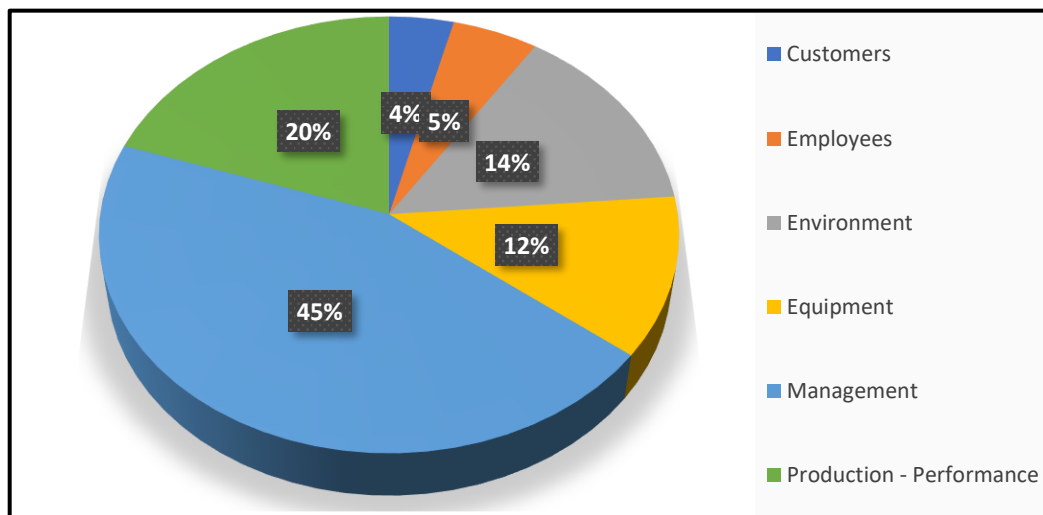
εργαλειομηχανών 17%, ενώ εφαρμογές που φορούν τον τομέα της **συντήρησης** είναι μόλις 7%.



**Εικόνα 5.7** Κατηγοριοποίηση των παρουσιαζόμενων εφαρμογών με βάση το πεδίο εφαρμογής

2) Λαμβάνοντας υπόψη τα 15 έργα του EFFRA που παρουσιάστηκαν

- Στην **Εικόνα 5.8** απεικονίζεται ο κεντρικός πυρήνας των έργων EFFRA. Τα έργα που μελετήθηκαν επικεντρώνονται κυρίως στη **βιομηχανική διαχείριση (industrial management)** (δηλ. διοικητική μέριμνα, λήψη αποφάσεων, οικονομία κ.λπ.), στην **απόδοση της παραγωγής** και στη **βελτίωση του εξοπλισμού**. Ωστόσο οι τομείς που πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψη είναι το **εργασιακό περιβάλλον των υπαλλήλων** και οι **πελατοκεντρικές υπηρεσίες**, επειδή υπάρχει μικρή συνεισφορά σε αυτά.



**Εικόνα 5.8** Κεντρικός πυρήνας των έργων EFFRA που παρουσιάστηκαν



### **5.3.Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Η κεντρική ιδέα αυτής της διατριβής είναι να αντιπροσωπεύσει μια γενική ανασκόπηση της έννοιας Industry 4.0. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης καθώς και διάφορες εφαρμογές στην ευφυή βιομηχανία. Η εν λόγω εργασία θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω μελλοντικά ως προς το δείγμα των εργασιών που μελετήθηκαν. Πιθανώς σε μια μελλοντική έρευνα το δείγμα θα μπορούσε να αυξηθεί και να ενημερωθεί με τις τελευταίες τεχνολογικές τάσεις. Σε ορισμένα πεδία εφαρμογών όπως ο ποιοτικός έλεγχος, η παραγωγή μηδενικών σφαλμάτων και η ευφυής μετρολογία, το μέγεθος του δείγματος θα μπορούσε να εμπλουτισθεί με περεταίρω αναφορές. Ενδεχομένως αυτό να αποτελέσει έναυσμα για μια μελλοντική έρευνα, σε συνέχεια αυτής

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Zheng *et al.*, “Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives,” p. 14, 2018.
- [2] E. Hofmann, “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics,” *Computers in Industry*, p. 12, 2017.
