

**Σύγχρονοι μέθοδοι προγραμματισμού για
Βιομηχανικούς Αυτοματισμούς**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του

ΕΥΔΙΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΜ46286

**Σχολή Μηχανικών Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και
Παραγωγής**

Επιβλέπων Καθηγητής

Παπουτσιδάκης Μιχαήλ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022

Τίτλος Εργασίας: Σύγχρονοι μέθοδοι προγραμματισμού για
Βιομηχανικούς Αυτοματισμούς

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την
κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/ α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
	Επιβλέπων Καθηγητής Παπουτσιδάκης Μιχαήλ	Καθηγητής	
	Θεοχάρης Ευστάθιος	ΕΔΙΠ Α΄	
	Σορτ Ανδρέας Ρόναλντ	ΕΔΙΠ Α΄	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ευδίας Παναγιώτης του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 46286 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου». Ο

Δηλών

Ευδίας Παναγιώτης



CamScanner

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

Περίληψη πτυχιακής εργασίας:

Στην διπλωματική εργασία σύγχρονοι μέθοδοι προγραμματισμού για Βιομηχανικούς Αυτοματισμούς γίνεται ανάλυση συστημάτων πχ το Edge computing όπου αναφέρεται η αρχιτεκτονική του και παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές του στην βιομηχανία. Επίσης αναλύονται συστήματα όπως το SCADA/PLC/PAC/IO-LINK. Παρουσιάζεται η χρήση του PLC στην σύγχρονη βιομηχανία και δίνονται κάποια παραδείγματα εφαρμογών. Ακόμα γίνεται ανάλυση του Micro PLC των πλεονεκτημάτων του και της αρχιτεκτονικής του. Τέλος γίνεται ανάλυση της εφαρμογής του Smart Control Box και παρουσιάζεται πως χρησιμοποιείται στην σύγχρονη βιομηχανία επίσης δίνεται ένα παράδειγμα μια εφαρμογής κιβωτίου ελέγχου για το πως συμπεριφέρεται σε διάφορες καταστάσεις.

Λέξεις κλειδιά

Edge computing, PLC, PAC, Smart Control Box, SCADA, IO-LINK, Industry 4.0, Micro PLC

Abstract

In the diploma thesis modern programming methods for Industrial Automation systems are analyzed, for example Edge computing where its architecture is mentioned and some of its applications in industry are presented. Systems such as SCADA/PLC/PAC/IO-LINK are also analyzed. The use of PLC in modern industry is presented and some application examples are given. Micro PLC is still analyzed, its advantages and its architecture. Finally, the application of the Smart Control Box is analyzed and it is shown how it is used in modern industry, also an example of a control box application is given for how it behaves in various situations.

Key Words

Edge computing,PLC,PAC, Smart Control Box,SCADA, IO-LINK, Industry 4.0,Micro PLC

Περιεχόμενα

1.	Βιομηχανικό Edge Computing.....	7
1.1.	Ευφυείς Υπηρεσίες σε Επίπεδο Συσκευής.....	8
1.2.	Απαιτήσεις Συστημάτων Βιομηχανικού Edge Computing	11
1.3.	Περιγραφή Edge Computing.....	16
1.4.	Εφαρμογές Βιομηχανικού Edge Computing	20
1.5.	Edge Computing για Ανίχνευση Σφαλμάτων σε Έξυπνα Συστήματα.....	24
1.6.	Συνδυασμός Λογικών Ελεγκτών και IoT για την Υποστήριξη του Edge Computing στη Βιομηχανία.....	30
1.6.1.	Μεγάλα Δεδομένα	31
1.6.2.	Πρότυπο βιομηχανικών Πρωτοκόλλων.....	31
2.	Αρχιτεκτονικές Edge Computing στον Βιομηχανικό Αυτοματισμό	32
2.1.	Μοντέλο Αρχιτεκτονικής Βιομηχανικού Edge Computing.....	32
2.1.1.	Αρχιτεκτονική 3D Επιπέδων IoT	35
2.1.2.	Επίπεδα Ιεραρχίας.....	37
2.1.3.	Επίπεδα	38
2.2.	Βασικές Αρχιτεκτονικές Edge Computing	42
2.2.1.	SCADA.....	43
2.2.2.	PLC.....	45
2.2.3.	PAC	46
2.2.4.	IO- LINK.....	47
3.	Το PLC ως Έξυπνη Υπηρεσία στη Βιομηχανία 4.0	50
3.1.	Σύγχρονη Τεχνολογία PLC.....	51
3.2.	Παγκόσμια Δικτύωση Δεδομένων Διαδικασιών.....	52
3.3.	Εισαγωγή Αρχών Υπηρεσιών	53
3.4.	Εικονικοποίηση PLC.....	53
3.5.	IoT-PLC για τη Βιομηχανία 4.0	55
3.6.	Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης για τον Εντοπισμό Σφαλμάτων σε Διαδικασίες PLC ..	60
4.	Χρήση Micro PLC με Απόδοση Κόστους και Ενέργειας στην Industry 4.0	67
4.1.	Υπάρχουσες Υποδομές	68
4.2.	Η Περίπτωση του Micro PLC στον Αυτοματισμό	70
4.3.	Το MicroPLC ως Σύνδεσμος CPS	73
5.	Εφαρμογή του Smart Control Box.....	76

5.1.	Εννοιολογικό Πλαίσιο Εφαρμογής Smart Control Box	76
5.1.1.	Επίπεδο Εξοπλισμού	76
5.1.2.	Επίπεδο Σύνδεσης	77
5.1.3.	Επίπεδο Μετατροπής	77
5.1.4.	Επίπεδο Γνωστικής Λειτουργίας και Γνώσης.....	77
5.1.5.	Επίπεδο Εφαρμογής	77
5.2.	Ανάπτυξη Smart Control Box	78
5.2.1.	Ο Ρόλος του PLC στο Smart Control Box	81
5.2.2.	Μονάδα Μικροελέγχου (MCU)	81
5.2.3.	Υπολογιστής Μονής Πλακέτας	82
5.2.4.	Εφαρμογή Smart Control Box.....	82
6.	Συμπεράσματα.....	85
	Βιβλιογραφία	88

1. Βιομηχανικό Edge Computing

Ο όρος υπολογιστική (computing) περιγράφει μια κατανεμημένη πλατφόρμα που ενσωματώνει πόρους επικοινωνίας, υπολογισμών και αποθήκευσης για την εκτέλεση εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο για τις οποίες μπορεί να είναι προσπελάσιμη απευθείας από το cloud. Αποτελεί ένα βήμα προς τη βιομηχανική επανάσταση του Διαδικτύου, τη Βιομηχανική Υπολογιστική αιχμής έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει την ευέλικτη συνδεσιμότητα, τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και τη βελτιστοποίηση δεδομένων, ενώ παράλληλα επιτρέπει τις έξυπνες εφαρμογές, διασφαλίζοντας την αυστηρή ασφάλεια και την προστασία του απορρήτου. Χρησιμοποιεί τους κόμβους υπολογιστικής ακμής (edge computing nodes-ECN), οι οποίοι γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου λειτουργώντας ως έξυπνες πύλες για περιουσιακά στοιχεία, υπηρεσίες και συστήματα. Τα πρότυπα IEEE P2805 αναπτύσσονται για τον καθορισμό πρωτοκόλλων για αυτοδιαχείριση, απόκτηση δεδομένων και μηχανική μάθηση μέσω της συνεργασίας νέφους και αιχμής (cloud-edge) σε ECN.

1.1. Ευφυείς Υπηρεσίες σε Επίπεδο Συσκευής

Τα συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού μετατρέπονται σε πλήρως ψηφιοποιημένα πληροφοριακά συστήματα. Τα παλαιού τύπου συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού ταξινομούνται ως παραδείγματα αρχιτεκτονικής αναφοράς 5 επιπέδων, σύμφωνα με το Πρότυπο 95 της Διεθνούς Εταιρείας Αυτοματισμού (ISA-95) (Σχήμα 1) (Scholten, 2007). Τα επίπεδα 0, 1 και 2 αποτελούν το επίκεντρο του ελέγχου και της παρακολούθησης του βιομηχανικού αυτοματισμού. Οι τυπικοί ρυθμοί ενημέρωσης σε αυτά τα επίπεδα είναι μέσα σε δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου. Τα επίπεδα 3 και 4 έχουν σχεδιαστεί για τη διαχείριση της παραγωγικής λειτουργίας και των επιχειρηματικών λειτουργιών. Αυτά τα συστήματα απαιτούν οι καθημερινές αποφάσεις να λαμβάνονται σε εβδομαδιαία ή μηνιαία βάση.

Τα επίπεδα στην πυραμίδα ISA-95 ταξινομούνται κυρίως σε δύο ομάδες με βάση τους περιορισμούς τους σε πραγματικό χρόνο. Όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 1, τα συστήματα εκτέλεσης παραγωγής και τα συστήματα προγραμματισμού πόρων της επιχείρησης θα μπορούσαν να μετακινηθούν σε βιομηχανικό νέφος λόγω των χαμηλών απαιτήσεων σε πραγματικό χρόνο και του υψηλού όγκου δεδομένων. Εν τω μεταξύ, τα επίπεδα 0-2 θα πρέπει να παραμείνουν στο πάτωμα της πυραμίδας λόγω των υψηλών περιορισμών σε πραγματικό χρόνο. Την τελευταία δεκαετία, το κόστος της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας, της αποθήκευσης και του εύρους ζώνης επικοινωνίας έχει μειωθεί. Με χαμηλότερο κόστος συνδεσιμότητας, περισσότερη υπολογιστική ισχύ και μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο σε επίπεδο συσκευής, οι δυνατότητες αυτοδιαχείρισης, όπως η αυτοανακάλυψη, η αυτομάθηση και η αυτοβελτιστοποίηση, θα μπορούσαν να επιτευχθούν με υψηλούς περιορισμούς σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η νοημοσύνη θα μπορούσε να εισαχθεί σε αλληλένδετους τομείς προκειμένου να ενισχύσει τη συνεργασία μεταξύ των κόμβων ακμών, των ανθρώπων, των υποσυστημάτων αλλά και του βιομηχανικού νέφους.

Η Βιομηχανική αιχμή παρέχει έξυπνες υπηρεσίες σε επίπεδο συσκευής με βελτιστοποιημένη χρήση πόρων επικοινωνίας, υπολογισμού και αποθήκευσης (Shi et al., 2016). Σε βιομηχανικές εφαρμογές, οι υπολογιστές αιχμής θα μπορούσαν να εισάγουν ευέλικτη συνδεσιμότητα, έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποίηση δεδομένων και

έξυπνη λήψη αποφάσεων σε παλαιού τύπου συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού και εποπτικού ελέγχου. Οι ECN περιλαμβάνουν έξυπνες συσκευές, έξυπνες πύλες, έξυπνα συστήματα και έξυπνα τοπικά νέφη. Η Βιομηχανική υπολογιστική αιχμής αντιμετωπίζει επίσης ορισμένες νέες προκλήσεις που έχουν να κάνουν με τη συνδεσιμότητα, η οποία είναι σημαντική στους καταναμημένους υπολογιστές.

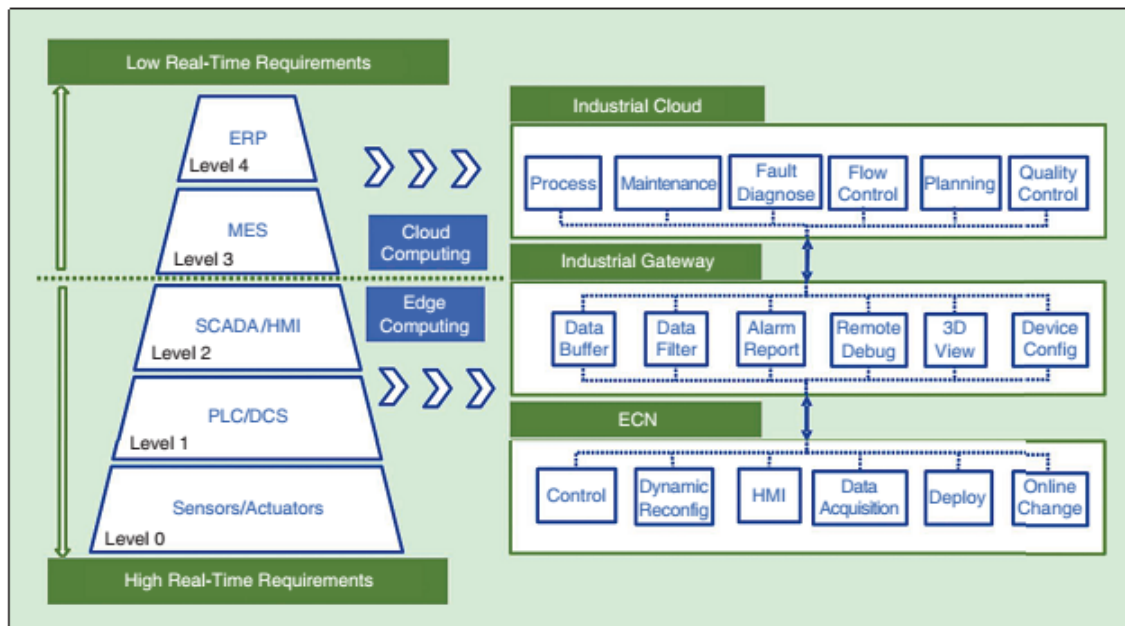
Η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή απαιτεί διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων υπαρχόντων βιομηχανικών διαύλων πεδίου καθώς και των αναδυόμενων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων ευαίσθητων στο χρόνο (Finn, 2018), δικτύων που καθορίζονται από λογισμικό και 5G. Τα υπάρχοντα βιομηχανικά fieldbus δεν είναι συμβατά μεταξύ τους ακόμη όπως ορίζεται και στο Πρότυπο 61158 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής. Οι ερευνητές πρέπει να λύσουν το πρόβλημα του τρόπου αντιμετώπισης των περιορισμών σε πραγματικό χρόνο, ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις για επεκτασιμότητα και αξιοπιστία ετερογενών δικτύων για την Βιομηχανική υπολογιστική αιχμής.

Μια δεύτερη πρόκληση αφορά την εξόρυξη δεδομένων, την οποία επιτρέπει η (βιομηχανική υπολογιστική αιχμή). Οι ερευνητές πρέπει να καθορίσουν τον καλύτερο τρόπο εκτέλεσης αποτελεσματικής εξόρυξης δεδομένων σε κόμβους ακμών. Οι ECN ως σημεία εισαγωγής απόκτησης δεδομένων παράγουν συνήθως τεράστιες ποσότητες δεδομένων διεργασίας σε πραγματικό χρόνο με διαστήματα στην περιοχή του χιλιοστού του δευτερολέπτου. Αυτά τα δεδομένα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση μιας ολόκληρης λειτουργίας και να εφαρμοστούν, για παράδειγμα, στη διαχείριση του κύκλου ζωής του προϊόντος, στην προληπτική συντήρηση, στη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων και στη βελτιστοποίηση του ελέγχου. Με την υιοθέτηση της βελτιστοποίησης δεδομένων για υπολογιστές αιχμής, μπορεί να εξασφαλιστεί η επικαιρότητα και η επικύρωση των επεξεργασμένων δεδομένων για αυτές τις βιομηχανικές εφαρμογές.

Εν συνεχεία, ο έλεγχος και η ανίχνευση για τις βιομηχανικές ακμές τυπικά απαιτούν χρόνους απόκρισης της τάξης των δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου ή λιγότερο. Εν τω μεταξύ, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή απαιτεί δυναμική αναδιαμόρφωση και διανομή των υπολογιστικών πόρων και αποθήκευσης για καταναμημένο έλεγχο και

ασφάλεια. Οι ταχύτητες σε επίπεδο χιλιοστού του δευτερολέπτου δεν μπορούν να επιτευχθούν εάν πρέπει να εκτελεστούν ταυτόχρονα άλλες λειτουργίες, όπως ο έλεγχος, η ανίχνευση σφαλμάτων και η απόκτηση δεδομένων. Έτσι, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή πρέπει να προσφέρει κατανεμημένη εξισορρόπηση φορτίου, βελτιστοποίηση και δυναμική αναδιαμόρφωση.

Τέλος, με τη συγκριτική άποψη των τεχνολογιών πληροφοριών και των τεχνολογιών λειτουργίας, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή αντιμετωπίζει την πρόκληση του τρόπου διασφάλισης της ασφάλειας των κόμβων, των δικτύων και των εφαρμογών, καθώς και του τρόπου παροχής διαφορετικών επιπέδων ελέγχου πρόσβασης χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση σε πραγματικό χρόνο. Ο τρόπος διασφάλισης της ακεραιότητας, του απορρήτου και της ιδιοκτησίας των κατανεμημένων κόμβων είναι επίσης ένας βασικός παράγοντας για την ασφάλεια και την εγγύηση των δεδομένων για τους βιομηχανικούς υπολογιστές αιχμής.

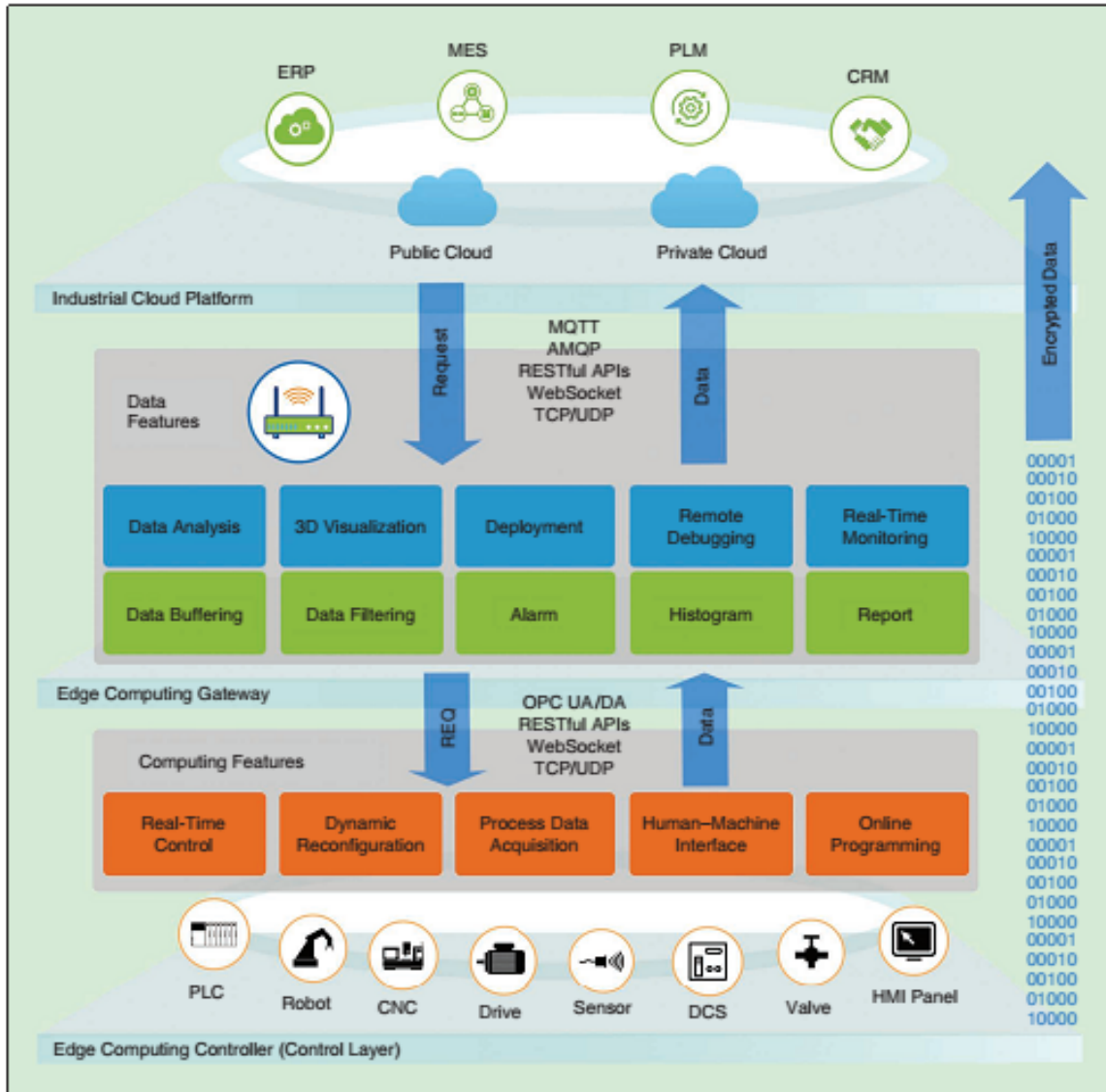


Σχήμα 1. Διάγραμμα που δείχνει την αρχιτεκτονική αναφοράς ISA-95 που αντιστοιχίζεται σε βιομηχανικό νέφος και υπολογιστές ακμών. ERP: προγραμματισμός πόρων της επιχείρησης. MES: σύστημα εκτέλεσης παραγωγής. SCADA/HMI: εποπτικός έλεγχος και απόκτηση δεδομένων/διεπαφή ανθρώπινου-μηχανής. PLC/DCS: προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής/κατανεμημένο σύστημα ελέγχου. Reconfig: επαναδιαμόρφωση.

1.2. Απαιτήσεις Συστημάτων Βιομηχανικού Edge Computing

Όπως αναφέρεται στο προτεινόμενο μοντέλο αναφοράς στο Σχήμα 2, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή θα μπορούσε να βοηθήσει και να συνεργαστεί με το βιομηχανικό νέφος με διάφορους τρόπους. Η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή θα μπορούσε να είναι διαχειρίσιμη και να εξισορροπεί τους τοπικούς πόρους των υπολογιστών, αποθήκευσης, δικτύωσης και εικονικοποίησης με ταχύτητες σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Η δοκιμαστική βιομηχανική υπολογιστική αιχμής μπορεί επίσης να διανέμει και να εκτελεί στρατηγικές που δημιουργούνται από βιομηχανικά νέφη, συμπεριλαμβανομένων των στρατηγικών που αφορούν στη διαχείριση συσκευών, πόρων και συνδέσεων.

Από την άποψη των δεδομένων, τα ECN χρησιμοποιούνται κυρίως για την απόκτηση δεδομένων και την εκτέλεση προκαταρκτικής επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων με βάση προκαθορισμένους κανόνες. Τα βιομηχανικά σύννεφα παρέχουν αποθήκευση, ανάλυση και εξόρυξη από τεράστιες ποσότητες δεδομένων που συλλέγονται από πολλαπλά ECN. Με αποτελεσματικά δεδομένα που ρέουν μεταξύ του νέφους και της ακμής, το κόστος ανίχνευσης της ποιότητας προϊόντων βάσει των δεδομένων αλλά και της εξόρυξης δεδομένων θα μπορούσε να μειωθεί.



Σχήμα 2. Διάγραμμα που δείχνει το μοντέλο αναφοράς του υπολογιστικού άκρου της βιομηχανίας. ERP: προγραμματισμός πόρων της επιχείρησης. PLM: διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντος. MQTT: Μεταφορά τηλεμετρίας σε ουρά μηνυμάτων. AMQP: Προηγμένο πρωτόκολλο ουράς μηνυμάτων. API: διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών. TCP/UDP: Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης/Πρωτόκολλο Δεδομένων Χρήστη. REQ: αίτημα.

Στον τομέα της εφαρμογής, η βιομηχανική αιχμή παρέχει περιβάλλοντα εκτέλεσης, εκτελεί σχέδια ανάπτυξης και παρακολουθεί τους κύκλους ζωής των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί. Για παράδειγμα, μετά την εκπαίδευση τους, τα μοντέλα μηχανικής μάθησης στο βιομηχανικό νέφος, ενδέχεται να αναπτυχθούν σε ECN για εξαγωγή συμπερασμάτων και συλλογιστική. Για τυπικές εφαρμογές στο βιομηχανικό νέφος

(δηλαδή ανάπτυξη, δοκιμές, ψηφιακά δίδυμα), τα ECN φιλοξενούν ευέλικτες και διαλειτουργικές μονάδες που βασίζονται σε σχεδιασμό βασισμένο σε στοιχεία (Leavens, & Sitaraman, 2000) και μικροϋπηρεσίες. Ωστόσο, ορισμένες από αυτές τις δυνατότητες μπορεί να μην είναι απαραίτητες για ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, στους πυρηνικούς σταθμούς δεν συνιστώνται βιομηχανικά νέφη για λόγους ασφαλείας.