- [3] P. Zawadzki and K. Żywicki, “Smart Product Design and Production Control for Effective Mass Customization in the Industry 4.0 Concept,” *Management and Production Engineering Review*, vol. 7, no. 3, pp. 105–112, Sep. 2016, doi: 10.1515/mper-2016-0030.
- [4] M. Jasiulewicz-Kaczmarek, S. Legutko, and P. Kluk, “Maintenance 4.0 technologies – new opportunities for sustainability driven maintenance,” 2020, doi: 10.24425/MPER.2020.133730.
- [5] M. Jasiulewicz - Kaczmarek and A. Gola, “Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing - an Overview,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 10, pp. 91–96, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.10.005.
- [6] X. Xu, “Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 92, no. 5–8, pp. 1893–1900, Sep. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0300-7.
- [7] C. Liu and X. Xu, “Cyber-physical Machine Tool – The Era of Machine Tool 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 70–75, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.078.
- [8] M. Medojevic, P. D. Villar, I. Cosic, A. Rikalovic, N. Sremcevic, and M. Lazarevic, “ENERGY MANAGEMENT IN INDUSTRY 4.0 ECOSYSTEM: A REVIEW ON POSSIBILITIES AND CONCERNS,” p. 8.
- [9] F. Shrouf, J. Ordieres, and G. Miragliotta, “Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm,” in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, Dec. 2014, pp. 697–701, doi: 10.1109/IEEM.2014.7058728.
- [10] A. Chouchene, A. Carvalho, T. M. Lima, F. Charrua-Santos, G. J. Osório, and W. Barhoumi, “Artificial Intelligence for Product Quality Inspection toward Smart Industries: Quality Control of Vehicle Non-Conformities,” in *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, Feb. 2020, pp. 127–131, doi: 10.1109/ICITM48982.2020.9080396.
- [11] K. N. Patel, S. Raina, and S. Gupta, “Artificial Intelligence and its Models,” no. 1076, p. 4.
- [12] C. Giri, S. Jain, X. Zeng, and P. Bruniaux, “A Detailed Review of Artificial Intelligence Applied in the Fashion and Apparel Industry,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 95376–95396, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928979.
- [13] J. TORRES.AI, “DRL 01: A gentle introduction to Deep Reinforcement Learning,” *Medium*, Jan. 01, 2021. <https://towardsdatascience.com/drl-01-a-gentle-introduction-to-deep-reinforcement-learning-405b79866bf4> (accessed Feb. 10, 2021).
- [14] T. D. Akinosho *et al.*, “Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations,” *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101827, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101827.
- [15] University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Institute for Production Engineering, Serbia *et al.*, “ARTIFICIAL INTELIGENCE APPROACHE TO MODELING OF CUTTING FORCE AND TOOL WEAR RELATIONSHIPS DURING DRY MACHINING,” *J. Prod. Eng.*, vol. 21, no. 2, pp. 13–18, Dec. 2018, doi: 10.24867/JPE-2018-02-013.
- [16] B. E. L. R. Flaih, D. Yuvaraj, S. K. A. Jayanthiladevi, and T. S. Kumar, “Use Case of Artificial Intelligence in Machine Learning Manufacturing 4.0,” in *2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*, Dec. 2019, pp. 656–659, doi: 10.1109/ICCIKE47802.2019.9004327.

- [17] J. Lee, H. Davari, J. Singh, and V. Pandhare, "Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing Letters*, vol. 18, pp. 20–23, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.mfglet.2018.09.002.
- [18] T. R. Wanasinghe, R. G. Gosine, L. A. James, G. K. I. Mann, O. de Silva, and P. J. Warrian, "The Internet of Things in the Oil and Gas Industry: A Systematic Review," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 8654–8673, Sep. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2995617.
- [19] P. Ambika, "Machine learning and deep learning algorithms on the Industrial Internet of Things (IIoT)," in *Advances in Computers*, vol. 117, Elsevier, 2020, pp. 321–338.
- [20] J. Pushpa and S. A. Kalyani, "The fog computing/edge computing to leverage Digital Twin," in *Advances in Computers*, vol. 117, Elsevier, 2020, pp. 51–77.
- [21] V. Kamath, J. Morgan, and M. I. Ali, "Industrial IoT and Digital Twins for a Smart Factory : An open source toolkit for application design and benchmarking," in *2020 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, Jun. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/GIOTS49054.2020.9119497.
- [22] T. E. H. Project, "Eclipse Hono," *Eclipse Hono&trade;*; <https://www.eclipse.org/hono/> (accessed Feb. 13, 2021).
- [23] "Eclipse Ditto • open source framework for digital twins in the IoT." <https://www.eclipse.org/ditto/> (accessed Feb. 13, 2021).
- [24] "Apache Kafka," *Apache Kafka*. <https://kafka.apache.org/> (accessed Feb. 13, 2021).
- [25] "InfluxDB: Purpose-Built Open Source Time Series Database," *InfluxData*. <https://www.influxdata.com/> (accessed Feb. 13, 2021).
- [26] "Grafana: The open observability platform," *Grafana Labs*. <https://grafana.com/> (accessed Feb. 13, 2021).
- [27] P. Patel, M. I. Ali, and A. Sheth, "From Raw Data to Smart Manufacturing: AI and Semantic Web of Things for Industry 4.0," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 79–86, Jul. 2018, doi: 10.1109/MIS.2018.043741325.
- [28] P. Patel, *pankeshpatel/SWoTSuite*. 2017.
- [29] H. F. Atlam, M. A. Azad, A. G. Alzahrani, and G. Wills, "A Review of Blockchain in Internet of Things and AI," *BDCC*, vol. 4, no. 4, p. 28, Oct. 2020, doi: 10.3390/bdcc4040028.
- [30] S. Rathore, B. Wook Kwon, and J. H. Park, "BlockSecIoTNet: Blockchain-based decentralized security architecture for IoT network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 143, pp. 167–177, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jnca.2019.06.019.
- [31] S. K. Singh, S. Rathore, and J. H. Park, "BlockIoTIntelligence: A Blockchain-enabled Intelligent IoT Architecture with Artificial Intelligence," *Future Generation Computer Systems*, vol. 110, pp. 721–743, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.future.2019.09.002.
- [32] P. Evangeline and Anandhakumar, "Digital twin technology for 'smart manufacturing,'" in *Advances in Computers*, vol. 117, Elsevier, 2020, pp. 35–49.
- [33] Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, and X. Xu, "Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61, p. 101837, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [34] J. Wang, L. Ye, R. X. Gao, C. Li, and L. Zhang, "Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 12, pp. 3920–3934, Jun. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1552032.
- [35] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. P. Moreira, and P. Leitaó, "Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges," in *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, Jul. 2019, pp. 721–726, doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972134.
- [36] J. Vachálek, L. Bartalský, O. Rovný, D. Šišmišová, M. Morháč, and M. Lokšík, "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept," in *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, Jun. 2017, pp. 258–262, doi: 10.1109/PC.2017.7976223.
- [37] P. Franciosa, M. Sokolov, S. Sinha, T. Sun, and D. Ceglarek, "Deep learning enhanced digital twin for Closed-Loop In-Process quality improvement," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 369–372, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.110.

- [38] M. Raza, P. M. Kumar, D. V. Hung, W. Davis, H. Nguyen, and R. Trestian, “A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing,” in *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, Feb. 2020, pp. 73–77, doi: 10.1109/ICITM48982.2020.9080395.
- [39] M. A. Ali, Q. Guan, R. Umer, W. J. Cantwell, and T. Zhang, “Deep learning based semantic segmentation of  $\mu$ CT images for creating digital material twins of fibrous reinforcements,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 139, p. 106131, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106131.
- [40] Q. Wang, W. Jiao, and Y. Zhang, “Deep learning-empowered digital twin for visualized weld joint growth monitoring and penetration control,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 57, pp. 429–439, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.10.002.
- [41] Y. Xu, Y. Sun, X. Liu, and Y. Zheng, “A Digital-Twin-Assisted Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 19990–19999, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.
- [42] A. Bilberg and A. A. Malik, “Digital twin driven human–robot collaborative assembly,” *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 499–502, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.011.
- [43] F. De Pace, F. Manuri, and A. Sanna, “Augmented Reality in Industry 4.0,” *Am J Compt Sci Inform Technol*, vol. 06, no. 01, 2018, doi: 10.21767/2349-3917.100017.
- [44] T. Masood and J. Egger, “Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 58, pp. 181–195, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.02.003.
- [45] V. Paelke, “Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0 environment,” in *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2014, pp. 1–4, doi: 10.1109/ETFA.2014.7005252.