Ως συμπλήρωμα στα βιομηχανικά νέφη, η βιομηχανία υπολογιστικής αιχμής παρέχει διαλειτουργικότητα, επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αυτοβελτιστοποίηση, χαρακτηριστικά τα οποία δεν αποτελούν τον κύριο στόχο των βιομηχανικών νεφών. Η διαλειτουργικότητα εξασφαλίζει κάθετη και οριζόντια ενοποίηση από τη μετάβαση δεδομένων σε επίπεδο συστήματος σε ανταλλαγή δεδομένων από συσκευή σε συσκευή. Με την πλήρη διαλειτουργικότητα στα ECN, η ευέλικτη και καταναμημένη συνεργασία μπορεί να εισαχθεί σε ολόκληρο τον κύκλο των διαδικασιών παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με το σχεδιασμό προϊόντων, την παραγωγή, τη διαχείριση και την αλυσίδα εφοδιασμού. Η μέγιστη χρήση των πόρων μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή της συνεργασίας νέφους-αιχμής σε νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στην αιχμή θα μειώσει τον φόρτο εργασίας του βιομηχανικού νέφους. Η απόκτηση δεδομένων, η προεπεξεργασία, η βαθμονόμηση και η μετατροπή μπορούν να ολοκληρωθούν σε πραγματικό χρόνο σε συσκευές αιχμής χωρίς την αποστολή τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων σε βιομηχανικό νέφος. Τέλος, με ένα μείγμα πόρων βιομηχανικού νέφους και υπολογιστικών πόρων, η βελτιστοποίηση βάσει δεδομένων θα μπορούσε να επεκταθεί σε κόμβους ακμών. Οι περιορισμοί σε πραγματικό χρόνο καθώς και οι απαιτήσεις απόδοσης δεδομένων θα μπορούσαν να καλυφθούν με την υιοθέτηση προεκπαιδευμένων μοντέλων μηχανικής μάθησης από βιομηχανικό νέφος και καταναμημένη συλλογιστική.

Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, τα ECN πρέπει να πληρούν ορισμένες βασικές απαιτήσεις για υπολογιστές, αποθήκευση και επικοινωνία. Πρώτον, η θεμελιώδης απαίτηση του βιομηχανικού υπολογισμού αιχμής είναι η ικανότητα εφαρμογής αυτόματου ελέγχου. Με την υποστήριξη των ECN, η ακρίβεια του αυτόματου ελέγχου

για μηχανές, συστήματα και διαδικασίες θα μπορούσε να βελτιωθεί με τεχνικές αυτόματης ανίχνευσης σφαλμάτων, επεξεργασίας πληροφοριών και ελέγχου λειτουργίας, ενώ διασφαλίζονται οι περιορισμοί σε πραγματικό χρόνο.

Δεύτερον, αντί της επεξεργασίας δεδομένων με χρήση κέντρων δεδομένων ή του νέφους, η εξόρυξη δεδομένων και η ανάλυση θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν σε επίπεδο χιλιοστών του δευτερολέπτου βασιζόμενοι αποκλειστικά σε πόρους υπολογιστών αιχμής. Η αποτελεσματικότητα της ανάλυσης δεδομένων θα βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό με τη μείωση των καθυστερήσεων επικοινωνίας μεταξύ της αιχμής και του νέφους. Η τελική απαίτηση είναι η βελτιστοποίηση που βασίζεται κυρίως στην εξόρυξη δεδομένων και στην ανακάλυψη γνώσης. Η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή θα πρέπει να παρέχει φιλτράρισμα και αποθήκευση δεδομένων για να μειώσει την περιττή επικοινωνία, να εξοικονομήσει υπολογιστικό κόστος μη έγκυρων πληροφοριών και να βελτιώσει την ακρίβεια των δεδομένων για ανάκτηση και αξιολογήσεις ολόκληρων διαδικασιών παραγωγής.

Για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων, ορισμένοι πόροι είναι υποχρεωτικοί. Ένας από αυτούς τους πόρους είναι ο πόρος επικοινωνίας. Τα βιομηχανικά ECN όχι μόνο πρέπει να διασφαλίζουν την πληρότητα των δεδομένων και τον ντετερμινιστικό λανθάνοντα χρόνο μετάδοσης, αλλά και να υποστηρίζουν την ευέλικτη ανάπτυξη. Τα ευαίσθητα στον χρόνο δίκτυα (Gutiérrez et al., 2017) τα δίκτυα που ορίζονται από λογισμικό και οι λύσεις που βασίζονται σε Ethernet σε πραγματικό χρόνο (Danielis et al., 2014) είναι οι βασικές τεχνολογίες για την υποστήριξη της βιομηχανικής υπολογιστικής αιχμής. Ο δεύτερος πόρος είναι ο υπολογιστικός πόρος, ιδιαίτερα η ετερογενής υπολογιστική. Με τις υπολογιστικές (computing) (μοντέλα μηχανικής μάθησης) και τις δομές δεδομένων (σχεσιακές και μη σχεσιακές) από την αιχμή να γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, ετερογενή υπολογιστικά μοντέλα που συνδυάζουν αισθητήρες, ελεγκτές, πύλες, ακόμη και τοπικά νέφη καθίστανται απαραίτητα για την εξισορρόπηση της απόδοσης, την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της φορητότητας. Ο τρίτος πόρος είναι η ικανότητα αποθήκευσης για τις συσκευές αιχμής. Για την ανίχνευση πληροφοριών σε διαστήματα χιλιοστών του δευτερολέπτου από αισθητήρες συνδεδεμένους με τον φυσικό κόσμο,

τεράστιες ποσότητες δεδομένων πρέπει να συλλέγονται, να φιλτράρονται και να αποθηκεύονται στην προσωρινή μνήμη πριν από την περαιτέρω ανάλυση είτε στο νέφος είτε στην αιχμή. Οι βάσεις δεδομένων χρονοσειρών έχουν γίνει δημοφιλείς στη βιομηχανική υπολογιστική αιχμή για γρήγορη εισαγωγή και αναζήτηση χωρίς ενημέρωση των αρχείων παλαιού τύπου. Ο τελευταίος πόρος είναι η τεχνολογία εικονικοποίησης. Με την εισαγωγή της εικονικοποίησης σε ενσωματωμένους πόρους, το κόστος ανάπτυξης και εγκατάστασης μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό με την ταχεία μετεγκατάσταση εφαρμογών μεταξύ διαφορετικών περιβαλλόντων υλικού και λογισμικού.

Για έναν πόρο υπολογιστικής αιχμής, ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες του είναι ζωτικής σημασίας για τη διαλειτουργικότητα, την αυτοδιαχείριση και τη νοημοσύνη των μηχανών. Στον τομέα του αυτόματου ελέγχου, η ανίχνευση και η ενεργοποίηση, η αφαίρεση του προγραμματισμού, η μοντελοποίηση πληροφοριών και η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων είναι βασικές λειτουργίες για τη διατήρηση της αξιοπιστίας, της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο και της ακρίβειας του επιπέδου ελέγχου. Για την ανάλυση δεδομένων, τα ECN θα πρέπει να εκτελούν ανάλυση δεδομένων ροής, επεξεργασία εικόνας και βίντεο και εξόρυξη δεδομένων με βάση αλγόριθμους μηχανικής μάθησης. Τεράστιες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από αισθητήρες θα μπορούσαν να υποβληθούν σε προεπεξεργασία και τα μη έγκυρα δεδομένα θα μπορούσαν να φιλτραριστούν για να μειωθεί το εύρος ζώνης μετάδοσης που απαιτείται μεταξύ του νέφους και της αιχμής. Εν τω μεταξύ, οι εργασίες ανάλυσης δεδομένων που είναι ευαίσθητες στον χρόνο θα μπορούσαν να μεταφερθούν στην άκρη για να μειωθεί η καθυστέρηση που προκαλείται από τη μεταφορά δεδομένων. Για βελτιστοποίηση, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή καλύπτει σχεδόν κάθε τομέα. Μπορεί να εφαρμοστεί, για παράδειγμα, στη μείωση του εύρους ζώνης, στη διεξαγωγή προληπτικής συντήρησης, στην εξασφάλιση ελέγχου σε πραγματικό χρόνο για βελτιστοποίηση παραμέτρων, στον εντοπισμό σφαλμάτων, στην πραγματοποίηση προβλέψεων και στη βελτιστοποίηση των αλυσίδων εφοδιασμού.

Συνολικά, ο βιομηχανικός υπολογισμός αιχμής παρέχει νέες προκλήσεις για τα παλαιού τύπου συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού καθώς και για τα συστήματα

πληροφοριών και επικοινωνιών. Πρέπει να αναπτυχθούν επειγόντως νέες μέθοδοι και τεχνικές χειρισμού δεδομένων για την αντιμετώπιση αυτών των νέων προκλήσεων.

1.3. Περιγραφή Edge Computing

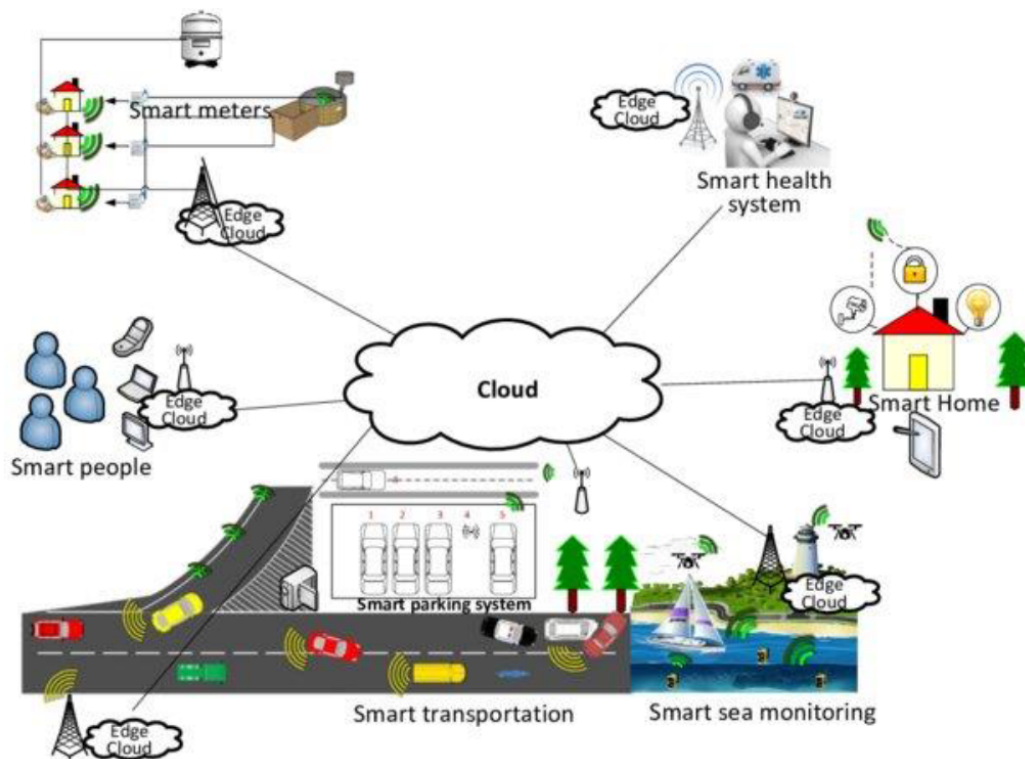
Μέσα σε λίγες μόνο δεκαετίες, η τεχνολογία των υπολογιστών έχει εξελιχθεί από τους κεντρικούς υπολογιστές σε υπολογιστές αιχμής (edge computing). Αυτές οι περιόδους μπορούν να προσδιοριστούν ως εξής (Satyanarayanan, 2017):

- **Η περίοδος του Mainframe.** Ήταν κυρίαρχη την περίοδο 1960-1980. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της περιόδου είναι ότι η επεξεργασία δεδομένων πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο σε έναν μεγάλο υπολογιστή/mainframe, ενώ η εισαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται μέσω συσκευών (τερματικών) που έχουν μέτριες δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων.
- **Η περίοδος του πελάτη/διακομιστή:** Ήταν κυρίαρχη την περίοδο 1980-2000. Η βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής πελάτη/διακομιστή ήταν η ανάπτυξη δικτύων υπολογιστών για ανταλλαγή δεδομένων. Τα δίκτυα υπολογιστών επέτρεπαν τη δυνατότητα κοινής χρήσης και τοποθέτησης των υπολογιστικών πόρων στον διακομιστή, ενώ οι πελάτες είχαν όσους υπολογιστικούς πόρους χρειάζονταν για τις τοπικές ανάγκες.
- **Η περίοδος Cloud:** Ξεκίνησε κυρίως γύρω στο 2000 και κυριάρχησε την περίοδο 2000-2010. Οι αυξανόμενες ανάγκες για μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο, καθώς και διάφορες υπηρεσίες είναι εύκολα προσβάσιμες μέσω του Διαδικτύου, οδήγησαν στη δημιουργία της αρχιτεκτονικής Cloud.
- **Η περίοδος Edge Computing.** Αυτή η περίοδος ξεκινά κυρίως γύρω στο 2010. Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική υπολογιστή που αντιμετωπίζει ορισμένα από τα προβλήματα που υπάρχουν στην αρχιτεκτονική υπολογιστών Cloud. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι λόγω της αύξησης της απόδοσης των υπολογιστών (κυρίως επεξεργαστών και χωρητικότητας μνήμης), η επεξεργασία και η αποθήκευση δεδομένων μετακινούνται από το Cloud στην πηγή δεδομένων, δηλαδή στον χρήστη.

Εκ πρώτης όψεως, φαίνεται ότι το Edge computing είναι η σχετικά νέα αρχιτεκτονική, αλλά οι ρίζες του μπορούν να εντοπιστούν στη δεκαετία του 1990 όταν η τεχνολογία

Akamai ξεκίνησε το δίκτυο παράδοσης περιεχομένου (contentdelivery network-CDN). Μια άλλη αναδρομή στην ιστορία της τεχνολογίας των υπολογιστών, της επικοινωνίας και των καταναμημένων συστημάτων, δείχνει την εξέλιξη του υπολογιστικού άκρου και τον τρόπο με τον οποίο το Edge computing διεισδύει στις αρχιτεκτονικές υπολογιστών, ειδικά στο Cloud computing.

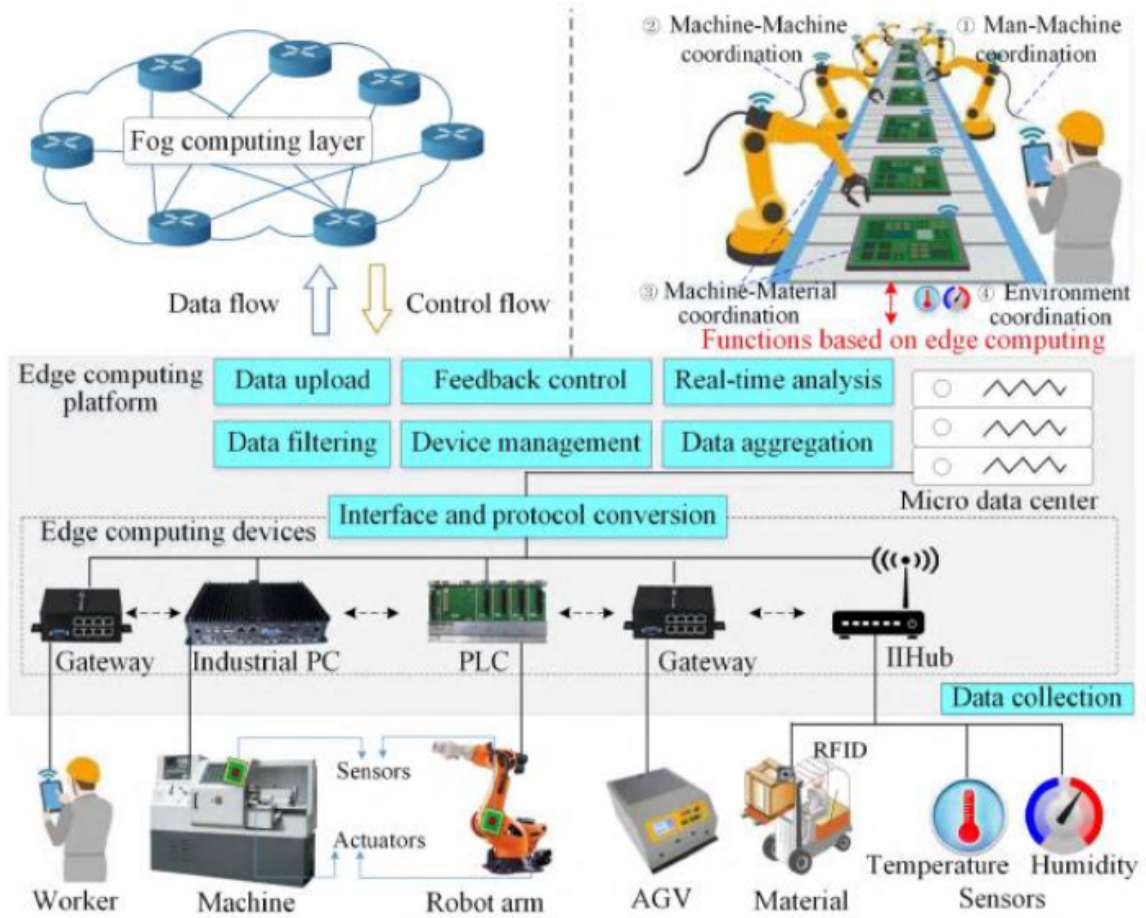
Σύμφωνα με την εργασία των (Buyya & Srirama, 2019), το Edge και το Cloud computing μπορούν να συνδυαστούν για να προσφέρουν την καλύτερη αξία για τη διαχείριση διαφορετικών εφαρμογών σε έξυπνα συστήματα. Το **Σχήμα 3** δείχνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που περιλαμβάνονται στο Edge computing.



Σχήμα 3. Οι υπολογιστικές εφαρμογές Edge

Οι εφαρμογές Edge computing που φαίνονται στο **Σχήμα 4** είναι κυρίως παραδείγματα μη βιομηχανικών έξυπνων συστημάτων. Φυσικά, οι εφαρμογές Edge computing υπάρχουν σε βιομηχανικά έξυπνα συστήματα. Το βιομηχανικό περιβάλλον είναι εν δυνάμει πολύ περίπλοκο και συνήθως περιλαμβάνει όλους τους κατασκευαστικούς πόρους που εμπλέκονται σε διάφορες παραγωγικές δραστηριότητες όπως απεικονίζεται

στο **Σχήμα 5** που ακολουθεί. Σε ένα κατάστημα ή ένα εργοστάσιο, οι κύριοι πόροι μπορούν να συνοψιστούν ως «Περιβάλλον Ανθρώπου-Μηχανής» (Qi & Tao, 2019).



Σχήμα 4. Έλεγχος και αλληλεπίδραση κατασκευής που βασίζεται σε Edge computing

Τα βασικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της αρχιτεκτονικής Edge computing πληρούν τις βασικές απαιτήσεις της ψηφιοποίησης του κλάδου για ευέλικτη συνδεσιμότητα,

υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποίηση δεδομένων, ευφυΐα εφαρμογών, ασφάλεια και ανάπτυξη προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Συγκεκριμένα πρόκειται για¹:

- **Συνδεσιμότητα.** Η συνδεσιμότητα είναι η βάση του Edge computing. Λαμβάνοντας υπόψη την ποικιλομορφία των συνδεδεμένων οντοτήτων και των σεναρίων εφαρμογών απαιτείται το Edge computing να παρέχει τις σωστές λειτουργίες σύνδεσης προκειμένου να ξεπεραστούν προβλήματα όπως η διαλειτουργικότητα με μια ποικιλία υφιστάμενων βιομηχανικών διαμορφώσεων δικτύου καθώς και η διαχείριση και συντήρηση δικτύου.
- **Πρώτη Καταχώρηση Δεδομένων.** Ως γέφυρα μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, το Edge computing είναι η πρώτη καταχώρηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι σημαντικό για τις εφαρμογές αιχμής, όπως η προγνωστική συντήρηση, η απόδοση αγαθών και άλλες εφαρμογές για διάφορες αναλύσεις/επεξεργασία δεδομένων.
- **Περιορισμός.** Τα εξαρτήματα του Edge computing πρέπει να ενσωματωθούν μέσω υλικού και λογισμικού για να προσαρμοστούν σε διάφορες συνθήκες και περιορισμούς σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπως είναι οι αντιηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η αντισκόνη, οι αντικρηκτικές και αντικραδασμικές διακυμάνσεις καθώς και οι διακυμάνσεις ρεύματος/τάσης.
- **Διανομή.** Στην πραγματική ανάπτυξη, το edge computing πρέπει να υποστηρίζει κατανεμημένους υπολογισμούς και αποθήκευση, να υποστηρίζει κατανεμημένη νοημοσύνη και να παρέχει κατανεμημένες δυνατότητες ασφάλειας.
- **Σύγκλιση.** Η σύγκλιση των Επιχειρησιακών Τεχνολογιών (Operational Technologies-OT) και των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών αποτελεί τη βάση για την ψηφιοποίηση σε διάφορα βιομηχανικά και μη περιβάλλοντα.

Επίσης, αυτά τα βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες της αρχιτεκτονικής edge computing επιτρέπουν διάφορους τύπους υπηρεσιών που βασίζονται στην ανάλυση των συλλεγόμενων δεδομένων προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση των οντοτήτων στα

¹ Edge Computing Reference Architecture 2.0,

Cyber-Physical Systems (CPS). Μία από αυτές τις υπηρεσίες είναι η πρόληψη σφαλμάτων στα συστήματα παραγωγής.

1.4. Εφαρμογές Βιομηχανικού Edge Computing

Οι εφαρμογές βιομηχανικής υπολογιστικής αιχμής καλύπτουν σχεδόν κάθε πιθανό σενάριο στην καθημερινή ζωή, από τον τομέα παραγωγής έως τον τομέα IoT. Με την εμφάνιση του Industry 4.0 και του Industrial Internet, η υπολογιστική αιχμή σε συνδυασμό με το υπολογιστικό νέφος παρέχει μια ολοκληρωμένη λύση για καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα, όπως η μαζική προσαρμογή και η παραγωγή βασισμένη σε υπηρεσίες (Pereira & Romero, 2017).

Έχουν ήδη δημιουργηθεί αρκετοί οργανισμοί για την προώθηση της υπολογιστικής αιχμής σε βιομηχανικές εφαρμογές μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται ο OpenFogConsortium², το OpenIOTFog³ και το Edge Computing Consortium⁴. Οι πωλητές βιομηχανικού αυτοματισμού μετατοπίζουν το παράδειγμα στη συνεργασία αιχμής-νέφους δημιουργώντας τις δικές τους πλατφόρμες νέφους που συνδέονται με έξυπνες συσκευές αιχμής. Για παράδειγμα, η πλατφόρμα νέφους Mindsphere από τη Siemens διαχειρίζεται συσκευές ακμών αλλά και την ανάπτυξη εφαρμογών. Παρόμοιες λύσεις προσφέρονται επίσης από το EcoStruxure από τη Schneider Electric, το FactoryTalk Edge Analytics από την Rockwell Automation και το PTC, το Edge AI Suite από την Advantech και το Mobility Edge Platform από τη Honeywell. Για τον κατασκευαστικό τομέα, τα τρία πιο πολλά υποσχόμενα σενάρια για βιομηχανικούς υπολογιστές αιχμής είναι στους τομείς της προληπτικής συντήρησης συσκευών, του ποιοτικού ελέγχου και της βελτιστοποίησης για τον έλεγχο της διαδικασίας και της ανίχνευσης και της βελτιστοποίησης ποιότητας προϊόντος.

Η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή παρουσιάζει αποδεδειγμένα οφέλη που σχετίζονται με το κόστος και την απόδοση. Μπορεί να μειώσει το κόστος ανάπτυξης και εγκατάστασης επιτρέποντας την αντικατάσταση πολλαπλών συσκευών με έναν ελεγκτή ενός άκρου που συνδυάζει δυνατότητες υπολογισμού, επικοινωνίας και αποθήκευσης.

² OpenFog Consortium, *OpenFog Reference Architecture for Fog Computing*. Fremont, CA: OpenFog Consortium Architecture Working Group, 2017

³ Open IOT Fog, *Edge Computing for Industry 4.0 Applications with TSN, Real-Time OPC UA, Data Analytics and Virtual PLCs*, 2017.

⁴ Edge Computing Consortium. Accessed on: Sept. 10, 2019.

Με υπερβολική υπολογιστική ισχύ, τα δεδομένα ανατροφοδότησης μπορούν να αναλυθούν τοπικά χωρίς επιπλέον νευρικήτητα που προκαλείται από την επικοινωνία μεταξύ του νέφους και της αιχμής. Διευκολύνοντας τις αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή βελτιώνει την ακρίβεια του ελέγχου με ελάχιστο κόστος. Επιπλέον, με περαιτέρω ανάλυση δεδομένων και υποστήριξη μοντελοποίησης από βιομηχανικό νέφος, θα μπορούσε να επιτευχθεί βελτιστοποίηση των ρυθμών χρήσης της συσκευής, λειτουργίας, συντήρησης και κατανάλωσης ενέργειας. Με τη βελτίωση της χρήσης συσκευών και των φυσικών πόρων, η συνολική κατανάλωση ενέργειας θα μειωθεί σημαντικά.

Εφαρμοζόμενη στην προληπτική συντήρηση συσκευών, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή μπορεί να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της κατάστασης και της απόδοσης της συσκευής. Με την παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας της συσκευής και τον προγραμματισμό προσαρμοσμένων σχεδίων συντήρησης, η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή μπορεί να διασφαλίσει ότι οι συσκευές λειτουργούν πάντα σε καλή κατάσταση. Αυτό θα μειώσει το χρόνο διακοπής λειτουργίας που προκαλείται από αστοχίες. Επιπλέον, με την παρακολούθηση και τη σύγκριση της απόδοσης των συσκευών, βιομηχανική υπολογιστική αιχμή είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη συμφόρησης απόδοσης, ώστε να μπορούν να ληφθούν μέτρα για τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγής. Με βάση τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις βελτιστοποίησης συσκευών, οι πωλητές θα μπορούσαν να βελτιώσουν την απόδοση των προϊόντων τους και να προσφέρουν υπηρεσίες συντήρησης συσκευών με ελάχιστο κόστος για τους πελάτες. Από την πλευρά των πελατών, ο χρόνος διακοπής λειτουργίας θα μπορούσε να μειωθεί στο ελάχιστο και η παραγωγικότητα θα μπορούσε να αυξηθεί.

Για τον τομέα ελέγχου διεργασιών, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανιών παραγωγής ενέργειας, πετροχημικών, σκυροδέματος και ινών, το κύριο μέλημα είναι η βελτιστοποίηση παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία ή η πίεση, κατά τις διαδικασίες παραγωγής. Με τη διαδικτυακή βελτιστοποίηση παραμέτρων, η αποδοτικότητα της παραγωγής και ο ποιοτικός έλεγχος μπορούν να βελτιωθούν, ενώ η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί.

Για τη διαχείριση του κύκλου ζωής του προϊόντος, βιομηχανική υπολογιστική αιχμής μαζί με το βιομηχανικό νέφος, επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφόρων συστημάτων και συσκευών. Τα βιομηχανικά συστήματα που είναι πλήρως ενσωματωμένα τόσο κάθετα όσο και οριζόντια θα έχουν μια ισχυρή βάση για μαζική προσαρμοσμένη παραγωγή την ευέλικτη ανάπτυξη προϊόντων και στρατηγική μηδενικού αποθέματος.

Σε μια τυπική εγκατάσταση βιομηχανικής υπολογιστικής αιχμής, τα ECN ελέγχουν τις συσκευές, λαμβάνουν δεδομένα και παρακολουθούν τα τελικά σημεία στον όροφο του καταστήματος. Σε βασικό επίπεδο, τα ECN θα παρέχουν αυτόματα υπηρεσίες εξισορρόπησης πόρων και φορτίων εργασίας μεταξύ κατανεμημένων τελικών σημείων. Κατά τη διάρκεια των διαδικασιών παραγωγής, οποιοδήποτε μεμονωμένο τελικό σημείο αποτυχίας μπορεί να προκαλέσει καταστροφή. Με τα αυτοδιαχειριζόμενα ECN, οι αστοχίες μπορούν να προβλεφθούν και να αποφευχθούν με δυναμική αναδιαμόρφωση λειτουργιών σε άλλους υγιείς κόμβους.

Στο μεσαίο στρώμα, τα ECN παρέχουν δύο τύπους λειτουργιών για την κατασκευή. Ο πρώτος τύπος λειτουργίας είναι στον τομέα της ανάλυσης δεδομένων. Με τεράστιες ποσότητες δεδομένων που συλλέγονται από τελικά σημεία, τα τεχνικά μοντέλα θα μπορούσαν να συνοψιστούν με φιλτράρισμα και αποθήκευση δεδομένων. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να βελτιωθούν περαιτέρω με κατανεμημένη συλλογιστική μέσω στατιστικής ανάλυσης, μηχανικής μάθησης και κανόνων γνώσης. Με τη μεταφόρτωση αποτελεσμάτων σε βιομηχανικά νέφη, τα βελτιστοποιημένα μοντέλα της εφοδιαστικής αλυσίδας, της κατανομής παραγγελιών, των logistics και της ροής υπηρεσιών μπορούν να βοηθήσουν καλύτερα τους πωλητές, τα εργοστάσια παραγωγής, τις εταιρείες ταχυμεταφορών και τους πελάτες.

Ο δεύτερος τύπος συνάρτησης χρησιμοποιείται για διαχείριση. Το περιβάλλον ανάπτυξης και εκτέλεσης των βιομηχανικών εφαρμογών θα μπορούσε να διαμορφωθεί και να διατηρηθεί μέσω διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (API) μέσω ECN.

Εκτός από το περιβάλλον εκτέλεσης, όλες οι περιπτώσεις εφαρμογών και υπηρεσιών θα μπορούσαν επίσης να ενορχηστρωθούν ή να γίνουν διαχειρίσιμες μέσω API. Οι σχετικές τεχνικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν την παραγωγική

ικανότητα, το ποσοστό χρησιμοποίησης, τη συνολική αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού και την κατανάλωση ενέργειας, προσφέρουν όχι μόνο διαχείριση του κύκλου ζωής αλλά και εργαλεία για την ανάπτυξη, τη δοκιμή και την ανάπτυξη εφαρμογών. Η βιομηχανική υπολογιστική αιχμή θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί σε αυτόνομα αυτοκίνητα. Με την ανάπτυξη του Διαδικτύου των Οχημάτων, κάθε αυτόνομο όχημα θα μπορούσε να θεωρηθεί ως κόμβος υπολογιστών αιχμής. Με την παρακολούθηση και τον συντονισμό όλων των υποσυστημάτων στο αυτοκίνητο, ο βιομηχανικός υπολογισμός αιχμής μαζί με την υποστήριξη του νέφους θα μπορούσε να εισαγάγει πρόσθετες υπηρεσίες. Επιπλέον, με συντονισμό μεταξύ των υποσυστημάτων σε οχήματα, δίκτυα από όχημα σε όχημα και οδικό δίκτυο, τα τροχαία ατυχήματα μπορεί να μειωθούν μέσω τεχνολογιών όπως η ανίχνευση σύγκρουσης βάσει δεδομένων, τα συστήματα προειδοποίησης αλλαγής λωρίδας και το προσαρμοστικό cruise control. Με τη συλλογή δεδομένων από κάθε όχημα, το σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας θα μπορούσε να προσφέρει εναλλακτικές διαδρομές, βάσει δεδομένων πυκνότητας και ταχύτητας, για την αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Με την υπολογιστική αιχμή, τα αυτόνομα αυτοκίνητα θα πρέπει να είναι πιο αξιόπιστα και ασφαλή. Μέσω της παρακολούθησης των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο και της προληπτικής συντήρησης, τα τροχαία ατυχήματα θα μειωθούν και η αποτελεσματικότητα θα πρέπει να βελτιωθεί. Εκτός από μια βασική τεχνολογία για αυτόνομα αυτοκίνητα, η υπολογιστική αιχμή μπορεί επίσης να αποφέρει οφέλη σε άλλους κλάδους, όπως εκείνους που σχετίζονται με τους ανελκυστήρες, την τεχνολογία έξυπνου σπιτιού και την ασφάλεια.

1.5. Edge Computing για Ανίχνευση Σφαλμάτων σε Έξυπνα Συστήματα

Από το 1965 όταν ο Gordon Moore παρουσίασε τον «νόμο του Moore» που περιγράφει φαινόμενα όπως ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης των τσιπ μνήμης υπολογιστών αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, διπλασιαζόμενη κάθε δεκαοκτώ μήνες (Cezuzzi, 2012), έχει αυξηθεί η απόδοση όλων των εξαρτημάτων του υπολογιστή καθώς και των υπολογιστικών συστημάτων. Αυτή η πρόοδος επιτρέπει την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών και πλατφόρμων για την επεξεργασία δεδομένων, την κοινή χρήση, τη διανομή και την αποθήκευση δεδομένων. Επίσης, την ίδια δεκαετία παρουσιάστηκε ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC) που είναι η κύρια μονάδα ελέγχου σχεδόν σε κάθε αυτοματοποιημένη συσκευή. Το PLC είναι ένας βιομηχανικός υπολογιστής που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί στο (πρωτεύον) βιομηχανικό περιβάλλον για τον έλεγχο βιομηχανικών διεργασιών. Από τότε, μέχρι σήμερα, υπάρχει μια ορισμένη περίοδος καθυστέρησης στην εισαγωγή νέων λύσεων τεχνολογίας υπολογιστών στο βιομηχανικό περιβάλλον σε σχέση με το μη βιομηχανικό περιβάλλον (O'Regan, & O'Regan, 2008). Αυτό είναι απολύτως κατανοητό επειδή το βιομηχανικό περιβάλλον είναι κατά κύριο λόγο προσανατολισμένο προς λύσεις σε πραγματικό χρόνο και απαιτεί πρόσθετα χαρακτηριστικά όλων των ενσωματωμένων εξαρτημάτων, όπως ευρύτερο εύρος θερμοκρασίας, ηλεκτρομαγνητική προστασία, προστασία από κραδασμούς κ.λπ. Επιπλέον, τα περισσότερα συστήματα μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών στο βιομηχανικό περιβάλλον δεν είναι συμβατά και συνεπώς απαιτούν πρόσθετο κόστος ανάπτυξης για κάθε έναν από τους συμμετέχοντες στον βιομηχανικό αυτοματισμό (Stankovski et al., 2020).

Η ταχύτητα, η ασφάλεια και η αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων είναι βασικές παράμετροι στον βιομηχανικό αυτοματισμό και επομένως μόνο εκείνες οι αρχιτεκτονικές/έννοιες που πληρούν επιτυχώς αυτές τις παραμέτρους έχουν την ευκαιρία να επιτύχουν σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, ειδικά στην έννοια του Industry 4.0. Ο όρος Industry 4.0 συμβολίζει την έννοια της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης και αναφέρεται στις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις όπου το Διαδίκτυο και οι υποστηρικτικές τεχνολογίες (π.χ. ενσωματωμένα συστήματα) αποτελούν τη ραχοκοκαλιά για την ενοποίηση φυσικών αντικειμένων, ανθρώπινων παραγόντων, έξυπνων μηχανών,

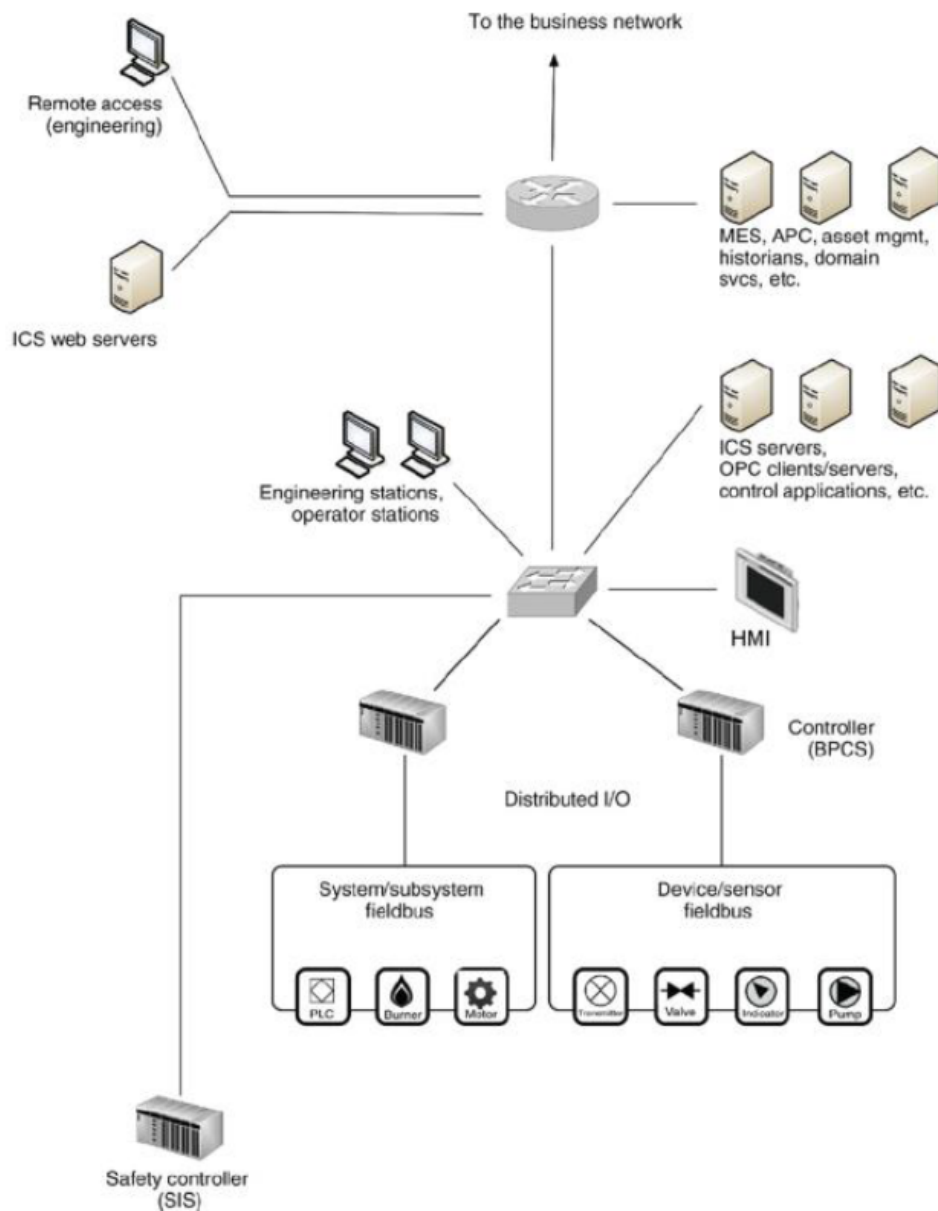
γραμμών παραγωγής και διαδικασιών πέρα από τα οργανωτικά όρια προκειμένου να σχηματίσουν ένα νέο είδος ευφυούς, δικτυωμένης και ευέλικτης αλυσίδα αξίας (Arsenijević et al., 2018).

Σήμερα, το PLC απέχει πολύ περισσότερο από τον πρώτο του απλό ρόλο ως συσκευή που δημιουργεί μια λειτουργική σύνδεση μεταξύ ψηφιακών/αναλογικών εισόδων και ψηφιακών/αναλογικών εξόδων. Προκειμένου να ανταποκριθούν στο αυξημένο εύρος των απαιτήσεων για επεξεργασία δεδομένων με συσκευές βιομηχανικού ελέγχου, οι κατασκευαστές αυτοματισμών ανταποκρίθηκαν με μια νέα συσκευή που συγχωνεύει τα πλεονεκτήματα του PLC ως μηχανή πραγματικού χρόνου, με τα δυνατά σημεία επεξεργασίας (και ενσωμάτωσης) του υπολογιστή (συστήματα που βασίζονται σε προσωπικό υπολογιστή). Αυτή η συσκευή έχει ονομαστεί προγραμματιζόμενος ελεγκτής αυτοματισμού (Programmable Automation Controller-PAC). Με άλλα λόγια, το PAC είναι μια επέκταση του PLC με στοιχεία hardware και λογισμικού που είναι τυπικά στον υπολογιστή (όπως θύρες επικοινωνίας, πλατφόρμες λογισμικού, βάση δεδομένων κ.λπ.) (Stankovski et al., 2020).

Μέχρι σήμερα το PLC/PAC επιτρέπει διαφορετικούς τύπους βιομηχανικής επικοινωνίας πεδίου που χρησιμοποιούν για τη μεταφορά κάθε είδους δεδομένων πεδίου και δεδομένων που είναι χρήσιμα για παραγωγές. Η επικοινωνία είναι ένα από τα κρίσιμα μέρη της έννοιας «Industry 4.0», αλλά σε πολλές περιπτώσεις οι βιομηχανίες αποτελούνται από παλιό εξοπλισμό που ελέγχεται από PLC με περιορισμένη επικοινωνία βιομηχανικού δικτύου. Αυτοί οι περιορισμοί πρέπει να θεωρηθεί ότι ξεπερνούν την κακή απόδοση του δικτύου επειδή δεν είναι λογικό να περιμένει κανείς άμεσα νέες συσκευές συμβατές με την Industry 4.0. Το **σχήμα 5** δείχνει μία τυπική συνδεσιμότητα δικτύου ενός βιομηχανικού συστήματος ελέγχου.

Οι πρόσφατες τάσεις όπως το Internet of Things (IoT) και το Industrial Internet of Things (IIoT) θα απαιτήσουν περισσότερο χώρο μνήμης και υπολογιστική ισχύ από το PLC/PAC, για τη συλλογή δεδομένων και για την εκτέλεση χρονοβόρων εργασιών (έλεγχος κίνησης, ελεγκτές πρόβλεψης μοντέλων, κρυπτογραφία...)(Tasca et al., 2020). Το παραπάνω τείνει προς τη γενική ανάγκη για κοινή χρήση δεδομένων με συνέπεια ο όγκος των δεδομένων, που δημιουργήθηκαν και καταγράφηκαν, να έχει αυξηθεί

σημαντικά. Συνεπώς απαιτούνται νέες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτών των γεγονότων, ειδικά στον βιομηχανικό αυτοματισμό. Μια προσέγγιση στον τομέα αυτό είναι η χρήση του Edge computing. Το Edge computing φέρνει νέα ισχύ στην επεξεργασία δεδομένων στον βιομηχανικό αυτοματισμό και ευκαιρίες στην επεξεργασία μεγάλων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

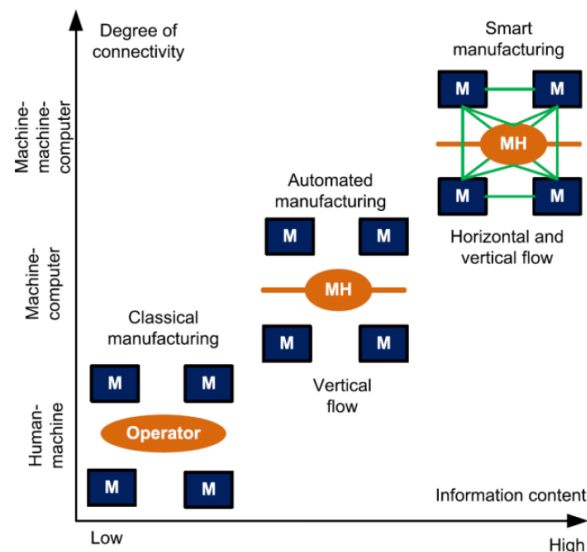


Σχήμα 5. Η συνδεσιμότητα δικτύου ενός βιομηχανικού συστήματος ελέγχου

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για έξυπνα συστήματα κοινής χρήσης, ο πιο ολοκληρωμένος εκ των οποίων δίνεται στο: «Τα έξυπνα συστήματα ενσωματώνουν λειτουργίες ανίχνευσης, ενεργοποίησης και ελέγχου προκειμένου να περιγράψουν και να αναλύσουν μια κατάσταση και να λάβουν αποφάσεις με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα. με προγνωστικό ή προσαρμοστικό τρόπο, εκτελώντας έτσι έξυπνες ενέργειες». Έτσι, τα έξυπνα συστήματα μπορούν να αναπτυχθούν σε οποιοδήποτε περίπλοκο σύστημα στο οποίο μπορεί να υπάρχει ενσωματωμένη νοημοσύνη. Σήμερα γίνεται λόγος για πολλά έξυπνα συστήματα όπως Smart city, Smart grid, Smart traffic, Smart Manufacturing. Όλα αυτά φαίνεται τελικώς να έχουν τρία κοινά χαρακτηριστικά:

- Συσκευή επεξεργασίας,
- Αυτοδιαγνωστικό τεστ και
- Συνδεσιμότητα.

Συνδεσιμότητα: Πρόκειται για ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά του Edge computing. Στην περίπτωση της Smart Manufacturing, αυτό το χαρακτηριστικό σημαίνει ότι ο κατασκευαστικός εξοπλισμός συνδέεται με υπολογιστές (κάθετη συνδεσιμότητα) και δικτυωμένο εξοπλισμό και υπολογιστές (οριζόντια και κάθετη συνδεσιμότητα) (Kusiak, 2019).



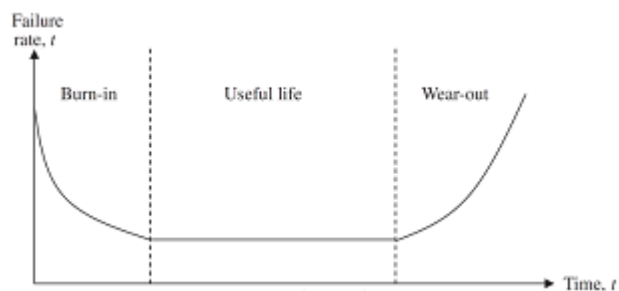
Σχήμα 6. Εξέλιξη της συνδεσιμότητας στην κατασκευή

Όπως φαίνεται η συνδεσιμότητα στην κατασκευή έχει εξελιχθεί με την πάροδο των ετών σε σχέση με τον βαθμό συνδεσιμότητας και το περιεχόμενο πληροφοριών.

Το αυτοδιαγνωστικό τεστ είναι η διαδικασία διάγνωσης ή αναγνώρισης καταστάσεων στον εαυτό του με σκοπό την αναγνώριση και τη διόρθωση των σφαλμάτων. Στα συστήματα κατασκευής, σχεδόν κάθε στοιχείο του εξοπλισμού έχει το δικό του διαγνωστικό τεστ. Συνήθως, αυτές οι δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τρέχουσας κατάστασης των στοιχείων/εξοπλισμού, χρησιμοποιούνται ως απάντηση σε μια απλή ερώτηση: Είναι το στοιχείο/εξοπλισμός σε λειτουργική κατάσταση;

Σύμφωνα με τις απαντήσεις (ΝΑΙ/ΟΧΙ), χρησιμοποιώντας την ικανότητα της συσκευής για επεξεργασία και την εφαρμογή της ενσωματωμένης νοημοσύνης, μπορεί να αναμένεται έξυπνη λειτουργία συστημάτων.