- [46] X. Yin, X. Fan, J. Wang, R. Liu, and Q. Wang, “An Automatic Interaction Method Using Part Recognition Based on Deep Network for Augmented Reality Assembly Guidance,” in *Volume 1B: 38th Computers and Information in Engineering Conference*, Quebec City, Quebec, Canada, Aug. 2018, p. V01BT02A018, doi: 10.1115/DETC2018-85810.
- [47] R. Masoni *et al.*, “Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 1296–1302, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.257.
- [48] M. Schneider, J. Rambach, and D. Stricker, “Augmented reality based on edge computing using the example of remote live support,” in *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, Mar. 2017, pp. 1277–1282, doi: 10.1109/ICIT.2017.7915547.
- [49] O. Wasenmuller, “Augmented Reality 3D Discrepancy Check in Industrial Applications,” p. 10, 2016.
- [50] M. Kostoláni, J. Murín, and Š. Kozák, “Intelligent predictive maintenance control using augmented reality,” in *2019 22nd International Conference on Process Control (PC19)*, Jun. 2019, pp. 131–135, doi: 10.1109/PC.2019.8815042.
- [51] I. Maly, D. Sedlacek, and P. Leitao, “Augmented reality experiments with industrial robot in industry 4.0 environment,” in *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Poitiers, France, Jul. 2016, pp. 176–181, doi: 10.1109/INDIN.2016.7819154.
- [52] K.-B. Park, M. Kim, S. H. Choi, and J. Y. Lee, “Deep learning-based smart task assistance in wearable augmented reality,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 63, p. 101887, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101887.
- [53] M. Funk, T. Kosch, R. Kettner, O. Korn, and A. Schmidt, “motionEAP: An Overview of 4 Years of Combining Industrial Assembly with Augmented Reality for Industry 4.0,” p. 4, 2016.
- [54] M. Funk, S. Mayer, M. Nistor, and A. Schmidt, “Mobile In-Situ Pick-by-Vision: Order Picking Support using a Projector Helmet,” p. 4.

- [55] M. Kozek, “Transfer Learning algorithm in image analysis with Augmented Reality headset for Industry 4.0 technology,” in *2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM)*, Jul. 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/MSM49833.2020.9201739.
- [56] Z.-H. Lai, W. Tao, M. C. Leu, and Z. Yin, “Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 55, pp. 69–81, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.02.010.
- [57] T. P. Carvalho, F. A. A. M. N. Soares, R. Vita, R. da P. Francisco, J. P. Basto, and S. G. S. Alcalá, “A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, p. 106024, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.106024.
- [58] Z. M. Çınar, A. Abdussalam Nuhu, Q. Zeeshan, O. Korhan, M. Asmael, and B. Safaei, “Machine Learning in Predictive Maintenance towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4.0,” *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8211, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12198211.
- [59] K. Wang and Y. Wang, “How AI Affects the Future Predictive Maintenance: A Primer of Deep Learning,” in *Advanced Manufacturing and Automation VII*, vol. 451, K. Wang, Y. Wang, J. O. Strandhagen, and T. Yu, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 1–9.
- [60] E. Sezer, D. Romero, F. Guedea, M. Macchi, and C. Emmanouilidis, “An Industry 4.0-Enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs,” in *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, Jun. 2018, pp. 1–8, doi: 10.1109/ICE.2018.8436307.
- [61] A. Cachada *et al.*, “Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture,” in *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Turin, Sep. 2018, pp. 139–146, doi: 10.1109/ETFA.2018.8502489.
- [62] K. Meesublak and T. Klinsukont, “A Cyber-Physical System Approach for Predictive Maintenance,” in *2020 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, Beijing, China, Aug. 2020, pp. 337–341, doi: 10.1109/SmartIoT49966.2020.00061.
- [63] H.-G. Kim, H.-S. Yoon, J.-H. Yoo, H.-I. Yoon, and S.-S. Han, “Development of Predictive Maintenance Technology for Wafer Transfer Robot using Clustering Algorithm,” in *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, Auckland, New Zealand, Jan. 2019, pp. 1–4, doi: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706485.