Η ικανότητα των έξυπνων συστημάτων να κάνουν αυτοδιαγνωστικές δοκιμές αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό, αλλά είναι πολύ πιο ενδιαφέρον να υπάρχει η δυνατότητα υπόθεσης της συμπεριφοράς αστοχίας του στοιχείου/εξοπλισμού. Τυπικά, η συμπεριφορά αστοχίας του στοιχείου/εξοπλισμού μπορεί να αναπαρασταθεί ως οι τάσεις του ρυθμού αστοχίας της καμπύλης κατά τη διάρκεια ζωής του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7. Η καμπύλη

Ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα στοιχεία στα συστήματα κατασκευής είναι ο πνευματικός κύλινδρος, ειδικά στις μηχανές συσκευασίας. Για να προσδιοριστεί το στάδιο της διάρκειας ζωής του κυλίνδρου, ο απλούστερος τρόπος βασίζεται στον χρόνο λειτουργίας.

Ο χρόνος λειτουργίας για τον κύλινδρο μπορεί να μετρηθεί με τα ακόλουθα τρία μοτίβα:

- Όταν υπάρχουν αισθητήρες και στα δύο άκρα του κυλίνδρου: παρακολούθηση χρόνου του κυλίνδρου προς τα εμπρός / προς τα πίσω
- Όταν υπάρχει αισθητήρας μόνο στο ένα άκρο: η παρακολούθηση του χρόνου εμπρός του κυλίνδρου
- Όταν δεν υπάρχει αισθητήρας (χρόνος κύκλου): η παρακολούθηση του χρόνου κύκλου του κυλίνδρου

Το πρώτο μοτίβο είναι η πιο επιθυμητή περίπτωση (συνήθως στην πράξη) και φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 8**.



Σχήμα 8. Τυπικές θέσεις του αισθητήρα μπροστινού άκρου και του αισθητήρα προς το πίσω άκρου στον κύλινδρο

Φυσικά, ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας του κυλίνδρου δεν είναι η μόνη παράμετρος που επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του. Η ποιότητα του αέρα καθώς και οι αλλαγές στην πίεση του αέρα παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο (Li & Kao, 2005). Για να προβλεφθεί η ανίχνευση σφάλματος του πνευματικού κυλίνδρου, σύμφωνα με το πρώτο σχέδιο, πρέπει να καταγραφούν τα ακόλουθα δεδομένα:

- Ο χρόνος που δίνεται το σήμα για την επέκταση του κυλίνδρου,
- Ο χρόνος που ο κύλινδρος έφτασε στην εκτεταμένη θέση του,
- Η περίοδος κίνησης του κυλίνδρου από την ανάσυρση στην εκτεταμένη θέση,
- Ο χρόνος που δίνεται το σήμα για την ανάσυρση του κυλίνδρου,
- Η ώρα που ο κύλινδρος έφτασε στη θέση οπισθοχώρησης,
- Η περίοδος κίνησης του κυλίνδρου από την εκτεταμένη στη θέση ανάσυρσης,
- Ο αριθμός των πλήρων κύκλων λειτουργίας (ο πλήρης κύκλος λειτουργίας του κυλίνδρου ορίζεται ως ένας πλήρης κύκλος που περιλαμβάνει μια διαδρομή επέκτασης και μια διαδρομή απόσυρσης).

1.6.Συνδυασμός Λογικών Ελεγκτών και IoT για την Υποστήριξη του Edge Computing στη Βιομηχανία

Στη Βιομηχανία 3.0 τα εργοστάσια χρησιμοποιούν Logic Controllers ‘‘Λογικούς Ελεγκτές’’ για να παρακολουθούν την κατάσταση του συστήματος, να λαμβάνουν αποφάσεις με βάση προσαρμοσμένα προγράμματα και να προβαίνουν στις απαραίτητες ενέργειες. Για την εφαρμογή ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, οι ελεγκτές ελέγχουν τις λειτουργίες της κατασκευής, εκτελούν υπολογισμούς με υψηλή ταχύτητα όπως καθορίζεται στα προγράμματα (λογική ελέγχου) και εξάγουν τα αποτελέσματα του υπολογισμού σε συσκευές όπως οι ενεργοποιητές με τη μορφή σημάτων εξόδου (Ito et al., 2018). Ένας τέτοιος έλεγχος πραγματοποιείται συνήθως σε έναν Εποπτικό Έλεγχο και στην Απόκτηση Δεδομένων (SCADA), που ονομάζεται επίσης αρχιτεκτονική πυραμίδας αυτοματισμού ISA-95 (Scholten, 2007). Ωστόσο, ο περιορισμός των 100.000 σημείων I/O και η κλασική αυστηρή ιεραρχική προσέγγιση καθιστούν το ISA-95 ακατάλληλο στη Βιομηχανία 4.0 που απαιτεί ευέλικτα και μη κλειστά συστήματα (Delsing, 2017).

Παρόλο που η τεχνολογία κατασκευής αυτοματισμών αυξάνεται απότομα, το εργοστάσιο χρησιμοποιεί το Internet of Things (*Διαδίκτυο των Πραγμάτων*) (IoT) για να σχηματίσει ένα έξυπνο περιβάλλον παραγωγής. Το IoT αντιπροσωπεύει την ικανότητα των συσκευών δικτύου να ανιχνεύουν, να συλλέγουν από τον κόσμο γύρω μας και ακόμη να αναλύουν σε τοπικά δεδομένα και, στη συνέχεια να μοιράζονται αυτά τα δεδομένα στο Διαδίκτυο (Di Martino et al., 2018). Για παράδειγμα, σε μια γραμμή παραγωγής, αφού συλλέξουν τα δεδομένα μέσω αισθητήρων και συγχρονίσουν την κατάσταση της γραμμής παραγωγής με το cloud, οι μηχανικοί μπορούν να αναλύσουν δεδομένα και να κυριαρχήσουν στη γραμμή παραγωγής. Ωστόσο, η καθυστέρηση δικτύου και ο μεγάλος όγκος δεδομένων ανίχνευσης εμποδίζουν την εφαρμογή του IoT στην έξυπνη κατασκευή όταν το cloud computing (*υπολογιστικό νέφος*) συνδέεται με τις εφαρμογές IoT. Η πρόσφατη ιδέα του υπολογιστικού άκρου προσπαθεί να επιλύσει το πρόβλημα, επειδή η άκρη του δικτύου αλλάζει από καταναλωτή δεδομένων σε παραγωγό και καταναλωτή δεδομένων (Shi et al., 2016). Το Edge computing (*Υπολογισμός ακμών*) επιτρέπει την αυτοματοποίηση IoT στον έλεγχο κατασκευής.

Το Υπολογιστικό Νέφος παίζει σημαντικό ρόλο στα σημερινά εργοστάσια. λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια αλλαγή, δύο τομείς ερευνητικών προβλημάτων συνοψίζονται ως εξής.

1.6.1. Μεγάλα Δεδομένα

Η αυξανόμενη ποσότητα δεδομένων που δημιουργείται στα άκρα, η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, γίνεται το εμπόδιο για το υπολογιστικό νέφος και οδηγεί σε ένα τεράστιο και περιττό εύρος ζώνης και στη χρήση υπολογιστικών πόρων (Shi et al., 2016). Τα τελευταία δέκα χρόνια, τα εργοστάσια τοποθετούν όλα τα δεδομένα στο Cloud για τη λήψη αποφάσεων. Η πιο σημαντική επίδραση στο δίκτυο είναι η αποθήκευση δεδομένων. Λόγω της τεράστιας ποσότητας δεδομένων, ξοδεύεται πολύς χρόνος για τη μεταφορά δεδομένων στο κέντρο cloud. Αυτή η κατάσταση θα δημιουργήσει καθυστέρηση στο περιβάλλον cloud. Ακόμη χειρότερα, είναι δύσκολο να προβλεφεί πόσο λανθάνοντα είναι τα τεράστια δεδομένα με το αβέβαιο εύρος ζώνης. Επιπλέον, ένα άλλο πρόβλημα είναι η σύνδεση του δικτύου. Εάν το δίκτυο έχει αποσυνδέσεις, χιλιάδες δεδομένα μπορεί να επηρεαστούν και τεράστια δεδομένα δεν θα αποθηκευτούν.

1.6.2. Πρότυπο βιομηχανικών Πρωτοκόλλων

Στα εργοστάσια δεν υπάρχει κοινή συμφωνία και κριτήριο για την υιοθέτηση προτύπων πρωτοκόλλου επικοινωνίας (Dizdarević et al., 2019). Ως εκ τούτου, προβλήματα επικοινωνίας εμφανίζονται συχνά μεταξύ μηχανών, συσκευών και συστημάτων, λόγω των διαφορετικών μορφών δεδομένων, συντακτικών, κανόνων ανταλλαγής δεδομένων κ.λπ.

2. Αρχιτεκτονικές Edge Computing στον Βιομηχανικό Αυτοματισμό

2.1. Μοντέλο Αρχιτεκτονικής Βιομηχανικού Edge Computing

Για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας, τη δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων ή για τη βελτίωση της βιωσιμότητας, διάφορες αλυσίδες αξίας βρίσκονται στη διαδικασία ψηφιακής σύνδεσης χρησιμοποιώντας τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Στους βιομηχανικούς τομείς, η καθιερωμένη επιχειρησιακή τεχνολογία (OT) βρίσκεται σε διαδικασία ενίσχυσης ή αντικατάστασης από τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών (TΠΕ). Αυτή η εξέλιξη αναφέρεται μερικές φορές ως Industrial Internet of Things (IIoT – Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων). Ένας κινητήριος παράγοντας είναι το κίνητρο για τη λειτουργία μιας σύγκλισης, περισσότερο βασισμένης σε λογισμικό υποδομής επικοινωνίας, βασισμένης σε ανοιχτά πρότυπα, για την ενίσχυση της ευελιξίας και για τη δημιουργία επιχειρηματικών μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα σε βιομηχανίες παραγωγής. Αυτό όχι μόνο μειώνει το κόστος για τους φορείς εκμετάλλευσης, αλλά διευκολύνει επίσης ένα μικρότερο χρονικό διάστημα για την κυκλοφορία νέων προϊόντων. Οι ειδικές προκλήσεις σε αυτό το πλαίσιο είναι οι απαιτήσεις που σχετίζονται με τα βιομηχανικά συστήματα επικοινωνιών. Για την υποστήριξη του ντετερμινισμού, του χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και της αυτονομίας, πολλές τεχνολογικές προσεγγίσεις που σχετίζονται με διαύλους πεδίου και συστήματα βιομηχανικού ελέγχου (ICS) έχουν εξελιχθεί τα τελευταία 70 χρόνια. Σημαντικό ορόσημο ήταν η εφεύρεση του προγραμματιζόμενου ελεγκτή λογικής (PLC) το 1968 για να τροποποιεί εύκολα τα τοπικά κυκλώματα ελέγχου. Ωστόσο, τα PLC προγραμματισμού δεν εξελίχθηκαν με τον ίδιο ρυθμό με τις τεχνολογίες του Διαδικτύου. Πολλά συστήματα ελέγχου εξακολουθούν να προγραμματίζονται χρησιμοποιώντας λίστες δηλώσεων (STL), διαγράμματα κλίμακας (LD) ή μια γλώσσα δομημένου ελέγχου (SCL), σύμφωνα με το πρότυπο της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC) 61131. Όχι μόνο αυτές οι προσεγγίσεις επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς στις πιθανές υπολογιστικές δυνατότητες που εκθέτουν τα σύγχρονα τελικά σημεία, αλλά και οι νεότερες γενιές αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την ενημέρωση του υπάρχοντος κώδικα. Επιπλέον, η δυνατότητα συντήρησης, επεκτασιμότητας και αρθρωτής δομής αυτών των προγραμμάτων είναι στοιχειώδης.

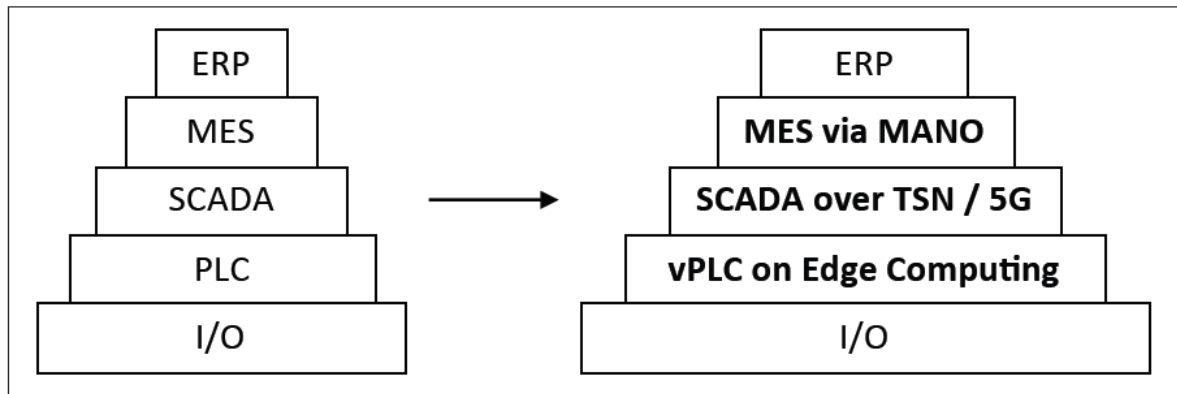
Για να αντιμετωπιστεί το τελευταίο, το πρότυπο IEC 61499 εισάγει ένα καταναμημένο σύστημα που βασίζεται σε συμβάντα που βασίζονται στο IEC 61131. Επιπλέον, οι προγραμματιζόμενοι ελεγκτές αυτοματισμού (PAC) επιτρέπουν τη χρήση οδηγιών υψηλότερου επιπέδου παράλληλα με τα PLC που βασίζονται σε λογισμικό για σκληρό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, για παράδειγμα, σε βιομηχανικούς υπολογιστές (IPC).

Αυτές οι εξελίξεις τώρα ενισχύονται από τις πρόσφατες εξελίξεις από τον τομέα των ΤΠΕ, πιο συγκεκριμένα από τους τομείς της διαχείρισης δικτύων και συστημάτων και διανέμονται συστήματα και δίκτυα επικοινωνίας, αντίστοιχα. Στην 70χρονη ιστορία των υπολογιστών, μπορούμε να παρατηρήσουμε μια κυκλική εναλλαγή μεταξύ ενός κεντρικού υπολογιστικού παραδείγματος (δεκαετία 1950: κεντρικοί υπολογιστές· δεκαετία του 2000: υπολογιστικό νέφος) και ενός καταναμημένου υπολογιστικού παραδείγματος (δεκαετία 1980: διακομιστής πελάτη). Το τρέχον παράδειγμα edge computing διανέμει το παράδειγμα υπολογιστικού νέφους μετακινώντας τις λειτουργίες ακόμη πιο κοντά σε πηγές δεδομένων και ενεργοποιητές (DHJ, 2015). Αυτό επιτρέπει τη χρήση τεχνολογιών υπολογιστικού νέφους σε διάφορους κρίσιμους τομείς IoT, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις βιομηχανικής χρήσης. Για παράδειγμα, πολύπλοκες εφαρμογές ή αλγόριθμοι ομοσπονδιακής μάθησης (Kairouz et al., 2021) μπορούν να ενορχηστρωθούν προς τους edge κόμβους είτε για να επηρεάσουν τα τοπικά κυκλώματα ελέγχου είτε για να παρέχουν πολύτιμα δεδομένα σε ένα σύστημα εκτέλεσης παραγωγής (MES).

Για να εντάξουμε την εργασία σε ένα γενικό πλαίσιο, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τον τομέα εφαρμογής που εξετάζουμε, καθώς διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης δίνουν το δικαίωμα σε διαφορετικές απαιτήσεις. Σε αυτό το άρθρο, εστιάζουμε στους τομείς ΠoT (δηλαδή, την εφαρμογή τεχνολογιών IoT σε βιομηχανικούς τομείς εφαρμογής). Πιο συγκεκριμένα, ο αυτοματισμός εντός της διακριτής κατασκευής. Η πιο σημαντική ιδέα εδώ είναι η λεγόμενη πυραμίδα αυτοματισμού (IEC 62264), η οποία ορίζει τα διαφορετικά στρώματα από τα οποία αποτελείται ο σύγχρονος βιομηχανικός αυτοματισμός.

Αν και μερικές φορές αυτή η πυραμίδα ορίζεται διαφορετικά, στον πυρήνα της αποτελείται από πέντε στρώματα (αριστερά της Εικόνας 1). Ξεκινά με ένα επίπεδο εισόδου/εξόδου (I/O) που ελέγχεται από PLC. Αυτά τα PLC διασυνδέονται μέσω ενός

συστήματος εποπτικού ελέγχου και απόκτησης δεδομένων (SCADA) με το επίπεδο MES. Τέλος, τα συνολικά συστήματα παραγωγής και επιχειρήσεων ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσα σε μια επιχείρηση με σύστημα προγραμματισμού πόρων (ERP). Είναι επίσης σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι τα διαφορετικά επίπεδα αφορούν διαφορετικά μεγέθη και χρονικά πλαίσια δεδομένων.



Σχήμα 9. Μελλοντικές τεχνολογίες εντός των σημερινών στρωμάτων πυραμίδας αυτοματισμού

Ακολουθώντας το όραμα της Βιομηχανίας 4.0, αυτή η πυραμίδα θα αντικατασταθεί μακροπρόθεσμα από τη χρήση κυβερνοφυσικών συστημάτων (CPS) ή κυβερνοφυσικών συστημάτων παραγωγής (CPPSs). Οι έξυπνες μονάδες, όπως τα αυτόνομα καθοδηγούμενα οχήματα (AGV), θα αλληλεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους για να επιτρέψουν την πιο ευέλικτη παραγωγή με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Σε αυτό το πλαίσιο, αναφέρεται συχνά η χρήση ενός κελύφους διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων (AAS), το οποίο, σε συνδυασμό με ένα «περιουσιακό στοιχείο», αντιπροσωπεύει ένα έξυπνο στοιχείο Βιομηχανίας 4.0.

Για να διευκολυνθεί αυτή η μετάβαση, χρειάζονται νέες τεχνολογίες βιομηχανικής υποδομής που βασίζονται σε λογισμικό για να εισαχθούν στον τομέα της παραγωγής (δεξιά στην Εικόνα 1). Τα όρια μεταξύ του φυσικού PLC και του κλασικού IPC θα μπερδευτούν (ή θα γίνουν ασαφή) περισσότερο με τη χρήση ακραίων και κατανεμημένων εικονικών προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών (vPLC) (π.χ. με βάση το IEC 61499).

Για να πληρούνται οι απαιτήσεις που σχετίζονται με αξιόπιστη, χαμηλής καθυστέρησης και ντετερμινιστική ενσύρματη επικοινωνία, τα ανοιχτά πρότυπα εντός της ομάδας IEEE Time-Sensitive Networking (TSN) (*Δικτύωση με ευαισθησία στον χρόνο*) υιοθετούνται επί του παρόντος. Για την ασύρματη επικοινωνία, τα πρότυπα TSN βρίσκονται στη διαδικασία ενσωμάτωσής τους στην επόμενη έκδοση του Έργου Συνεργασίας 3ης Γενιάς (3GPP) για να επιτρέψουν την εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC) μέσω δικτύων 5G.

Επιπλέον, αντί να λειτουργεί μόνο ένα κεντρικό MES, ένα σύστημα διαχείρισης και εντοπισμού (MANO) μπορεί να εγκαταστήσει και να εκτελεί δυναμικά εφαρμογές σε κόμβους άκρης κοντά στην πηγή δεδομένων, όπως είναι για παράδειγμα, η προεπεξεργασία και η ανάλυση δεδομένων που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη (AI) και μπορούν να εκτελεστούν τοπικά (IEC, 2017). Ένα εύχρηστο παράδειγμα είναι μια διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (HMI) που βασίζεται στην επαυξημένη πραγματικότητα (AR), η οποία απαιτεί πολύ σύντομες καθυστερήσεις επικοινωνίας και θέτει υψηλές απαιτήσεις επεξεργασίας στην αναγνώριση αντικειμένων.

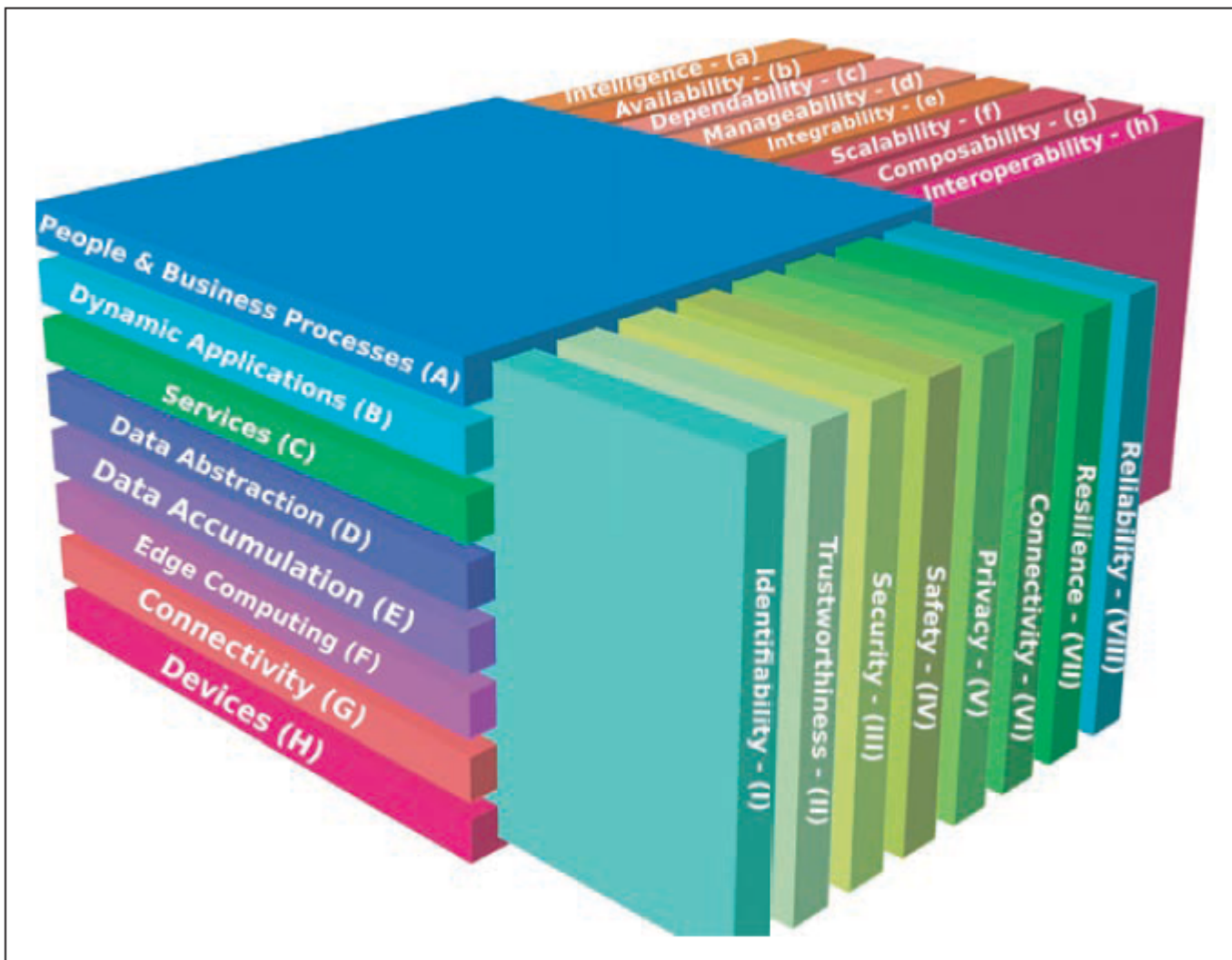
2.1.1. Αρχιτεκτονική 3D Επιπέδων IoT

Με βάση αυτή την ιδέα, η Συμμαχία για την Καινοτομία στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (AIOTI) διεύρυνε επίσης το πεδίο εφαρμογής και όρισε μια τρισδιάστατη αρχιτεκτονική με στρώματα IoT το 2018. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, αυτός ο πίνακας 8 x 8 x 8 στοχεύει να καλύψει διαφορετικές έννοιες που αλληλεπιδρούν με περιπτώσεις χρήσης IoT. Για αναγνωσιμότητα, έχουμε μεγεθύνει τις ετικέτες των αξόνων.

Μπορούν να αναγνωριστούν περαιτέρω από την αντίστοιχη αλφαβητική ονομασία τους: στον άξονα y (από κάτω προς τα πάνω): Συσκευές (H), Συνδεσιμότητα (G), Edge Computing (F), Αποθήκευση (E), Αφαίρεση (D), Υπηρεσία (C), Εφαρμογές (B) και Επίπεδα ανθρώπων και διεργασιών (A). στον άξονα x (από αριστερά προς τα δεξιά): Αναγνωρισιμότητα (I), Αξιοπιστία (II), Ασφάλεια (III), Ασφάλεια (IV), Απόρρητο (V), Συνδεσιμότητα (VI), Ανθεκτικότητα (VII) και Αξιοπιστία (VII). και στον άξονα z (από αριστερά προς τα δεξιά): Ευφυΐα (a), Διαθεσιμότητα (b), Αξιοπιστία (c),

Διαχειρισιμότητα (d), Ακεραιότητα (e), Επεκτασιμότητα (f), Συνθεσιμότητα (g) και Διαλειτουργικότητα (h).

Το τρίτο επίπεδο σε αυτό το σχήμα έχει τίτλο "Edge Computing" και είναι υπεύθυνο για την ανάλυση και τον μετασχηματισμό στοιχείων δεδομένων. Καθώς αυτό το κατακευματισμένο παράδειγμα υπολογιστικού νέφους βρίσκεται στον πυρήνα αυτού του άρθρου, αξίζει να αναθεωρήσουμε σύντομα τη σχετική εργασία σχετικά με αυτήν την έννοια.



Σχήμα 10. Αρχιτεκτονική με στρώσεις 3D IoT. Πηγές: (Vermesan et al., 2018)

2.1.2. Επίπεδα Ιεραρχίας

Η σύντομη επισκόπηση παραπάνω δίνει μια πρώτη ένδειξη του πιθανού χώρου προβλημάτων για την περιγραφή του παραδείγματος edge computing. Δηλαδή, η πολυπλοκότητα του υπό εξέταση θέματος, του παραδείγματος edge computing, είναι μάλλον ευρεία και ποικιλόμορφη. Ένας λόγος είναι ότι χρησιμοποιείται διαφορετική ορολογία και διατυπώνονται μεμονωμένες απαιτήσεις σε διάφορους τομείς εφαρμογής.

Ένας άλλος λόγος έγκειται στον απροσδιόριστο ορισμό της προαναφερθείσας φράσης «τα λογικά άκρα ενός δικτύου». Ανάλογα με την περίπτωση χρήσης, τις απαιτήσεις και το επιχειρηματικό μοντέλο, το λογικό άκρο ενός δικτύου μπορεί να διαφέρει πολύ. Η επεξεργασία δεδομένων δεν χρειάζεται απαραίτητα να λαμβάνει χώρα στο τοπολογικά εξώτατο άκρο. Αντίθετα, υπάρχει μια ευρεία συνέχεια πιθανής τοποθέτησης σε ένα δίκτυο (συχνά υποδηλώνεται ως υπολογισμός ομίχλης – cloud computing).

Η άκρη του προϊόντος βρίσκεται απευθείας σε ένα έξυπνο προϊόν που δημιουργήθηκε για περαιτέρω χρήση (π.χ. ένα smartphone). Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι ο τομέας της έξυπνης συσκευασίας, στον οποίο, για παράδειγμα, οι συντεταγμένες GPS μεταδίδονται τακτικά για περιπτώσεις χρήσης παρακολούθησης και ανίχνευσης. Το ευφυές προϊόν, το οποίο ελέγχει τη διαδικασία παραγωγής μεμονωμένα κατά την είσοδό του στο εργοστάσιο, είναι πιο οραματικό. Ο όρος βαθύ edge computing αναφέρεται στην ενσωμάτωση των εννοιών του υπολογιστικού νέφους, για παράδειγμα, στις ίδιες τις εγκαταστάσεις παραγωγής. Μαζί με έξυπνα προϊόντα, έξυπνες και αυτόνομες μονάδες μπορούν να αλληλοεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους και να επιτρέπουν το πιο ευέλικτο δυνατό σύστημα παραγωγής, έως ένα εξατομικευμένο μέγεθος παρτίδας 1 με το κόστος ενός μαζικού προϊόντος.

Το επίκεντρο πολλών συζητήσεων και οι περισσότερες περιπτώσεις χρήσης, ωστόσο, σχετίζονται με την έννοια των άκρων πύλης. Ένας λόγος είναι ότι τα ακριβά βιομηχανικά περιουσιακά στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα για τη

βελτιστοποίηση της απόδοσης επένδυσης (ROI). Από οικονομική άποψη, συχνά τα μηχανήματα δεν αντικαθίστανται από πιο σύγχρονες παραλλαγές για αρκετές δεκαετίες. Σε αυτήν την περίπτωση, μια πύλη που επικοινωνεί με τις συσκευές μέσω καλωδίου ή ασύρματα βρίσκεται κοντά στο στοιχείο, ανάλογο με ένα PLC.

Το άκρο του δικτύου πηγαίνει ένα βήμα παραπέρα, στο οποίο κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο θεωρείται ένας δυνητικός κόμβος άκρης. Για παράδειγμα, κάθε μεταγωγέας μπορεί να παρέχει επαρκείς πόρους για την εκτέλεση μικρότερων εφαρμογών. Στα παραδείγματα περιλαμβάνονται υπηρεσίες όπως ένα σύστημα ανίχνευσης εισβολής (IDS) ή ένας μεσίτης μεταφοράς τηλεμετρίας στην ουρά μηνυμάτων (MQTT).

Το ιδιωτικό άκρο μπορεί να τοποθετηθεί σε επίπεδο με ιδιωτικό σύννεφο. Εδώ, το τοπολογικό άκρο ορίζεται ως το όριο του διοικητικού τομέα, όπου τελειώνει η δική του περιοχή επιρροής. Αυτό βρίσκεται επί του παρόντος στο επίκεντρο των περισσότερων εμπορικών προσφορών. Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περίπτωση χρήσης είναι το άκρο συντοποθεσίας, που μερικές φορές αναφέρεται ως cloudlet. Τα μικρότερα κέντρα δεδομένων είναι διατεταγμένα τοπολογικά με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η συμμόρφωση με ορισμένες απαιτήσεις.

Για αυτό, είτε χρησιμοποιούνται υπάρχουσες κατακευματισμένες υποδομές (CDN, υποδομές δικτύων κινητής τηλεφωνίας, κ.λπ.), είτε πρέπει να γίνουν επενδύσεις για την κατασκευή νέων υποδομών. Σε μια τέτοια ρύθμιση, τόσο οι οικονομίες κλίμακας που ισχύουν για το cloud computing όσο και η τεχνική σκοπιμότητα για ντετερμινιστική επικοινωνία μπορούν να συνδυαστούν, για παράδειγμα, μέσω αποκλειστικών διαδρομών χρησιμοποιώντας γενικευμένη εναλλαγή ετικετών πολλαπλών πρωτοκόλλων (GMPLS) ή TSN ευρείας περιοχής. Αυτό επιτρέπει την απενεργοποίηση, όπως βρόχους ελέγχου σε πραγματικό χρόνο στο σύννεφο(Iet) που δεν θα ήταν δυνατά διαφορετικά.

2.1.3. Επίπεδα

Οι τεχνολογίες που επιτρέπουν στον edge κόμβο να επικοινωνεί με τον έξω κόσμο (είτε εσωτερικά με συσκευές είτε εξωτερικά) βρίσκονται στο επίπεδο συνδεσιμότητας. Στο βιομηχανικό πλαίσιο, αυτό περιλαμβάνει εξελίξεις από τη δεκαετία του 1950 (4–20 mA τρέχοντες βρόχους), τη δεκαετία του 1980 (συστήματα διαύλου πεδίου, π.χ. PROFIBUS,

CANopen και Sercos I/II) και τη δεκαετία του 2000 (βιομηχανικά συστήματα Ethernet όπως PROFINET, EtherCat, και EtherNet/IP), καθώς και τοπικές τεχνολογίες επικοινωνίας αισθητήρων-ενεργοποιητών όπως το IO-Link. Στην ενσύρματη περιοχή, ωστόσο, τα πρότυπα του IEEE από την ομάδα εργασίας TSN υιοθετούνται σταδιακά. Ταυτόχρονα, όλο και περισσότερες ασύρματες τεχνολογίες κινούνται στη βιομηχανία. Επί του παρόντος, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τα λεγόμενα δίκτυα πανεπιστημιούπολης 5G (δηλαδή, ιδιωτικά δίκτυα 5G σε ζώνες συχνοτήτων με άδεια χρήσης). Επίσης, υπάρχουν προτάσεις για χρήση επικοινωνίας ορατού φωτός (VLC) για τη σύνδεση edge κόμβων για μεγαλύτερες αποστάσεις, τεχνολογίες οπτικών ινών ή δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής κατανάλωσης (LPWAN) όπως το δίκτυο μεγάλης εμβέλειας ευρείας περιοχής (LoRaWAN) (ζώνη χωρίς άδεια) ή IoT στενής ζώνης (NB-IoT) (ζώνη άδειας χρήσης).

Παραδοσιακά, τα συστήματα που βασίζονται σε x86 με Microsoft Windows έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στον κλάδο, τα οποία ούτε έχουν συνδεθεί στο Διαδίκτυο ούτε έχουν ενημερωθεί ενεργά (κάθε λεπτό διακοπής λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα κόστος παραγωγής). Με την έλευση των ανοιχτών προτύπων και των ευρύτερων απαιτήσεων υλικού, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η υποκείμενη αρχιτεκτονική πυριτίου γίνεται πιο ετερογενής (π.χ. η χρήση συστημάτων που βασίζονται σε ARM, SPARC ή RISC-V). Επίσης, τα παράγωγα Linux χρησιμοποιούνται ως λειτουργικό σύστημα. Πολλές τρέχουσες εξελίξεις μπορούν να αντιστοιχιστούν στο επίπεδο του ενδιάμεσου λογισμικού. Ενώ οι διεπαφές ισχύος και τα συστήματα διαύλου πεδίου απαιτούν τις δικές τους στοίβες επικοινωνίας, όπως το πρωτόκολλο Highway Addressable Remote Transducer (HART), οι σύγχρονες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν κυρίως τη στοίβα TCP/IP ή UDP/IP του λειτουργικού συστήματος. Παραδείγματα ενδιάμεσο λογισμικό edge βιομηχανικού κόμβου περιλαμβάνουν το Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA), καθώς και το Data Distribution Service (DDS), το oneM2M ή το Web of Things (WoT).

Τελικά, ο πιο σημαντικός πόρος είναι τα πραγματικά δεδομένα, τα οποία εκχωρούνται στο επίπεδο πληροφοριών και, ανάλογα με το πλαίσιο, μπορεί να αντιπροσωπεύουν τα λεγόμενα ψηφιακά δίδυμα. Ενώ οι δίαυλοι πεδίου φέρνουν τα δικά τους μοντέλα

δεδομένων, στο OPC UA χρησιμοποιείται ως βάση ένα αντικειμενοστραφή μοντέλο δεδομένων και υπό τον όρο «προδιαγραφές συνοδευτικών προδιαγραφών», επί του παρόντος

Η σημασιολογία που σχετίζεται με το OPC UA ορίζεται για να διευκολύνει τις μηχανές να επικοινωνούν μεταξύ τους. Άλλες προσεγγίσεις όπως το oneM2M και το WoT προσαρμόζουν τη σειριοποίηση και τα πρότυπα ανεξάρτητα από το ενδιάμεσο λογισμικό, που σχεδιάστηκαν στο πλαίσιο του Σημασιολογικού Ιστού τα τελευταία 30 χρόνια και επιτρέπουν τον ορισμό κατανεμημένων δομών δεδομένων με βάση τις έννοιες συνδεδεμένων δεδομένων.

Για να εξαχθεί μια τιμή από αυτά τα δεδομένα, οι πραγματικές εφαρμογές εκτελούνται στο επίπεδο εφαρμογής. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή, αυτό μπορεί να είναι κάθε είδους εφαρμογή ή λειτουργία δικτύου, για παράδειγμα, PLC που βασίζονται σε λογισμικό ή εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης. Το τελευταίο επιτρέπει την έξυπνη λήψη αποφάσεων στην άκρη. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να αλληλεπιδράσει τοπικά και αυτόνομα με το περιβάλλον ή ακόμα και σε συγχρονισμό με συστήματα cloud. Ενσωματωμένα σε ένα κατάλληλο οικοσύστημα, μπορούν να εμφανιστούν νέα επιχειρηματικά μοντέλα, παρόμοια με τις τρέχουσες εξελίξεις στο AppStore.

Επιπλέον, απαιτήσεις όπως η ασφάλεια, η ικανότητα σε πραγματικό χρόνο, η επιτάχυνση (AI) και η διαχείριση μπορούν να αντιμετωπιστούν διαφορετικά σε διαφορετικά επίπεδα, τα οποία μπορεί να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την τοπολογική θέση (τα λεγόμενα cross-layer concerns).

Το επίπεδο ασφαλείας περιλαμβάνει μια ποικιλία τεχνολογιών για τη διασφάλιση της ασφαλείας ενός κόμβου άκρης. Ανάλογα με το επίπεδο, αυτό περιλαμβάνει εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (VPN), μονάδες αξιόπιστης πλατφόρμας (TPM), unikernels, SELinux, μια υποδομή δημόσιου κλειδιού (PKI) και πολλές άλλες έννοιες, συμπεριλαμβανομένων των blockchains. Ειδικότερα, στο πλαίσιο του αξιόπιστου υπολογισμού αιχμής, απαιτείται ένας συνδυασμός προσεγγίσεων απομόνωσης και τεμαχισμού με κρυπτογραφικά μέτρα για να καταστεί δυνατή η κατανεμημένη ασφαλής επεξεργασία δεδομένων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχουν συχνά σκληρές απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα στο διακριτό πλαίσιο παραγωγής. Αυτά και πάλι πρέπει να

αντιμετωπιστούν διαφορετικά σε όλα τα επίπεδα και περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως 5G, TSN και λειτουργικά συστήματα σε πραγματικό χρόνο (RTOS) ή τη χρήση αποκλειστικών μικροελεγκτών.

Για την αποτελεσματική χρήση των νευρωνικών δικτύων, για παράδειγμα, οι edge κόμβοι μπορούν να επεκταθούν στο επίπεδο επιτάχυνσης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση γενικών μονάδων επεξεργασίας γραφικών (GPU) ή προγραμματιζόμενων συστοιχιών πύλης πεδίου (FPGA), αλλά και τη χρήση ενός TPU ή άλλων εμπορικών επιταχυντών τεχνητής νοημοσύνης. Επίσης, οι κλασικές επεκτάσεις όπως ένας κινητήρας εκφόρτωσης TCP (TOE) θα βρίσκονται σε αυτό το επίπεδο πολλαπλών επιπέδων.

Το επίπεδο εικονικοποίησης λαμβάνει υπόψη ότι το παράδειγμα edge computing είναι ένα πρότυπο κατανεμημένου υπολογιστικού νέφους. Το υλικό είναι κοινόχρηστο με πολλές εφαρμογές, οι οποίες εκτελούνται ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι προσεγγίσεις όπως το εικονικό LAN (VLAN), το VT-x, το Linux container (LXC), οι κλασικές εικονικές μηχανές (VM) και το sandboxing παίζουν σημαντικό ρόλο εδώ.

Τέλος, οι edge κόμβοι κατανέμονται και πρέπει να ελέγχονται σε επίπεδο διαχείρισης. Αυτό περιλαμβάνει τη διαμόρφωση των διαδρομών δικτύου και των τμημάτων δικτύου, την ενημέρωση του υλικού λογισμικού ή του λειτουργικού συστήματος, την ενσωμάτωση και την ενορχήστρωση εφαρμογών (π.χ. λειτουργίες εικονικού δικτύου, VNF). Η ενσωμάτωση σε μια πλατφόρμα IoT πραγματοποιείται επίσης σε αυτό το επίπεδο. Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ένα σύστημα κεντρικής διαμόρφωσης χρήστη (CUC) για τη διαμόρφωση ενός δικτύου που βασίζεται σε TSN μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή δικτύου (CNC), μιας συγκεκριμένης παρουσίας του παραδείγματος δικτύωσης που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και των edge κόμβων μέσω OPC UA χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο PubSub TSN Centralized Configuration (PTCC), το οποίο αυτή τη στιγμή αναπτύσσεται στο πλαίσιο της Ομάδας Εργασίας IEEE OPC UA PubSub TSN.

2.2.Βασικές Αρχιτεκτονικές Edge Computing

Η τεχνολογία Edge Computing προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες στους ενοποιητές συστημάτων και στους ιδιοκτήτες επιχειρήσεων να αυξήσουν την παραγωγικότητα στην εποχή του Industry 4.0 ή να εξασφαλίσουν την πιο αποτελεσματική χρήση δεδομένων σε βιομηχανικά συστήματα. Χάρη στην υπολογιστική του ικανότητα το Edge Computing, μπορεί να εκτελεί προγνωστική ανάλυση σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Έτσι οι σύγχρονες βιομηχανικές πρακτικές, μπορούν να αντιμετωπίσουν πολλές προκλητικές και τρομακτικές απαιτήσεις. Εδώ αναδεικνύεται το σημείο εκκίνησης για την ανάπτυξη λύσεων για υπολογιστές αιχμής σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Ενώ οι προηγούμενες μελέτες κάλυψαν τα γενικά χαρακτηριστικά των υπολογιστών αιχμής για τους τομείς, οι απαιτήσεις του τομέα του βιομηχανικού αυτοματισμού ελήφθησαν ως βάση στη μελέτη. Για το σκοπό αυτό, έχουν προταθεί και αναλυθεί τέσσερις σημαντικές αρχιτεκτονικές αυτοματισμού, ο εποπτικός έλεγχος και η λήψη δεδομένων (SCADA), ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC), ο προγραμματιζόμενος ελεγκτής αυτοματισμού (PAC) και το IO-LINK.

Το Edge computing παρέχει κρίσιμους μετασχηματισμούς για βιομηχανικές εφαρμογές. Σήμερα, οι επιχειρήσεις αναπτύσσουν υπολογιστές αιχμής και υπολογιστικό νέφος για να αποθηκεύουν, να αναλύουν και να επεξεργάζονται δεδομένα ταχύτερα για συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση. Σε αυτή τη μελέτη του (Topaloglu, 2021), ορίστηκε ένα σημαντικό σύνολο κριτηρίων για εφαρμογές Edge computing σε συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού, ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαδικτυακών και έντυπων αντιγράφων σχετικών περιοδικών και έντυπων βιβλίων.

Οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές για τη λύση, λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη του συστήματος βιομηχανικού αυτοματισμού, ήταν αρχικά αρχιτεκτονική SCADA, εν συνεχεία αρχιτεκτονική PLC, έπειτα αρχιτεκτονική PAC, στη συνέχεια χαρακτηριστικά επεξεργασίας δεδομένων των αρχιτεκτονικών IO-LINK..

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, ο τομέας των αυτοματισμών αποκτά μεγαλύτερη αξία και προσπαθεί να παράγει περισσότερες καινοτομίες προκειμένου να συμβαδίζει με την τεχνολογία. Τα συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού αποτελούν επίσης τη βάση αυτών των σταδίων παραγωγής. Μπορούν να αναφέρονται ως μια συσκευή ή ένα σύνολο λογισμικού που επιτρέπει στον χρήστη να επικοινωνεί με το μηχάνημα και τις εγκαταστάσεις παραγωγής.

Το Edge computing φέρνει σημαντικά πλεονεκτήματα στα συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού καθώς βελτιστοποιεί σημαντικά τη χρήση των πόρων. Κατ' αρχάς, οι επεξεργαστές που χρησιμοποιούνται στις σχετικές συσκευές παρέχουν πιο αποτελεσματική ασφάλεια υλικού με σχετικά χαμηλή απαίτηση ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, συλλαμβάνονται γρήγορα τα δεδομένα που σχετίζονται με τη ροή προκειμένου να ανιχνευθούν πιθανά ελαττώματα του προϊόντος.

2.2.1. SCADA

Τα συστήματα SCADA χρησιμοποιούνται σε υποδομές ζωτικής σημασίας και βιομηχανικούς τομείς (Stouffer et al., 2008). Είναι ένας συνδυασμός απόκτησης δεδομένων και τηλεμετρίας (ασύρματη μεταφορά δεδομένων). Οι κύριες λειτουργίες τους είναι η συλλογή δεδομένων, η επεξεργασία δεδομένων για χρήση από τον χειριστή αλλά και ο έλεγχος απομακρυσμένων συσκευών από τον χειριστή (Gaushell & Darlington, 1987).

Τα δεδομένα που συλλέγονται από ενεργοποιητές τελικών συσκευών, κινητήρες μετάδοσης κίνησης, βαλβίδες, λαμπτήρες, συσκευές μέτρησης ταχύτητας, ανιχνευτές εγγύτητας, ηλεκτρονικούς αισθητήρες θερμοκρασίας, δύναμης και ροπής μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και μεταφέρονται στο σύστημα SCADA. Οι εντολές που δίνονται από το σύστημα SCADA μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα σε αυτό το επίπεδο, επιτρέποντας την πραγματοποίηση των επιθυμητών κινήσεων στον πραγματικό κόσμο.

Προκειμένου το σύστημα SCADA να αναλάβει τις λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου, οι πληροφορίες εισόδου και εξόδου της διαδικασίας ορίζονται σε βάση δεδομένων. Όταν κάθε πληροφορία που αντιστοιχεί στις μεταβλητές διεργασίας στη βάση δεδομένων πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία, τα μπλοκ συναλλαγών που θα

χρησιμοποιηθούν εκτελούνται στη φάση ορισμού της βάσης δεδομένων. Τα δεδομένα SCADA που πρόκειται να υποβληθούν σε επεξεργασία στον υπολογισμό αιχμής διακρίνονται σε δεδομένα ποιότητας, δεδομένα απόδοσης παραγωγής, δεδομένα κόστους παραγωγής, δεδομένα συντήρησης και στατιστικά δεδομένα.

Τα συστήματα SCADA διαθέτουν μια δομή συναγερμού που έχει αναπτυχθεί για να παρακολουθεί συνεχώς τις μεταβλητές της διαδικασίας και να προειδοποιεί τον χειριστή σε περίπτωση που αυτές οι μεταβλητές φτάσουν σε ανεπιθύμητες τιμές. Επιπλέον, αναφέρουν τα αποτελέσματα παραγωγής που έγιναν σε διαφορετικές βάρδιες στο εργοστάσιο, ορισμένες μεταβλητές που αφορούν τη διαδικασία, τα αποτελέσματα των γεγονότων κατόπιν αιτήματος καθώς και γεγονότα που συμβαίνουν ξαφνικά ή περιοδικά. Έτσι, οι συνταγές παραγωγής γίνονται πράξη. Οι συνταγές μπορούν να συσχετιστούν με γραφικά, επιτρέποντας στον χειριστή να έχει εύκολη πρόσβαση και να τις τροποποιεί εάν είναι απαραίτητο.