- [64] A. Massaro, I. Manfredonia, A. Galiano, L. Pellicani, and V. Birardi, “Sensing and Quality Monitoring Facilities Designed for Pasta Industry Including Traceability, Image Vision and Predictive Maintenance,” in *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*, Naples, Italy, Jun. 2019, pp. 68–72, doi: 10.1109/METROI4.2019.8792912.
- [65] M. R. Berthold *et al.*, “KNIME: The Konstanz Information Miner,” in *Data Analysis, Machine Learning and Applications*, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 319–326, doi: 10.1007/978-3-540-78246-9\_38.
- [66] R. Bodo, M. Bertocco, and A. Bianchi, “Fault Classification Driven by Maintenance Management for Smart Maintenance Applications,” in *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*, Roma, Italy, Jun. 2020, pp. 27–32, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138294.
- [67] G. A. Susto and A. Beghi, “Dealing with time-series data in Predictive Maintenance problems,” in *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Berlin, Germany, Sep. 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ETFA.2016.7733659.
- [68] Z. Huang, V. C. Angadi, M. Danishvar, A. Mousavi, and M. Li, “Zero Defect Manufacturing of Microsemiconductors – An Application of Machine Learning and Artificial Intelligence,” in *2018 5th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, Nov. 2018, pp. 449–454, doi: 10.1109/ICSAI.2018.8599292.
- [69] K. Jafarian, M. Darjani, and Z. Honarkar, “Vibration analysis for fault detection of automobile engine using PCA technique,” in *2016 4th International Conference on Control*,

- Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, Qazvin, Iran, Jan. 2016, pp. 372–376, doi: 10.1109/ICCIAutom.2016.7483191.
- [70] M. Subha, N. S. Kumar, and K. S. K. Veni, “Artificial Intelligence Based Stator Winding Fault Estimation in Three Phase Induction Motor,” in *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, Mar. 2018, pp. 1929–1933, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474562.
- [71] V. Kavana and M. Neethi, “Fault Analysis and Predictive Maintenance of Induction Motor Using Machine Learning,” in *2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICECCOT)*, Msyuru, India, Dec. 2018, pp. 963–966, doi: 10.1109/ICECCOT43722.2018.9001543.
- [72] J. H. Lee, H. M. Oh, and M. Y. Kim, “Deep learning based 3D defect detection system using photometric stereo illumination,” in *2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, Feb. 2019, pp. 484–487, doi: 10.1109/ICAIIIC.2019.8669005.
- [73] M. Soualhi, “Pattern recognition method of fault diagnostics based on a new health indicator for smart manufacturing,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 20, 2020.
- [74] T. dos Santos, F. J. T. E. Ferreira, J. M. Pires, and C. Damasio, “Stator winding short-circuit fault diagnosis in induction motors using random forest,” in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, USA, May 2017, pp. 1–8, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002350.
- [75] Z. Li, Y. Wang, and K.-S. Wang, “Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario,” *Adv. Manuf.*, vol. 5, no. 4, pp. 377–387, Dec. 2017, doi: 10.1007/s40436-017-0203-8.
- [76] M. Nurmimaki, “Quality 4.0: The 3 Most Important Technologies for Manufacturers,” p. 14.
- [77] N. H. M. Zaidin, M. N. M. Diah, and S. Sorooshian, “Quality management in industry 4.0 era,” *J.M.S.*, vol. 1, no. 2, pp. 182–191, Jun. 2018, doi: 10.26524/jms.2018.17.
- [78] M. Meiners, A. Mayr, M. Thomsen, and J. Franke, “Application of Machine Learning for Product Batch Oriented Control of Production Processes,” *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 431–436, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.006.
- [79] T. Brito, J. Queiroz, L. Piardi, L. A. Fernandes, J. Lima, and P. Leitão, “A Machine Learning Approach for Collaborative Robot Smart Manufacturing Inspection for Quality Control Systems,” *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 11–18, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.003.
- [80] R. Cunha *et al.*, “Applying Non-destructive Testing and Machine Learning to Ceramic Tile Quality Control,” in *2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, Nov. 2018, pp. 54–61, doi: 10.1109/SBESC.2018.00017.
- [81] G. San-Payo, J. C. Ferreira, P. Santos, and A. L. Martins, “Machine learning for quality control system,” *J Ambient Intell Human Comput*, vol. 11, no. 11, pp. 4491–4500, Nov. 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01640-4.