Το σύστημα SCADA, η Μονάδα απομακρισμένου τερματικού (Remote Terminal Unit-RTU), η οποία σχηματίζει τις τερματικές μονάδες συλλογής και ελέγχου δεδομένων, το σύστημα επικοινωνίας που επιτρέπει την αμοιβαία αποστολή δεδομένων ή πληροφοριών σε μια άλλη περιοχή, οι εγκαταστάσεις που κατανέμονται σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή παρακολουθούνται και διαχειρίζονται εξ αποστάσεως με δομή που βασίζεται σε υπολογιστή. Αποτελείται από κύριες τερματικές μονάδες (Master Terminal Unit-MTU). Απαιτείται αποτελεσματική επικοινωνία για αποτελεσματική ροή μηνυμάτων μεταξύ MTU και PLC / RTU (Oliveira et al., 2016).

Σε ένα σύστημα SCADA, μπορούν να συμπεριληφθούν απομακρυσμένες τερματικές μονάδες, κύριες τερματικές μονάδες, δίκτυα επικοινωνίας, μονάδες συλλογής δεδομένων, αισθητήρες, λογισμικό, κεντρικός χώρος ελέγχου, πίνακες ελέγχου, τερματικά συστήματος scada, οθόνες υπολογιστών, εκτυπωτές, τροφοδοτικά αδιάλειπτης ισχύος κ.λ.π.

Όλα τα είδη πληροφοριών που συλλέγονται από συσκευές ελέγχου στο σύστημα SCADA διατηρούνται σε μια μεταβλητή στη βάση δεδομένων που ονομάζεται Tagname. Αυτές οι πληροφορίες θα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία και να προσαρμόζονται στις ανάγκες και τις απαιτήσεις της επιχείρησης. Το λογισμικό SCADA

βοηθά τους υπαλλήλους να επεξεργάζονται και να προβάλλουν δεδομένα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και καθορίζει το τι να παρακολουθεί, και πότε να παρακολουθεί, αποδεκτά εύρη παραμέτρων, τον τύπο απόκρισης κ.λ.π. (Li et al., 2015).

2.2.2. PLC

Τα PLC είναι συσκευές που βασίζονται σε μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διαδικασιών όπως τμήματα παραγωγής σε εργοστάσια ή έλεγχο μηχανών. Τα PLC χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά από την αυτοκινητοβιομηχανία στα τέλη της δεκαετίας του 1960 (Parr, 2003). Αυτό το σύστημα εποπτείας σαρώνει τις πληροφορίες εισόδου με ταχύτητες αόρατες με γυμνό μάτι και λειτουργεί με τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο με τις αντίστοιχες πληροφορίες εξόδου.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του PLC είναι ότι οι εντολές του προγράμματος υπόκεινται σε επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ενώ επιτρέπει την πραγματοποίηση εντολών στέλνοντάς τες στα modules που συνδέονται με τον έξω κόσμο όπως είσοδο/έξοδο και επικοινωνία στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Το PLC μπορεί να συνδεθεί πιο εύκολα με αισθητήρες και ενεργοποιητές (Kiran et al., 2013). Με τον τρόπο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λύση σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου ο χρονισμός είναι κρίσιμος.

Για το σκοπό αυτό, με εντολές όπως η λογική, η αλληλουχία, η καταμέτρηση, η επεξεργασία δεδομένων, η σύγκριση και οι αριθμητικές πράξεις, ένα σύστημα PLC, το οποίο αξιολογεί τις εισόδους και εκχωρεί εξόδους με υποστήριξη προγραμματισμού, παρέχει επικοινωνία μεταξύ επεξεργαστή - μονάδων μνήμης και τροφοδοσίας, και τον εγκέφαλο προγραμματιζόμενων ελεγκτών και αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας, η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του προγράμματος ελέγχου στον μικροελεγκτή. Η μονάδα μνήμης αποτελείται από τη μονάδα εισόδου που της επιτρέπει να χρησιμοποιεί το σήμα που λαμβάνει από τα ελεγχόμενα μηχανήματα, τον επεξεργαστή ή έναν εξωτερικό διακόπτη ή αισθητήρα και τη μονάδα εξόδου όπου ο ελεγκτής και να παρέχει σήματα εξόδου για τον έλεγχο της διαδικασίας στο παραγωγή.

Τα PLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συλλέκτες δεδομένων σχετικά με τη διαδικασία που ελέγχουν. Στη συνέχεια, αυτά τα δεδομένα συγκρίνονται με τα δεδομένα αναφοράς στη μνήμη του ελεγκτή και μεταφέρονται σε άλλη συσκευή για αναφορά.

Το σύστημα PLC καθορίζει τα φυσικά γεγονότα, τις αλλαγές και τις κινήσεις που συμβαίνουν στο πεδίο με διάφορες συσκευές μέτρησης και αξιολογεί τις πληροφορίες που λαμβάνονται σύμφωνα με το γραπτό πρόγραμμα χρήστη. Αντανακλά επίσης τα αποτελέσματα που προκύπτουν από λογικές πράξεις στο πεδίο μέσω των στοιχείων των εντολών.

Δεδομένου ότι τα PLC αντικαθιστούν τα λογικά κυκλώματα που βασίζονται σε ρελέ, μια γλώσσα προγραμματισμού που αποτελείται από σύμβολα ανοιχτών και κλειστών κλειδιών η οποία ονομάζεται λογική κλίμακας χρησιμοποιείται συχνά κατά τον προγραμματισμό PLC. Αυτή η γλώσσα προγραμματισμού έχει σχεδιαστεί για να προγραμματίζεται με σχηματικά ή κλιμακωτά διαγράμματα αντί για κοινές γλώσσες υπολογιστών.

2.2.3. PAC

Ένα τυπικό σύστημα ελέγχου διαθέτει μια διεπαφή που δημιουργείται από σήματα προερχόμενα από αισθητήρες ή ενεργοποιητές. Δεδομένου ότι έχουν αναπτυχθεί πολύ εκτεταμένες εφαρμογές στη σύγχρονη βιομηχανία, η δημιουργία αυτής της διεπαφής είναι αρκετά επίπονη και ο ελεγκτής έχει πολλές απαιτήσεις. Το σημείο αυτό κατέστη η αφετηρία για την ανάπτυξη των PAC. Δεδομένου ότι τα PLC και οι ελεγκτές που βασίζονται σε υπολογιστή είναι ανεπαρκείς σε σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτούνται τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην αρχή. Οι PAC έχουν προκύψει καθώς έχουν ανάγκη ανοιχτών, πολυλειτουργικών και ολοκληρωμένων συστημάτων ελέγχου. Τα PAC επεκτείνουν τις δυνατότητες των PLC, ενσωματώνονται με συσκευές ελέγχου που βασίζονται σε υπολογιστή και συνδέουν δύο ξεχωριστούς κλάδους. Πρόσφατα παραδείγματα βιομηχανικής χρήσης του πλαισίου PAC δίνονται στην εργασία του (Zhang, 2013), όπου μια μονάδα παρασκευής άνθρακα ελέγχεται αυτόματα χρησιμοποιώντας το PAC και στην εργασία του (Zhang, 2008) όπου εκτελούνται προσομοιώσεις παλίνρροιας χρησιμοποιώντας το πλαίσιο PAC.

Τα PAC χρησιμοποιούν σύγχρονα δίκτυα δεδομένων για να αλληλεπιδρούν με καταναμημένα I/O, προγράμματα οδήγησης, άλλες συσκευές PAC και εταιρικά στοιχεία. Αποθηκεύουν δεδομένα με τρόπο ανώτερο από τα PLC. Τα PAC, τα οποία έχουν καλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σύγκριση με τα PLC, προηγούνται επίσης με την ισχύ ελέγχου τους. Συνδυάζοντας όλα αυτά τα χαρακτηριστικά, τα PAC έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα του αυτοματισμού.

Όσον αφορά την ασφάλεια των πληροφοριών αιχμής, τα PAC χρησιμοποιούν μια ενιαία πλατφόρμα, η οποία είναι αξιόπιστη επειδή πρόκειται για Λειτουργικό Σύστημα σε πραγματικό χρόνο (Real Time Operating System-RTOS). Επομένως, οι κινήσεις, τα λογικά κυκλώματα και ο έλεγχος διεργασιών πραγματοποιούνται σε μια ενιαία πλατφόρμα. Αντίθετα, το PAC έχει δώσει καλύτερη λύση σε αυτό το ζήτημα, αφού απαιτούνται περισσότερες από μία πλατφόρμες σε PLC. Τα PAC έχουν πολλές λειτουργίες στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές (μελέτες συστήματος, απόδοση, κατάσταση κ.λπ.). Παρακολουθούν κεντρικά, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη δομή επικοινωνίας, απόδοση μηχανήματος και εξοικονόμηση χρόνου.

Τα PAC έχουν πολύ πιο προηγμένο ρόλο χάρη στην ικανότητά τους να παρακολουθούν εξ αποστάσεως, τη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων καθώς και να οργανώνουν απλές διεπαφές με τη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (HMI) χρησιμοποιώντας τη μεγάλη χωρητικότητα δικτύου, τη μνήμη και την επεξεργαστική τους ισχύ. Για παράδειγμα, ένα τυπικό PAC έχει τρία βασικά δίκτυα (Ethernet, TCP/IP και υπηρεσίες web, όπως http ή SNMP), επεκτάσιμη μνήμη flash και λειτουργία πολλαπλών εργασιών.

Μεταξύ των βασικών χαρακτηριστικών των στοιχείων PAC παρέχουν επεξεργασία δεδομένων αιχμής, έχοντας πιο ανοιχτή αρχιτεκτονική, καλύτερες και ευκολότερες δυνατότητες επικοινωνίας και ελέγχου, υποστήριξη πολλαπλών γλωσσών, εφαρμογές πολλαπλών εργασιών, αρθρωτό σχεδιασμό, πιο αναλογικές I/O (Είσοδο/Εξοδο) επιλογές, ενσωμάτωση με πολλές βάσεις δεδομένων όπως SQL και εύκολο προγραμματισμό με θύρα USB.

2.2.4. IO- LINK

Το IO-Link διασφαλίζει τη διαθεσιμότητα των δεδομένων που ζητούνται από τη βιομηχανία που λειτουργεί με το διαδίκτυο στη διαδικασία Industry 4.0. Όλες οι πληροφορίες για αυτόν τον τομέα βασίζονται στο διαδίκτυο. Συνήθως αυτές οι πηγές πληροφοριών είναι αισθητήρες. Χάρη στο IO-Link, οι αισθητήρες θα επιλύονται σε συναλλαγές όπως πληροφορίες διέλευσης και παρακολούθηση κατάστασης. Στον κλάδο της βιομηχανίας όπου το διαδίκτυο είναι σημαντικό, τα πρότυπα και η συνέχεια είναι σημαντικά.

Η IO-Link παρεμβαίνει σε αυτό το ζήτημα και προσπαθεί να ενισχύσει την επικοινωνία των αισθητήρων που θα εξασφαλίσουν αυτή τη συνέχεια.

IO-Link; Είναι ένα καταναμημένο από σημείο σε σημείο πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με αισθητήρες και ενεργοποιητές και έχει βρεθεί σε αναζήτηση μιας ευκολότερης και συνολικής λύσης. Η τεχνολογία IO-Link, που αναπτύχθηκε για να επικοινωνεί με το χαμηλότερο επίπεδο αυτοματισμού ελεγκτή, διαθέτει αποτελεσματική σύνδεση σημείου προς σημείο. Έχει σχεδιαστεί μόνο για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας σύνδεσης μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης για ασύρματα συστήματα επικοινωνίας αισθητήρων/ενεργοποιητών ορίζονται τυπικά από διαδοχικούς χρόνους απόκρισης 10 ms ή λιγότερο, και έως 100 αισθητήρες και ενεργοποιητές σε μια κυψέλη παραγωγής που εκτείνεται αρκετά μέτρα (Krush et al., 2016).

Το ασύρματο σύστημα IO-Link μπορεί να ταξινομηθεί ως σύστημα επικοινωνίας στενής ζώνης (Heynicke et al., 2017). Εκπέμπει μεταξύ IO-Link και συσκευών με ταχύτητα 230 kBaud σε 400 μικροδευτερόλεπτα. Παρέχει επίσης την επιλογή μεγάλων πακέτων δεδομένων. Επεξεργασμένα δεδομένα, δεδομένα αναγνωριστικού κατασκευαστή, παράμετροι συστήματος, δεδομένα διαμόρφωσης και δεδομένα ελέγχου μπορούν να αποσταλούν μέσω IO-Link εάν κάτι τέτοιο απαιτείται. Με πολύπλοκους αισθητήρες, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, παρέχεται μια πολύ αποτελεσματική και οικονομική λύση αυτοματισμού και η διαδικασία καλωδίωσης γίνεται πολύ πιο απλή.

Ένα από τα ισχυρά πλεονεκτήματα του IO-Link είναι η διαθεσιμότητα δεδομένων με εκτεταμένες επιπτώσεις. Η πρόσβαση και η διαχείριση των δεδομένων αισθητήρων

διατηρεί την ομαλή λειτουργία των στοιχείων του συστήματος, απλοποιεί την αντικατάσταση συσκευών και βελτιστοποιεί τη συντήρηση του μηχανήματος. Έτσι, μειώνονται τόσο το κόστος, όσο και ο κίνδυνος διακοπής λειτουργίας.

Σε εφαρμογές υπολογιστών άκρων, εκτός από την απομακρυσμένη ρύθμιση των αισθητήρων του IO-Link, η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων παρέχει αυτόματη επαναφόρτωση δεδομένων κατά την αλλαγή της συσκευής. Οι χρήστες μπορούν να μεταφέρουν τις υπάρχουσες τιμές των παραμέτρων του αισθητήρα στον αλλαγμένο αισθητήρα για να κάνουν τη συσκευή να αλλάξει γρήγορα (Huda, & Erçelebi, 2017).

3. Το PLC ως Έξυπνη Υπηρεσία στη Βιομηχανία 4.0

Οι βιομηχανικοί έλεγχοι, και ειδικότερα, οι ελεγκτές PLC αποτελούν σήμερα μια σημαντική τεχνολογική βάση για την αυτοματοποίηση των βιομηχανικών διεργασιών. Ακόμη και στην εποχή του Industry 4.0 (I40) και του βιομηχανικού Διαδικτύου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτοί οι ελεγκτές θα συνεχίσουν να απαιτούνται σε σημαντικό βαθμό για την παραγωγή του αύριο. Ωστόσο, οι ελεγκτές πρέπει να πληρούν μια σειρά από πρόσθετες απαιτήσεις, που προκύπτουν από τις νέες συνθήκες παραγωγής.

Κατά την εφαρμογή των αρχών του Industry 4.0 (Kagermann et al., 2013), προκύπτουν δικτυωμένα συστήματα παραγωγής υψηλής ποιότητας, βασισμένα σε φυσικά συστήματα στον κυβερνοχώρο (CPS), τα οποία αναφέρονται επίσης ως συστήματα φυσικής παραγωγής στον κυβερνοχώρο (CPPS).

Μια σειρά από απαιτήσεις I40 τίθενται στους μελλοντικούς ελεγκτές που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Εισαγωγή του παραδείγματος υπηρεσιών στον αυτοματισμό παραγωγής (υπηρεσίες παραγωγής).
- Αυτονομία, δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης και ευελιξία.
- Ξεπερνούν την αυστηρή ενθυλάκωση πληροφοριών των ελεγκτών.
- Δικτύωση σε τοπικά και παγκόσμια δίκτυα.
- Διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συστημάτων ελέγχου.
- Οι εξαρτήσεις πρέπει να αλλάζουν δυναμικά κατά το χρόνο εκτέλεσης.
- Χρήση μοντέλων για την ανάπτυξη προσεγγίσεων ελέγχου «υψηλότερης ποιότητας».
- Ενορχήστρωση ετερογενών ελεγκτών.

Οι τρέχοντες ελεγκτές PLC δεν είναι ακόμη σε θέση να ικανοποιήσουν την πλειονότητα αυτών των απαιτήσεων ή αν το κάνουν είναι μόνο σε στοιχειώδη βάση ή με εξαιρετικά υψηλό κόστος.

3.1. Σύγχρονη Τεχνολογία PLC

Ως αποτέλεσμα της ιστορικής εξέλιξης οι ελεγκτές PLC, έχουν αναπτυχθεί ως ιδιόκτητα συστήματα συσκευών που λειτουργούν τοπικά σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Εάν η δικτύωση αυτών των ελεγκτών είναι απαραίτητη από την άποψη του χρήστη, χρησιμοποιούνται ιδιόκτητα πρωτόκολλα που λειτουργούν σε TCP/IP ή τυποποιημένα πρωτόκολλα, όπως Modbus TCP, Profinet, κ.λπ. Οι τυπικές τεχνολογίες που είναι ευρέως διαδεδομένες από το Διαδίκτυο και τον Ιστό δεν έχουν παίξει σχεδόν κανέναν ρόλο μέχρι στιγμής για τους ελεγκτές PLC.

Για αρκετά χρόνια, ωστόσο, έχει δρομολογηθεί ένας μετασχηματισμός, με τους κατασκευαστές PLC να ενσωματώνουν ολοένα και περισσότερο τις τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών (Information and Communication-IC) από τον Ιστό στα συστήματά τους, όπως διακομιστές ιστού και σελίδες HTML για διάγνωση και διαμόρφωση, προκειμένου να προσαρμόσουν τους ελεγκτές σταδιακά στις νέες απαιτήσεις.

Τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις για να γίνουν οι ελεγκτές PLC συμβατοί με το I40 μπορούν ουσιαστικά να αποκαλυφθούν από τεχνολογίες αιχμής. Αυτά περιλαμβάνουν την εισαγωγή βασικών τεχνολογιών Ιστού, την παγκόσμια δικτύωση δεδομένων διεργασιών, την εισαγωγή αρχών υπηρεσιών και την εικονικοποίηση των PLC.

Οι περισσότεροι από τους νεότερους ελεγκτές PLC περιέχουν ήδη έναν διακομιστή ιστού και ειδικές σελίδες HTML στη συσκευή επιτρέποντας διαμόρφωση και διάγνωση του ελεγκτή βάσει προγράμματος περιήγησης. Επεξεργάζονται δεδομένα ή μεταβλητές προγράμματος από το πρόγραμμα ελέγχου και μπορούν να διαβαστούν, μερικές φορές και να γραφτούν αλλά με περιορισμούς. Οι λύσεις είναι ιδιόκτητες και προσαρμοσμένες στον σχετικό ελεγκτή. Ανοιχτές και συνεπείς διεπαφές ιστού δεν είναι διαθέσιμες. Επομένως, οι παραπάνω απαιτήσεις I40 δεν μπορούν να εκπληρωθούν.

3.2. Παγκόσμια Δικτύωση Δεδομένων Διαδικασιών

Για την ενσωμάτωση των ελεγκτών PLC σε συστήματα επίβλεψης, διαχείρισης και συντονισμού (π.χ. συστήματα SCADA ή MES), τα οποία βασίζονται εν μέρει σε τεχνολογίες Ιστού, επιπλέον ενότητες πρέπει να ενσωματωθούν στους ελεγκτές PLC, οι οποίες επιτρέπουν αμφίδρομη και βασισμένη σε συμβάντα μετάδοση δεδομένων διεργασίας μεταξύ του ελεγκτή, του επόπτη και του συστήματος διαχείρισης και οι οποίες περιλαμβάνουν λύσεις όπως η σύνδεση web με τον μεσίτη MQTT σε ελεγκτές WAGO⁵ ή πρόσβαση σε ελεγκτές που περιέχουν ήδη διακομιστή OPC UA (π.χ. Siemens PLC S7-1500).

Αυτές οι λύσεις περιλαμβάνουν ιδιόκτητες και κλειστές ενσωματωμένες μονάδες ελέγχου. Αν και οι μονάδες χρησιμοποιούν τεχνολογίες Ιστού, ωστόσο δεν μπορούν να μεταφερθούν σε άλλους ελεγκτές. Η καθολική επικοινωνία δεδομένων διεργασίας χρησιμοποιείται για διεπαφές ανθρώπινης μηχανής (human machine interfaces-HMI) ή/και λειτουργίες επόπτη και συντονισμού στο υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας αυτοματισμού (π.χ. επίπεδο διαχείρισης εγκαταστάσεων). Δεν υπάρχουν έγκυρες δηλώσεις σχετικά με τη χρονική απόκριση της μετάδοσης δεδομένων διεργασίας. Ωστόσο, διαφορετικές δηλώσεις προκύπτουν από τους χρόνους αντίδρασης (λανθάνοντες χρόνους) από 200 έως 500 ms, ή περισσότερο. Δεν πρόκειται ουσιαστικά για διαθέσιμες ανοιχτές και συνεπείς διεπαφές ιστού. Οι παραπάνω απαιτήσεις I40 μπορούν να εκπληρωθούν μόνο εν μέρει, ενώ μερικές φορές απαιτούνται υψηλά έξοδα προσαρμογής για την ενσωμάτωση σε ένα CPPS.

⁵ WAGO Kontakttechnik GmbH: Effective Upgrade: A Plug-In Makes WAGO Controllers IoT-Ready.

3.3.Εισαγωγή Αρχών Υπηρεσιών

Με βάση την απαίτηση I40 για τη δυνατότητα σέρβις ενός ελεγκτή I40, υπάρχουν ορισμένα έργα (Colombo et al., 2014) που εμπλέκονται στην ενσωμάτωση λειτουργιών υπηρεσίας σε ελεγκτές PLC. Έτσι, το Πρωτόκολλο Συσκευών για Υπηρεσίες Ιστού (DPWS) επιτρέπει, ως τυποποιημένο πρωτόκολλο, πρόσβαση βάσει υπηρεσιών σε ελεγκτές PLC⁶ και για την ανάγνωση/εγγραφή δεδομένων διεργασίας. Το εσωτερικό λειτουργικό σύστημα ενός PLC πρέπει να εξοπλιστεί κατάλληλα, με την υποστήριξη του κατασκευαστή του ελεγκτή.

Ωστόσο, οι λύσεις DPWS έχουν ένα βασικό μειονέκτημα: Αντί να μειωθεί ή να αφαιρεθεί η ενθυλάκωση πληροφοριών (απαίτηση I40), άλλες λειτουργίες (συναρτήσεις υπηρεσίας) ενσωματώνονται στον ελεγκτή. Επιπλέον, το DPWS χρησιμοποιεί τα πολύ βαριά και πολύπλοκα πρωτόκολλα υπηρεσιών web της Microsoft. Ο εφικτός χρόνος μετάδοσης δεδομένων διεργασίας μέσω ενός παγκόσμιου δικτύου, επομένως, τείνει να βρίσκεται στο ανώτερο εύρος, ενώ είναι δύσκολο να ληφθούν συγκεκριμένα δεδομένα.

3.4.Εικονικοποίηση PLC

Η τρέχουσα εργασία E&A ασχολείται με την εικονικοποίηση πλήρων ελεγκτών PLC και την εξωτερική ανάθεση τους στο νέφος. Μια επεκτάσιμη πλατφόρμα ελέγχου για κυβερνοφυσικά συστήματα σε βιομηχανικές παραγωγές ερευνήθηκε και υλοποιήθηκε από τους⁷. Στην εργασία των (Engel et al., 2015), παρουσιάστηκε ένας ελεγκτής που βασίζεται σε νέφος, ο οποίος χρησιμοποιεί επίσης ένα εικονικό σύστημα ελέγχου σε ένα νέφος υποδομής ως υπηρεσία (Infrastructure as a Service-IaaS). Η εργασία των (Schmitt et al., 2014) χρησιμοποίησε επίσης εικονικά στοιχεία ελέγχου PLC στο νέφος ενώ τα

⁶ Microsoft: Introducing DPWS. 2015.

⁷ ISW of the University Stuttgart: Industrial Cloud-Based Control Platform for the Production with Cyber-Physical Systems (piCASSO-in German)—BMBF-Verbundprojekt, Stuttgart. 2013

συνδέει με συσκευές αυτοματισμού που βασίζονται στο OPC UA χρησιμοποιώντας τεχνολογίες Ιστού.