- [82] F. Eger, C. Reiff, M. Colledani, and A. Verl, “Knowledge Capturing Platform in Multi-Stage Production Systems for Zero-Defect Manufacturing,” in *2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, Nov. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/M2VIP.2018.8600910.
- [83] F. Psarommatis, G. May, P.-A. Dreyfus, and D. Kiritsis, “Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1605228.
- [84] M. C. Magnanini, M. Colledani, and D. Caputo, “Reference architecture for the industrial implementation of Zero-Defect Manufacturing strategies,” *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 646–651, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.154.
- [85] F. Eger, P. Tempel, M. C. Magnanini, C. Reiff, M. Colledani, and A. Verl, “Part Variation Modeling in Multi-Stage Production Systems for Zero-Defect Manufacturing,” in *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Feb. 2019, pp. 1017–1022, doi: 10.1109/ICIT.2019.8754964.

- [86] F. Eger, C. Reiff, B. Brantl, M. Colledani, and A. Verl, “Correlation analysis methods in multi-stage production systems for reaching zero-defect manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 635–640, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.163.
- [87] B. D. Bunday *et al.*, “Value-Added Metrology,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 20, no. 3, pp. 266–277, Aug. 2007, doi: 10.1109/TSM.2007.901851.
- [88] Y.-J. Chang, Y. Kang, C.-L. Hsu, C.-T. Chang, and T. Y. Chan, “Virtual Metrology Technique for Semiconductor Manufacturing,” p. 5.
- [89] A. Ferreira *et al.*, “Virtual metrology models for predicting a vera PECVD oxide film thickne,” in *2011 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, Saratoga Springs, NY, USA, May 2011, pp. 1–6, doi: 10.1109/ASMC.2011.5898187.
- [90] P. Kang, D. Kim, H. Lee, S. Doh, and S. Cho, “Virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 3, pp. 2508–2522, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.08.040.
- [91] G. Roeder *et al.*, “Framework for integration of virtual metrology and predictive maintenance,” in *2012 SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, Saratoga Springs, NY, May 2012, pp. 288–293, doi: 10.1109/ASMC.2012.6212913.
- [92] S. Kang and P. Kang, “An intelligent virtual metrology system with adaptive update for semiconductor manufacturing,” *Journal of Process Control*, vol. 52, pp. 66–74, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jprocont.2017.02.002.
- [93] A. I. Khan and S. Al-Habsi, “Machine Learning in Computer Vision,” *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 1444–1451, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.355.
- [94] J. Le, “The 5 Computer Vision Techniques That Will Change How You See The World,” *Medium*, Jan. 29, 2020. <https://heartbeat.fritz.ai/the-5-computer-vision-techniques-that-will-change-how-you-see-the-world-1ee19334354b> (accessed Feb. 09, 2021).
- [95] T. Rymarczyk, K. Kania, J. Szumowski, P. Tchórzewski, P. Adamkiewicz, and J. Sikora, “Quality control system for data acquisition and image reconstruction with smart hybrid ECT device,” in *2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW)*, May 2018, pp. 196–199, doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388356.
- [96] A. Massaro, I. Manfredonia, A. Galiano, and N. Contuzzi, “Inline Image Vision Technique for Tires Industry 4.0: Quality and Defect Monitoring in Tires Assembly,” in *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0 IoT)*, Jun. 2019, pp. 54–57, doi: 10.1109/METRO14.2019.8792911.
- [97] R. Ozdemir and M. Koc, “A Quality Control Application on a Smart Factory Prototype Using Deep Learning Methods,” in *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Sep. 2019, vol. 1, pp. 46–49, doi: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929734.
- [98] K. Kottari, K. Delibasis, and V. Plagianakos, “Real time measurements for quality control of industrial rod manufacturing,” in *2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, Oct. 2016, pp. 423–428, doi: 10.1109/IST.2016.7738263.
- [99] V. Gorbunov, V. Bobkov, N. W. Htet, and E. Ionov, “Automated control system of fabrics parameters that uses computer vision,” in *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*, Jan. 2018, pp. 1728–1730, doi: 10.1109/EIconRus.2018.8317438.
- [100] E. Zancul, H. O. Martins, F. P. Lopes, and F. A. T. V. da Silva Neto, “Machine Vision applications in a Learning Factory,” *Procedia Manufacturing*, vol. 45, pp. 516–521, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.069.