Τα προβλήματα με την εικονικοποίηση των PLC προκύπτουν κυρίως από το γεγονός ότι τα ήδη διαθέσιμα PLC ειδικά για τον κατασκευαστή είναι εικονικοποιημένα. Αυτοί οι ελεγκτές, ωστόσο, είναι κλειστά συστήματα, τα οποία αρχικά δεν αναπτύχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις πτυχές των τεχνολογιών Ιστού. Προσαρμογές, τροποποιήσεις ή επεκτάσεις αυτών των ελεγκτών από τρίτα μέρη είναι σχεδόν ανέφικτες. Η λειτουργικότητα δεν μπορεί να επιλυθεί ως υπηρεσία και η ευελιξία της εικονικοποίησης παρουσιάζεται πολύ περιορισμένη.

Η μελέτη των (Cristani et al., 2018) πρότεινε μια μεθοδολογία για τη μετατροπή μιας μονάδας αυτοματισμού που διαχειρίζονται τα PLC σε μια μονάδα ελέγχου EFSM (extended finite state machine-EFSM/εκτεταμένη μηχανή πεπερασμένης κατάστασης) που οδηγείται από υπολογιστές με μία πλακέτα ή system-on-a-chip-SoC (σύστημα σε τσιπ). Η μονάδα ελέγχου EFSM μπορεί να χρησιμοποιεί συσκευές IoT, αλλά σε αυτήν τη λύση, η λειτουργικότητα (πρόγραμμα ελέγχου) δεν μπορεί να επιλυθεί ως υπηρεσία από το νέφος.

Συνοπτικά, μπορεί να εκτιμηθεί ότι υπάρχουν διαφορετικές λύσεις και προσπάθειες για τον εξοπλισμό των ελεγκτών PLC με πρόσθετες λειτουργίες προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ελεγκτές σε ένα δίκτυο IP τύπου Industry 4.0. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ήδη εν μέρει τεχνολογίες Ιστού, με συγκεκριμένο ή/και περιορισμένο τρόπο για τον κατασκευαστή, και ολοένα και περισσότερο γίνεται προσπάθεια να χρησιμοποιούνται η αρχή της υπηρεσίας και οι δομές νέφους ως νέο παράδειγμα για την υλοποίηση λειτουργιών ελέγχου. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν οι ακόλουθες ελλείψεις που οδηγούν σε αντίστοιχες ανάγκες για έρευνα:

- Παρόλο που χρησιμοποιούνται τεχνολογίες Ιστού, δεν χρησιμοποιείται ευέλικτη κατανομή της δομής και της λειτουργίας της λειτουργικότητας ελέγχου. Η ενθυλάκωση πληροφοριών των προγραμμάτων βιομηχανικού ελέγχου σε τοπικές ή εικονικές συσκευές (PLC) δεν τίθεται υπό αμφισβήτηση.

- Για τις υπηρεσίες έξυπνου ελέγχου που χρησιμοποιούν τεχνολογίες νέφους ως ουσιαστικό χαρακτηριστικό μιας μελλοντικής δικτυωμένης βιομηχανίας, λείπουν συστηματικές έρευνες, αρχιτεκτονικές, διεπαφές και λύσεις επίδειξης.
- Οι διαθέσιμες τυπικές τεχνολογίες από τον κόσμο των δικτύων IP για αύξηση της ευελιξίας και της αποτελεσματικότητας δεν χρησιμοποιούνται ή χρησιμοποιούνται ανεπαρκώς στο επίπεδο ελέγχου.

3.5.ΙοT-PLC για τη Βιομηχανία 4.0

Στην εποχή μας, ο όρος Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0) έχει κερδίσει αυξανόμενη προσοχή σε ότι αφορά θέματα της βιομηχανίας καθώς και της τεχνολογίας αυτοματισμού, επικοινωνιών και πληροφορικής. Το Industry 4.0 αναφέρεται στην ενσωμάτωση ενός συνόλου ψηφιακών τεχνολογιών σε ευφυή παραγωγή και προηγμένα συστήματα πληροφοριών, με στόχο την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου λειτουργικής αποτελεσματικότητας και παραγωγικότητας (Lu, 2017). Από άποψη συστημάτων και ελέγχου, αυτή η ολοκλήρωση δημιουργεί την έννοια των Βιομηχανικών ΚυβερνοΦυσικών Συστημάτων (Industrial Cyber-Physical Systems, ICPSs) (Colombo et al., 2017), τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως τα επόμενης γενιάς Συστήματα Βιομηχανικού Ελέγχου (Industrial Control Systems, ICS) και υπόσχονται να φέρουν επανάσταση σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εγκαταστάσεις επιτρέποντας την απόκτηση και την εξαιρετικά αποτελεσματική ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων (Núñez et al., 2019). Σύμφωνα με αυτό το παράδειγμα, το Industry 4.0 απαιτεί από τις μονάδες που εμπλέκονται στις παραγωγικές διαδικασίες να είναι πιο έξυπνες, μικρότερες και αρθρωτές ώστε να είναι συμβατές κάθε φορά με τις απαιτήσεις των εργασιών στις οποίες εμπλέκονται (Langarica et al., 2019).

Το Industry 4.0 επιβάλλει πολλές αρχές σχεδιασμού που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αυτοματοποίηση ή την ψηφιοποίηση των διαδικασιών παραγωγής (Gilchrist, 2016) και συγκεκριμένα:

- ενσωμάτωση, ιδιαίτερα των διαδικασιών παραγωγής στην αλυσίδα αξίας, επιτρέποντας στα έξυπνα εργοστάσια να εκτελούν από άκρο σε άκρο

διαχείριση ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής από την αλυσίδα εφοδιασμού έως τις υπηρεσίες και τη διαχείριση του κύκλου ζωής,

- διαλειτουργικότητα, η οποία αναφέρεται στην ικανότητα όλων των στοιχείων του συστήματος να συνδέονται, να επικοινωνούν και να αλληλεπιδρούν με διαφάνεια χρησιμοποιώντας τυποποιημένα μοντέλα επικοινωνιών και δεδομένων
- αποκέντρωση, η οποία επιτρέπει στα διάφορα υποσυστήματα να λαμβάνουν αυτόνομες τοπικές αποφάσεις με στόχο την επίτευξη ενός τελικού οργανωτικού στόχου.
- απόδοση σε πραγματικό χρόνο, η οποία απαιτεί οι διαδικασίες παραγωγής να συλλέγουν, να επικοινωνούν και να ενοποιούν δεδομένα με τους κατάλληλους ρυθμούς, ώστε οι στρατηγικές αποφάσεις να μπορούν να λαμβάνονται έγκαιρα, και
- αρθρωτή μορφή, η οποία διασφαλίζει ότι μεμονωμένα εξαρτήματα μπορούν να αντικατασταθούν, να επεκταθούν ή να βελτιωθούν με την ελάχιστη διαταραχή στις παραγωγικές διαδικασίες, επιτρέποντας έτσι στα έξυπνα εργοστάσια να προσαρμόζονται εύκολα σε μεταβαλλόμενα φυσικά περιβάλλοντα και απαιτήσεις παραγωγής.

Η μετάβαση από την τρέχουσα διευθέτηση μιας εγκατάστασης βιομηχανικής παραγωγής, που διέπεται από κλασικά ICS, σε μια διαμόρφωση σύμφωνη με το πρότυπο Industry 4.0 απαιτεί προοδευτικό μετασχηματισμό, που περιλαμβάνει προσαρμογή των συσκευών και των αρχιτεκτονικών που χρησιμοποιούνται στα ICS ώστε να ταιριάζουν στο πρότυπο ICPS, προκειμένου να επιτευχθεί τόσο κάθετη όσο και οριζόντια ενσωμάτωση συσκευών σε όλα τα επίπεδα (Bangemann et al., 2016).

Μεταξύ των συσκευών που πρέπει να υποστούν μετασχηματισμό είναι ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logical Controller, PLC). Το PLC είναι το βασικό δομικό στοιχείο των ICS καθ' όλη τη διάρκεια της επανάστασης του αυτοματισμού, όπου ο ρόλος του ήταν κυρίως να ελέγχει χαμηλού επιπέδου, κρίσιμους ως προς το χρόνο, βρόχους ανάδρασης που ρυθμίζουν τον έλεγχο, παρέχοντας ένα πρώτο επίπεδο ελέγχου για τις διαδικασίες. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές

είναι υλικό εμπορεύσιμο και διαθέσιμο για αγορά από πολλούς προμηθευτές, το PLC είναι το πρώτο στοιχείο που σχετίζεται άμεσα με την υποδομή ελέγχου (Galloway & Hancke, 2012).

Η γενική αρχιτεκτονική του PLC είναι αμετάβλητη για δεκαετίες (Goldschmidt et al., 2018), όπου το υλικό του ελεγκτή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τυπικό ενσωματωμένο σύστημα και το λογισμικό του ελεγκτή αποτελείται από ένα λειτουργικό σύστημα και τυποποιημένες στοίβες επικοινωνίας, πάνω από τις οποίες το λογισμικό συστήματος (firmware) του ελεγκτή δημιουργεί την συγκεκριμένη λειτουργικότητα για τον τομέα εφαρμογής του. Τα κύρια υποσυστήματα του firmware είναι η μηχανή εκτέλεσης για προγράμματα ελέγχου, η βάση δεδομένων για την αποθήκευση σχετικών δεδομένων χρόνου εκτέλεσης, ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης χειριστή και το σύστημα εισόδου/εξόδου. Για την επερχόμενη εποχή του Industry 4.0, αυτή η αρχιτεκτονική θα πρέπει να ενημερωθεί για να φιλοξενεί νέες τεχνολογίες όπως: ασύρματα όργανα, συστήματα διαχείρισης που βασίζονται σε υπολογιστικό νέφος (cloud) και αυτόνομα στοιχεία πεδίου, διατηρώντας παράλληλα μια αξιόπιστη και προβλέψιμη συμπεριφορά.

Η εκπλήρωση αυστηρών περιορισμών απόκρισης σε συγκεκριμένο χρόνο, που είναι τυπική απαίτηση στον τομέα των Επιχειρησιακών Τεχνολογιών (Operational Technologies, OT), είναι μια βασική λειτουργικότητα ενός PLC που θα πρέπει να διασφαλίζεται σε κάθε νέα εξέλιξη. Οι περιορισμοί χρονικής απόκρισης ποικίλλουν ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής, με τυπικούς χρόνους κύκλου που κυμαίνονται από μικροδευτερόλεπτα έως αρκετά δευτερόλεπτα. Επιπλέον, ένα Industry 4.0 PLC πρέπει επίσης να είναι διαλειτουργικό και έτοιμο να ενσωματωθεί με πλατφόρμες από τον τομέα των Τεχνολογιών Πληροφοριών (Information Technologies, IT) , όπου δεν υπάρχουν ισχυροί περιορισμοί χρονικής απόκρισης και οι ντετερμινιστικές επικοινωνίες δεν είναι κρίσιμες. Επομένως, ένα σύγχρονο PLC είναι εξ ορισμού ένα στοιχείο που διευκολύνει την ολοκλήρωση τεχνολογιών OT-IT, κάτι το οποίο είναι ένα δύσκολο πρόβλημα από μόνο του (Bangemann et al., 2016).

Για την επίλυση του προβλήματος ολοκλήρωσης μεταξύ των τομέων IT και OT, το παράδειγμα ομιχλώδους υπολογιστικής (fog computing) ικανοποιεί τις απαιτήσεις τους και εμφανίστηκε ως μια ελκυστική επιλογή για την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου,

αποθήκευσης και επικοινωνιών πιο κοντά στις συσκευές πεδίου. Χρησιμοποιώντας αυτό το παράδειγμα, οι χρόνοι απόκρισης και οι μη ντετερμινιστικές συμπεριφορές των επιπέδων IT μπορούν να μειωθούν, δεδομένου ότι μέρος των εργασιών που εκτελούνται στην περιοχή IT μετακινούνται πιο κοντά σε αισθητήρες και ενεργοποιητές (actuators) (Chiang & Zhang, 2016).

Υπάρχει συνεχής έρευνα για τον σύγχρονο σχεδιασμό και την κατασκευή πρωτοτύπων PLC, εστιάζοντας κυρίως στη βελτίωση των λειτουργιών. Μια αρχική προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζεται στην εργασία (Givehchi et al., 2014), η οποία προτείνει την έννοια του ελέγχου-ως-υπηρεσίας (control-as-a-service) χρησιμοποιώντας εικονικά PLC μέσα σε ένα περιβάλλον υπολογιστικού νέφους. Οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι το σχήμα είναι κατάλληλο για ήπιες εφαρμογές πραγματικού χρόνου, αλλά δεν δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τις δυνατότητες του εικονικού PLC.

Η ιδέα των εικονικοποιημένων (virtualized) PLC προωθείται περαιτέρω (Cruz et al., 2016), όπου μέσω της μόχλευσης της εικονικοποίησης και των προηγμένων τεχνολογιών επικοινωνίας, οι λειτουργίες PLC και οι φυσικές διεπαφές εισόδου/εξόδου αποσυνδέονται, αποδίδοντας μια εικονική μηχανή σε πραγματικό χρόνο που φιλοξενείται σε έναν hypervisor σε πραγματικό χρόνο, συνδεδεμένη με τις μονάδες εισόδου /εξόδου στο πεδίο χρησιμοποιώντας ένα μεταγωγικό ντετερμινιστικό σύστημα Ethernet. Ο hypervisor είναι ένα λογισμικό το οποίο δημιουργεί και εκτελεί εικονικές μηχανές (virtual machines, VMs). Το εννοιολογικό σχήμα εστιάζει σε εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλής χρονικής καθυστέρησης (latency) και δεν στοχεύει σε νέες λειτουργίες όπως ασύρματες διεπαφές και συνδεσιμότητα υψηλού επιπέδου.

Η εργασία των Ferrer et al. (2017) προτείνει μια πύλη που παίζει το ρόλο ενός PLC για τη σύνδεση συσκευών στο υπολογιστικό νέφος με βάση εικονικά στιγμιότυπα (virtual instances) και μηνύματα βασισμένα στο πρωτόκολλο MQTT (Message Queue Telemetry Transport). Το MQTT είναι ένα ανοιχτό, υπολογιστικά ελαφρύ, αμφίδρομο, δικτυακό πρωτόκολλο επικοινωνίας μηχανών το οποίο σχεδιάστηκε για περιπτώσεις περιορισμένων πόρων και χαμηλού εύρους ζώνης. Αν και σχετικά από την άποψη της μοντελοποίησης πληροφοριών, η συσκευή που παρουσιάζεται στην εργασία (Ferrer et

al., 2017) έχει σχεδιαστεί απλώς για τη σύνδεση συσκευών και αυτή είναι η συνεισφορά στη σχεδίαση νέων PLC.

Μια αρχιτεκτονική για συσκευές ελέγχου εισάγεται στην εργασία (Azarmipour et al., 2019, αναφέρεται ως PLC 4.0 και λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ εφαρμογών βιομηχανικού αυτοματισμού και των τεχνολογιών πληροφορικής και παρέχει μια εικονική πλατφόρμα για δοκιμές, η οποία εκτελείται παράλληλα με τη διαδικασία ελέγχου. Η προαναφερόμενη εργασία ασχολείται με μια νέα αρχιτεκτονική για PLC, η οποία εφαρμόζει τεχνολογίες container και λύσεις hypervisor για να εξασφαλίσει δυναμική ανάπτυξη και ασφαλή συνδεσιμότητα καθώς και διαχωρισμό κρίσιμων εφαρμογών, Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου (Real Time Operating Systems, RTOS) και επικοινωνία. Επιπλέον, παρέχει ένα επίπεδο αφαίρεσης που αυξάνει την ευελιξία του PLC και ενισχύει τις προδιαγραφές εγγυημένης Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) της επικοινωνίας. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επιτρέπει την αλλαγή της λογικής ελέγχου χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση.

Στην εργασία (Mellado & Núñez, 2022) προτείνεται η σχεδίαση του IoT-PLC, ενός PLC κατάλληλου για το Διαδίκτυο των πραγμάτων, το οποίο ενσωματώνει νέα στοιχεία σε σχέση με τις υπάρχουσες προσπάθειες, και συγκεκριμένα: (i) τη χρήση containers για τη διαχείριση ελεγχόμενων υπηρεσιών με αρθρωτό τρόπο με πόρους που έχουν εκχωρηθεί για την ιεράρχηση των λειτουργιών ελέγχου και την απομόνωση αστοχιών. (ii) αναδιαμόρφωση μπλοκ χωρίς διακοπή της διαδικασίας ελέγχου και συνεπώς να μην επηρεάζεται η απόδοση του βρόχου ελέγχου· και (iii) μετεγκατάσταση εργασιών ελέγχου σε μια δεύτερη συσκευή χωρίς διακοπή της λειτουργίας (on-the-fly), επιτρέποντας τη γρήγορη ανάπτυξη ενός βρόχου ελέγχου χωρίς να χρειάζεται η επανεκκίνηση των εργασιών που εκτελούνται. Η τεχνολογία container αφορά στην δημιουργία μιας ελαφριάς, εκτελέσιμης μονάδας λογισμικού που συσκευάζει κώδικα εφαρμογής και εξαρτήσεις όπως δυαδικό κώδικα, βιβλιοθήκες και αρχεία διαμόρφωσης για εύκολη ανάπτυξη σε διαφορετικά περιβάλλοντα υπολογιστών.

3.6. Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης για τον Εντοπισμό Σφαλμάτων σε Διαδικασίες PLC

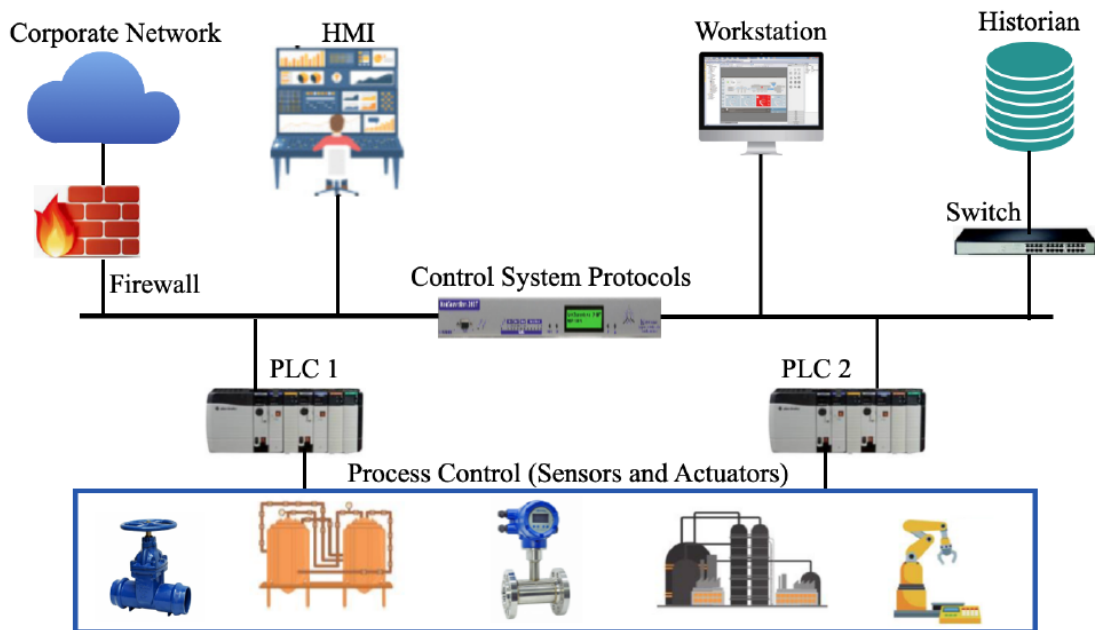
Στον 21ο αιώνα, η παγκόσμια επιστημονική και τεχνολογική καινοτομία έχει επιδείξει πρωτοφανή δραστηριότητα. Μεταξύ αυτών, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των πληροφοριών που χαρακτηρίζεται από μικροηλεκτρονική, οπτοηλεκτρονική, υπολογιστές, κινητές επικοινωνίες και το Διαδίκτυο οδήγησε στην παρακολούθηση πολλών τεχνολογιών υψηλής τεχνολογίας όπως η νέα τεχνολογία υλικών, η νέα ενεργειακή τεχνολογία, η βιοτεχνολογία, η διαστημική τεχνολογία και η θαλάσσια τεχνολογία και έχει διαμορφώσει μια πολύ γρήγορη δυναμική ανάπτυξης. Επιπλέον, ως πηγή ζωής της κοινωνικής οικονομίας, ο ηλεκτρισμός θα είναι ο πρώτος που θα διεισδύσει σε όλους τους προηγμένους τομείς της μεταποίησης.

Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (Programmable logic controller, PLC) είναι ένας νέος τύπος βιομηχανικού εξοπλισμού ελέγχου που αναπτύχθηκε βάσει ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και τεχνολογίας υπολογιστών. Έχει τα πλεονεκτήματα της ισχυρής ικανότητας ελέγχου, της υψηλής αξιοπιστίας, της ευέλικτης διαμόρφωσης, του μικρού μεγέθους, του μικρού βάρους και της ευκολίας στη χρήση. Επιπλέον, η τεχνολογία προγραμματιζόμενου ελεγκτή, η τεχνολογία αριθμητικού ελέγχου και η τεχνολογία βιομηχανικών ρομπότ έχουν γίνει οι τρεις πυλώνες στον τομέα του μηχανολογικού βιομηχανικού αυτοματισμού και της ολοκληρωμένης κατασκευής υπολογιστών. Με την ταχεία ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας, τεχνολογίας υπολογιστών, τεχνολογίας επικοινωνίας, τεχνολογίας ελέγχου και της τεχνολογίας ψηφιακού ελέγχου, ο αριθμός, το μοντέλο και η ποικιλία των προγραμματιζόμενων ελεγκτών έχουν αναπτυχθεί γρήγορα και οι λειτουργίες τους έχουν ξεπεράσει κατά πολύ το εύρος του λογικού ελέγχου και του ελέγχου ακολουθίας. Εν τω μεταξύ, μπορεί να συνδυαστεί αποτελεσματικά με έναν υπολογιστή για να εκτελέσει λειτουργίες αναλογικού ελέγχου και απομακρυσμένης επικοινωνίας. Επιπλέον, οι προγραμματιζόμενοι ελεγκτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο ταχύτητας, έλεγχο θέσης, έλεγχο θέσης άξονα, έλεγχο πίεσης, έλεγχο θερμοκρασίας, έλεγχο PID κ.λπ., και έχουν γίνει ο κυρίαρχος εξοπλισμός αυτοματισμού στον τομέα βιομηχανικού ελέγχου.

Η διάχυση της τεχνολογίας του Διαδικτύου των πραγμάτων και των δικτυωμένων αισθητήρων σε πολλά συστήματα βιομηχανικού ελέγχου (industrial control systems, ICS) έχουν εκθέσει κρίσιμης σημασίας υποδομές σε κακόβουλες δραστηριότητες και απειλές στον κυβερνοχώρο, οδηγώντας σε αύξηση των επιτυχημένων κυβερνοεπιθέσεων σε κρίσιμες υποδομές (Pléta et al., 2020). Οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (Programmable Logic Controllers, PLC) είναι ενσωματωμένες συσκευές που χρησιμεύουν ως κύρια στοιχεία σε ICS και είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του δικτύου των ICS. Τα PLC ελέγχουν τα βιομηχανικά συστήματα συλλέγοντας δεδομένα εισόδου από συσκευές πεδίου όπως αισθητήρες και στέλνοντας εντολές σε συσκευές ενεργοποίησης για εκτέλεση διεργασιών (Wardaket al., 2016). Τα ICS παρακολουθούν και ελέγχουν κρίσιμες υποδομές, όπως πυρηνικές εγκαταστάσεις, παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και διαχείριση νερού. Τα PLC είναι ευάλωτα σε επιθέσεις, παρόμοια με άλλες ενσωματωμένες συσκευές. Επειδή τα PLC χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο των φυσικών διεργασιών της υποδομής ζωτικής σημασίας, οι επιθέσεις κατά των PLC μπορούν να προκαλέσουν ανεπανόρθωτη ζημιά στις επιχειρήσεις και ακόμη και απώλεια ανθρώπινων ζωών (Abbasi, 2016).