- [101] “Qu4lity,” *Qu4lity*. <https://qu4lity-project.eu/> (accessed Nov. 28, 2020).
- [102] “QU4LITY Project.” <https://cordis.europa.eu/project/id/825030> (accessed Nov. 28, 2020).
- [103] F. Bernardini, O. Lazaro, I. Cairo, and M. Valli, “New visions towards zero defect manufacturing,” p. 6.
- [104] M. Sesana and A. Moussa, “Collaborative Augmented worker and Artificial Intelligence in Zero defect Manufacturing environment,” *MATEC Web Conf.*, vol. 304, p. 04003, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201930404003.

- [105] F. Eger *et al.*, “Zero Defect Manufacturing Strategies for Reduction of Scrap and Inspection Effort in Multi-stage Production Systems,” *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 368–373, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.228.
- [106] “ForZDM Project.” <https://www.forzdmproject.eu/> (accessed Nov. 28, 2020).
- [107] “STREAM-0D,” *STREAM-0D*. <https://www.stream-0d.com/> (accessed Nov. 28, 2020).
- [108] interTEN, “Z-Factor,” *Z-Factor*. <https://www.z-factor.eu/> (accessed Nov. 28, 2020).
- [109] G. May and D. Kiritsis, “Zero Defect Manufacturing Strategies and Platform for Smart Factories of Industry 4.0,” in *Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, L. Monostori, V. D. Majstorovic, S. J. Hu, and D. Djurdjanovic, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 142–152.
- [110] “GOOD MAN – Agent Oriented Zero Defect Multi-Stage Manufacturing.” <http://goodman-project.eu/> (accessed Dec. 20, 2020).
- [111] R. Peres, A. D. Rocha, J. P. Matos, and J. Barata, “GOODMAN Data Model - Interoperability in Multistage Zero Defect Manufacturing,” in *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Jul. 2018, pp. 815–821, doi: 10.1109/INDIN.2018.8472017.
- [112] M. R. J. Eleftheriadis, “A guideline of quality steps towards Zero Defect Manufacturing in Industry,” p. 9, 2016.
- [113] “IFaCOM Project.” <https://cordis.europa.eu/project/id/285489> (accessed Dec. 20, 2020).
- [114] “KYKLOS 4.0.” <https://kyklos40project.eu/> (accessed Dec. 20, 2020).
- [115] “PreCoM,” *PreCom Project*. <https://www.precom-project.eu/project-overview/> (accessed Jan. 19, 2021).
- [116] “Fortissimo.” <https://www.fortissimo-project.eu/> (accessed Jan. 20, 2021).
- [117] “DataPorts.” <https://dataports-project.eu/> (accessed Jan. 19, 2021).
- [118] administrator, “SERENA,” *SERENA*. <https://serena-project.eu/> (accessed Dec. 20, 2020).
- [119] administrator, “SERENA Methodology,” *SERENA*. <http://serena-project.eu/scope/> (accessed Jan. 17, 2021).
- [120] “PREVISION.” <http://www.prevision-h2020.eu/> (accessed Dec. 20, 2020).
- [121] “F2F\_core-diagram.png (2048×1280).” [https://factory2fit.eu/wp-content/uploads/2018/03/F2F\\_core-diagram.png](https://factory2fit.eu/wp-content/uploads/2018/03/F2F_core-diagram.png) (accessed Jan. 17, 2021).
- [122] “Factory2Fit Empowering and participatory adaptation of factory automation to fit for workers | EFFRA Innovation Portal.” <https://portal.effra.eu/project/1627> (accessed Jan. 17, 2021).
- [123] M. Staffa *et al.*, “An OpenNCP-based Solution for Secure eHealth Data Exchange,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 116, pp. 65–85, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jnca.2018.05.012.
- [124] konfidomanager, “The KONFIDO Concept,” *KONFIDO*, Jan. 24, 2014. <https://konfido-project.eu/content/konfido-concept> (accessed Jan. 17, 2021).
- [125] “RECLAIM Project.” <https://cordis.europa.eu/project/id/869884> (accessed Jan. 18, 2021).
- [126] I. Daniyan, K. Mpofu, M. Oyesola, B. Ramatsetse, and A. Adeodu, “Artificial intelligence for predictive maintenance in the railcar learning factories,” *Procedia Manufacturing*, vol. 45, pp. 13–18, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.032.