Στο παρελθόν, τα PLC λειτουργούσαν ως απομονωμένα και ιδιόκτητα συστήματα χωρίς εξωτερική συνδεσιμότητα (Langmann & Stiller, 2019). Ως αποτέλεσμα, οι επιθέσεις PLC περιορίστηκαν σε εισβολή από το εσωτερικό δίκτυο, με χρήση εσωτερικών πληροφοριών, φυσική ζημιά και παραβίαση (Tsiknas et al., 2021). Τα PLC συνδέονται όλο και περισσότερο με το Διαδίκτυο και τα εταιρικά δίκτυα μέσω πρωτοκόλλου ελέγχου μετάδοσης/πρωτοκόλλου διαδικτύου (TCP/IP) και ασύρματης IP (Spyridopoulos et al., 2013). Είναι δύσκολο να εφαρμοστούν παραδοσιακές τεχνικές για την ανίχνευση ανώμαλης συμπεριφοράς των PLC λόγω της μοναδικής αρχιτεκτονικής και των ιδιόκτητων και ετερογενών λειτουργικών συστημάτων τους. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας η προστασία των PLC από οποιαδήποτε μορφή κυβερνοεπίθεση αλλά και ανωμαλίες λειτουργίας, όπως η δυσλειτουργία υλικού, οι τυχαίες ενέργειες από κατόχους πληροφοριών και κακόβουλους εισβολείς (Boeckl et al., 2019). Η Εικόνα 3 δείχνει ένα τυπικό ICS με διαμόρφωση διασυνδεδεμένου δικτύου. Η διεπαφή ανθρώπου μηχανής (human machine interface, HMI) παρέχει οπτική προβολή και εντολές ελέγχου

διαδικασίας. Τα PLC περιέχουν τη λογική ελέγχου που επιβλέπει τη διαδικασία ελέγχου. Τα αρχεία καταγραφής δεδομένων της διαδικασίας ελέγχου αποθηκεύονται στο ιστορικό. Αν και τόσο οι εποπτευόμενες όσο και οι μη εποπτευόμενες τεχνικές Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning, ML) έχουν εφαρμοστεί στην ανίχνευση ανωμαλιών PLC (Yau et al., 2017), είναι συνήθως δύσκολο να βασιστεί κανείς σε μια εποπτευόμενη προσέγγιση εκμάθησης καθώς τα ICS του πραγματικού κόσμου περιέχουν πολυάριθμα δεδομένα αισθητήρων. Επιπλέον, οι τεχνικές μηχανικής μάθησης χωρίς επίβλεψη για την ανίχνευση ανωμαλιών σε PLC και ICS δεν έχουν εξεταστεί ευρέως. Στην εργασία (Aboah Boateng & Bruce, 2022) διερευνώνται τεχνικές μηχανικής μάθησης και συγκεκριμένα οι Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης Μιας Κλάσης (One Class Support Vector Machines, OCSVM), τα Νευρωνικά Δίκτυα Μιας Κλάσης (One Class Neural Network, OCNN) που διασυνδέονται με τροφοδοσία προς τα εμπρός (feed-forward) καθώς και οι αλγόριθμοι Δάσους Απομόνωσης (Isolation Forest, IF) για την επαλήθευση της ακεραιότητας των διεργασιών του PLC. Πρόσφατη εργασία έχει προτείνει ότι οι Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης Μιας Κλάσης (OCSVM) είναι ακριβείς για τον εντοπισμό ανώμαλης συμπεριφοράς PLC και για τον εντοπισμό ανωμαλιών και σε άλλες εφαρμογές (Welborn, 2021). Η έρευνα (Ahmad et al., 2020) δείχνει ότι το μέλλον των βαθέων νευρωνικών δικτύων για έξυπνη λήψη αποφάσεων στο ICS είναι πολλά υποσχόμενο. Αυτό συμβαίνει επειδή οι αλγόριθμοι ανίχνευσης ανωμαλιών που βασίζονται σε βαθιά νευρωνικά δίκτυα χρησιμεύουν ως ένα εργαλείο προσέγγισης καθολικής συνάρτησης που βασίζεται σε δεδομένα.



Σχήμα 11. Τυπικό Σύστημα Βιομηχανικού Ελέγχου με διαμόρφωση διασύνδεσης δικτύου.

Οι Inoue et al. (2017) χρησιμοποίησαν αλγόριθμους ML χωρίς επίβλεψη για ανίχνευση ανωμαλιών σε συστήματα επεξεργασίας νερού. Συνέκριναν δύο μη εποπτευόμενες μεθόδους: ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο που αποτελείται από στρώματα τροφοδοσίας προς τα εμπρός με πολλαπλές εισόδους και εξόδους και μια μηχανή διανύσματος υποστήριξης μιας κλάσης (OCSVM). Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι το μοντέλο βαθύς νευρωνικού δικτύου παρήγαγε λιγότερα ψευδώς θετικά (false positive) αποτελέσματα από το OCSVM, αν και το OCSVM μπορούσε να ανιχνεύσει περισσότερες ανωμαλίες. Οι συγγραφείς αναφέρουν τιμές για τη μετρική ανάκληση (recall) μικρότερες από 0,7 τόσο για το βαθύ νευρωνικό δίκτυο όσο και για το OCSVM.

Οι Tomlin et al. (2016) πρότειναν μια προσέγγιση ομαδοποίησης για την εφαρμογή του συστήματος ανίχνευσης εισβολής στο δίκτυο στο ICS. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα τόνισαν τα ζητήματα που σχετίζονται με τη χρήση της ανάλυσης συστάδων ως μοναδικού εργαλείου για την ανίχνευση εισβολής βάσει ανωμαλιών. Αν και η προσέγγιση των Tomlin et al. (2016) φαίνεται πολλά υποσχόμενη, επικεντρώθηκε κυρίως σε προσομοιωμένα πειραματικά δεδομένα, τα οποία μερικές φορές αποτυγχάνουν να αναπαραστήσουν μια πραγματική διαμόρφωση ICS.

Οι Xiao et al. (2017) πρότειναν ένα μη επεμβατικό σύστημα ανίχνευσης ανωμαλιών βασισμένο στην κατανάλωση ισχύος για την ανίχνευση επιθέσεων σε PLC χρησιμοποιώντας μακροπρόθεσμη μνήμη. Η εργασία τους εντόπισε την εκτέλεση κακόβουλου λογισμικού σε ένα PLC αναλύοντας την κατανάλωση ενέργειας του PLC. Η μέθοδος πέτυχε ακρίβεια έως και 99%. Ωστόσο, η κατανάλωση ρεύματος PLC επηρεάζεται από την αστάθεια του τροφοδοτικού και τη δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών και μπορεί να παράγει ψευδώς θετικές τιμές.

Στη μελέτη των Muna et al. (2018), οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ένα πλήρως συνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο και έναν αυτόματο κωδικοποιητή (autoencoder) για να ανιχνεύσουν ανωμαλίες στην κίνηση του δικτύου. Τα αποτελέσματά έδειξαν υψηλότερο ποσοστό ανίχνευσης και χαμηλότερο ποσοστό ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με άλλες οκτώ σύγχρονες τεχνικές ανίχνευσης ανωμαλιών. Οι Potluri et al. (2017) χρησιμοποίησαν επίσης Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) για τον εντοπισμό επιθέσεων ψευδούς έγχυσης δεδομένων στο ICS. Η αναφορά ταξινόμησης που ελήφθη δείχνει μια πολλά υποσχόμενη ακρίβεια ανίχνευσης με Νευρωνικά Δίκτυα.

Στη μελέτη Elnour et al. (2020) προτάθηκε μια ημιοπτευόμενη προσέγγιση ανίχνευσης ανωμαλιών με βάση το δάσος διπλής απομόνωσης (dual isolation forest) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα κανονικής λειτουργίας διεργασίας της βάσης δεδομένων δοκιμής ασφαλούς επεξεργασίας νερού (secure water treatment, SWaT) και της βάσης δοκιμής διανομής νερού. Συνέκριναν την προσέγγισή τους με άλλες τεχνικές ανίχνευσης ανωμαλιών για το ICS όσον αφορά τις μετρικές της ακρίβειας (accuracy), της ανάκλησης (recall) και της βαθμολογίας F1 (F1 score). Πέτυχαν 7% βελτίωση στη βαθμολογία F1 και εντόπισαν 19 από τις 36 επιθέσεις SWaT.

Οι Ahmed et al. (2019) πρότειναν μια προσέγγιση μάθησης χωρίς επίβλεψη χρησιμοποιώντας το δάσος απομόνωσης για τον εντοπισμό κρυφής επίθεσης ακεραιότητας δεδομένων σε ένα δίκτυο επικοινωνίας έξυπνου δικτύου. Αν και πέτυχαν υψηλή μέση ακρίβεια 93%, η προσέγγισή τους επικεντρώθηκε σε προσομοιωμένα πειραματικά δεδομένα και μπορεί να μην αντιπροσωπεύει με ακρίβεια το ICS. Από τα προαναφερθέντα, μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι το δάσος απομόνωσης είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση μάθησης χωρίς επίβλεψη με υψηλή απόδοση στην ανίχνευση

ανωμαλιών. Ωστόσο, δεν υπάρχουν αρκετές εφαρμογές τεχνικών δασών απομόνωσης για ανίχνευση ανωμαλιών σε PLC και ICS.

Οι Liu et al. (2022) πρότειναν έναν ανιχνευτή ανωμαλιών με βάση την τεχνική του υποχώρου (subspace) και τη μέθοδο κβαντοποίησης για την χαρακτηριστική απόκλιση πλάτους-συχνότητας των ICS. Η προσέγγισή τους είναι πρακτική και μπορεί εύκολα να αναπτυχθεί σε πραγματικό ICS. Ωστόσο, η εργασία δεν αντιμετωπίζει την επίθεση εμπιστευτικότητας ICS. Τα αναφερόμενα αποτελέσματα δείχνουν αδυναμία ανίχνευσης ανωμαλιών σε ICS με επιθετικές διαταραχές και αστάθειες. Η εργασία τόπους υπογραμμίζει τις γενικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη μοντέλων ανίχνευσης ανωμαλιών σε ενσωματωμένες συσκευές περιορισμένων πόρων για προστασία ICS.

Η προστασία των PLC έχει ορισμένες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή τεχνικών ανίχνευσης ανωμαλιών (Gauthama Raman et al., 2019). Τα περισσότερα PLC παλαιού τύπου σε ICS έχουν ανεπαρκή τεκμηρίωση χαμηλού επιπέδου, καθιστώντας δύσκολη τη διεξαγωγή ερευνών σε περιπτώσεις κυβερνοεπιθέσεων ή ανώμαλων συμβάντων (Benkraouda et al., 2020). Επίσης σπουσιάζουν μηχανισμοί ασφαλείας και εργαλεία που να προορίζονται για τα PLC ώστε να εκτελούν ολοκληρωμένες έρευνες ασφαλείας (Wu & Nurse, 2015). Τέλος, η διαθεσιμότητα PLC σε περιβάλλον ICS είναι συχνά πρωταρχικής σημασίας. Επομένως, η διακοπή λειτουργίας ενός ICS που βασίζεται σε PLC για έρευνες ανίχνευσης ανωμαλιών είναι συχνά αδύνατη (Ahmed et al., 2019). Επομένως, απαιτούνται ισχυρές τεχνικές ανίχνευσης για την ανίχνευση ανωμαλιών σε πραγματικό χρόνο σε PLC και ICS.

Η τεχνική μηχανικής μάθησης χωρίς επίβλεψη OCSVM χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση ανωμαλιών σε PLC με επιτυχία (Yau et al., 2017). Το πείραμά προσομοίωσε ένα σύστημα ελέγχου φωτεινού σηματοδότη κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας ένα PLC. Κατέγραψαν σχετικές διευθύνσεις μνήμης PLC σε ένα αρχείο καταγραφής για καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τη λειτουργία του σηματοδότη. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κανονικοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου OCSVM. Η ακρίβεια εκπαίδευσης και δοκιμής ήταν 98% και 82%, αντίστοιχα. Ωστόσο, οι τιμές ανάκλησης (recall) OCSVM σε ορισμένες

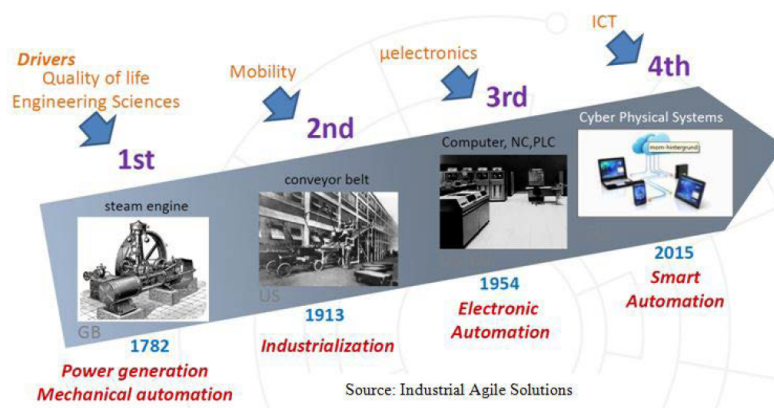
περιπτώσεις δοκιμών ήταν χαμηλές ως 75%, και η μέση ακρίβεια στις περιπτώσεις τριών δοκιμών τους ήταν 78%. Οι μετρήσεις χαμηλής απόδοσης της τεχνικής ανίχνευσης στην προαναφερόμενη εργασία απαιτούν την ανάγκη να διερευνηθούν ισχυρές τεχνικές ανίχνευσης για ανίχνευση ανωμαλιών σε PLC.

Ενώ το OCSVM έχει χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματική τεχνική χωρίς επίβλεψη για την ανίχνευση ανωμαλιών, η απόδοση του OCSVM δεν είναι ικανοποιητική σε πολύπλοκα σύνολα δεδομένων υψηλών διαστάσεων (Bengio & LeCun, 2007). Ένα νευρωνικό δίκτυο μιας κλάσης (OCNN) με μια αντικειμενική συνάρτηση μιας κλάσης χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση ανωμαλιών σε πολύπλοκα σύνολα δεδομένων (Chalapathy et al., 2018). Παρά τις μεγάλες δυνατότητές του σε σύνθετα σύνολα δεδομένων, το OCNN δεν έχει εφαρμοστεί σε ICS ή PLC για σκοπούς ανίχνευσης ανωμαλιών.

4. Χρήση Micro PLC με Απόδοση Κόστους και Ενέργειας στην Industry 4.0

Η διαδικασία κατασκευής ξεκίνησε με την εφεύρεση των ατμομηχανών και αναφέρεται ως «πρώτη βιομηχανική επανάσταση». Με την ανάπτυξη των μεταφορικών ταινιών και της τεχνικής κατασκευής απλής γραμμής ροής (Single Line Flow) ξεκίνησε η μαζική παραγωγή προϊόντων που σηματοδότησε τη 2η βιομηχανική επανάσταση. Η εφεύρεση των υπολογιστών και η χρήση τους στη βιομηχανία σηματοδότησε την τρίτη επανάσταση στη βιομηχανία. Στα τέλη του 20ου αιώνα η χρήση των υπολογιστών κατέκτησε όλους σχεδόν τους τομείς του εταιρικού κόσμου.

Μέσα στις τρεις πρώτες βιομηχανικές επαναστάσεις, οι άνθρωποι έγιναν μάρτυρες και δημιούργησαν μηχανικές, ηλεκτρικές και πληροφοριακές τεχνολογίες που στόχευαν στη βελτίωση της παραγωγικότητας των βιομηχανικών διαδικασιών. Η πρώτη βιομηχανική επανάσταση βελτίωσε την απόδοση μέσω της χρήσης υδροηλεκτρικής ενέργειας, της αυξημένης χρήσης ατμού και της ανάπτυξης εργαλειομηχανών. η δεύτερη βιομηχανική επανάσταση έφερε ηλεκτρική ενέργεια και μαζική παραγωγή (γραμμές συναρμολόγησης). η τρίτη βιομηχανική επανάσταση επιτάχυνε περαιτέρω την αυτοματοποίηση χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά και τεχνολογία πληροφοριών, και τώρα αναδύεται η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, η οποία καθοδηγείται από την τεχνολογία CPS για την ενοποίηση του πραγματικού κόσμου με την εποχή της πληροφορίας για μελλοντική βιομηχανική ανάπτυξη (Zhou et al., 2015).



Σχήμα 12. Στάδια βιομηχανικής επανάστασης.

Το Σχήμα 12 αποτυπώνει τα τέσσερα στάδια της βιομηχανικής επανάστασης. Η ιδέα της Industry 4.0 βασίζεται στην ενοποίηση τεχνολογιών πληροφοριών, επικοινωνιών και

βιομηχανικής τεχνολογίας και εξαρτάται κυρίως από την οικοδόμηση ενός κυβερνο-φυσικού συστήματος (Cyber-Physical System-CPS) για την υλοποίηση ενός ψηφιακού και ευφυούς εργοστασίου, προκειμένου να προωθηθεί η παραγωγή ώστε να καταστεί πιο ψηφιακή, με γνώμονα τις πληροφορίες, προσαρμοσμένη και πράσινη. Ο σκοπός της Industry 4.0 είναι να δημιουργήσει ένα εξαιρετικά ευέλικτο μοντέλο παραγωγής εξατομικευμένων και ψηφιακών προϊόντων και υπηρεσιών, με αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ανθρώπων, προϊόντων και συσκευών κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Το Industry 4.0 θα επηρεάσει όχι μόνο τη γερμανική βιομηχανία ή ακόμη και τη διεθνή βιομηχανική ανάπτυξη, αλλά θα γίνει η κινητήρια δύναμη (Wan et al., 2015) που θα αλλάξει τις παραδοσιακές μεθόδους της βιομηχανικής παραγωγής και θα καθοδηγήσει τη μελλοντική κατασκευή. Η ένωση ηλεκτρικών βιομηχανιών της Γερμανίας έχει προβλέψει ότι η Industry 4.0 θα αυξήσει τη βιομηχανική παραγωγικότητα κατά 30% (Zhou et al., 2015).

4.1.Υπάρχουσες Υποδομές

Το μεγαλύτερο μέρος της βιομηχανικής παραγωγής σήμερα χρησιμοποιεί αυτοματισμούς διαφόρων επιπέδων προκειμένου να αυξήσει την παραγωγικότητα και να επωφεληθεί από τη μαζική παραγωγή. Αυτοί οι αυτοματισμοί είναι περισσότερο ανεξάρτητοι πίνακες ελέγχου ή παρακολουθούνται κεντρικά με τη χρήση του SCADA. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του αυτοματισμού είναι ότι εξοικονομεί εργατικό δυναμικό. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων καθώς και για τη βελτίωση της ποιότητας, της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας.

Με τον όρο «αυτοματισμός ή αυτόματο έλεγχο» ορίζεται η χρήση διαφόρων συστημάτων ελέγχου για εξοπλισμό λειτουργίας όπως μηχανήματα, διεργασίες σε εργοστάσια, λέβητες και φούρνους θερμικής επεξεργασίας, μεταγωγή σε τηλεφωνικά δίκτυα, διεύθυνση και σταθεροποίηση πλοίων, αεροσκαφών και άλλες εφαρμογές με ελάχιστη ή μειωμένη ανθρώπινη παρέμβαση. Ορισμένες διαδικασίες έχουν αυτοματοποιηθεί πλήρως.

Παρόλο που ο αυτοματισμός έχει αλλάξει δραστικά τον τρόπο λειτουργίας των βιομηχανιών και τον μεγάλο αντίκτυπό τους στους ρυθμούς παραγωγής, υπάρχουν ωστόσο συγκεκριμένοι τομείς τους οποίους αυτή η τεχνολογία δεν μπορεί να

εξυπηρετήσει. Χαρακτηριστικά όπως η παρακολούθηση της βιομηχανίας σε πραγματικό χρόνο και η προσαρμοστικότητα του κατασκευαστικού εξοπλισμού με τη μεταβαλλόμενη ζήτηση δεν μπορούν να επιτευχθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία. Η ανθρωποκεντρική αλλά και η πελατοκεντρική παραγωγή είναι επίσης σημαντικά στοιχεία που πρέπει να επιτευχθούν.

Τον τελευταίο χρόνο υπήρξε ταχεία έρευνα και ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας, το όραμα της οποίας είναι η διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών μεταξύ τους και με τα εταιρικά συστήματα. Πρόκειται για το «Internet of Things-IoT» (διαδίκτυο των πραγμάτων). Το IoT είναι το δίκτυο φυσικών αντικειμένων-συσκευών, οχημάτων, κτιρίων και άλλων αντικειμένων που είναι ενσωματωμένα με ηλεκτρονικά, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα δικτύου, που επιτρέπουν σε αυτά τα αντικείμενα να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα (Zhou et al., 2015). Το Διαδίκτυο των πραγμάτων επιτρέπει την ανίχνευση και τον απομακρυσμένο έλεγχο των αντικειμένων μέσω της υπάρχουσας δικτυακής υποδομής (Pérez et al., 2015) δημιουργώντας ευκαιρίες για πιο άμεση ενσωμάτωση του φυσικού κόσμου σε συστήματα που βασίζονται σε υπολογιστές και καταλήγοντας σε βελτιωμένη απόδοση, ακρίβεια και οικονομικό όφελος.

Τα προϊόντα IoT είναι ήδη στην αγορά και μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν τις οικιακές συσκευές και το περιβάλλον του χρήστη εντελώς αυτόματα χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση. Επικοινωνούν μεταξύ τους και αναλύουν δεδομένα άλλων συγκεκριμένων χρηστών από διαφορετικές πηγές, μαθαίνοντας με τον τρόπο αυτό τις ανάγκες και τις προτιμήσεις τους. Τα IoT Things κάνουν τη δουλειά τους χωρίς τη γνώση του χρήστη. Οι εργασίες του χρήστη γίνονται πριν συνειδητοποιήσει ότι χρειάζεται να γίνουν. Το IT μπορεί να δείξει σε ποιο βαθμό έχει αναπτυχθεί αυτή η τεχνολογία μέχρι τώρα.

Με την εφαρμογή των εννοιών του IoT στη βιομηχανία άνοιξε ένας εντελώς νέος τομέας έρευνας. Όταν το IoT επαυξάνεται με αισθητήρες και ενεργοποιητές, η τεχνολογία γίνεται ένα παράδειγμα της γενικότερης κατηγορίας CyberPhysical Systems (CPS). Τα Cyber-Physical Production Systems (CPPS) αποτελεί την προηγμένη έκδοση συστημάτων παρακολούθησης παραγωγής που χρησιμοποιούν έννοιες IoT και CPS. Με

την αλλαγή σε CPPS, τα δεδομένα μπορούν εύκολα να συλλεχθούν και να αποθηκευτούν σε διακομιστές νέφους ικανούς να χρησιμοποιηθούν ανά πάσα στιγμή για υπολογισμούς και άλλες ανάγκες. Το CPPS είναι το καλύτερο παράδειγμα για τη συνεργατική χρήση των εννοιών IoT και CPS.

Διάφορες χώρες όπως η Γερμανία και οι ΗΠΑ έχουν ήδη αρχίσει να κατασκευάζουν τα πειραματικά μοντέλα ώστε να προσπαθήσουν να αποδείξουν τις έννοιες και τα χαρακτηριστικά του Industry 4.0. Είναι προφανές ότι δεν θα αργήσει πολύ το γεγονός ότι οι εταιρείες θα αρχίσουν να χρησιμοποιούν τα συστήματα Smart Manufacturing (έξυπνης κατασκευής) για την παραγωγή προϊόντων. Επομένως, πρέπει να αναπτυχθούν ορισμένες πρόσθετες λύσεις για να αποφευχθεί η απόλυτη απόδοση του υπάρχοντος συστήματος ή για να δοθεί η ευκαιρία στον βιομήχανο να γευτεί τη γεύση της έξυπνης κατασκευής χωρίς τεράστιες επενδύσεις.

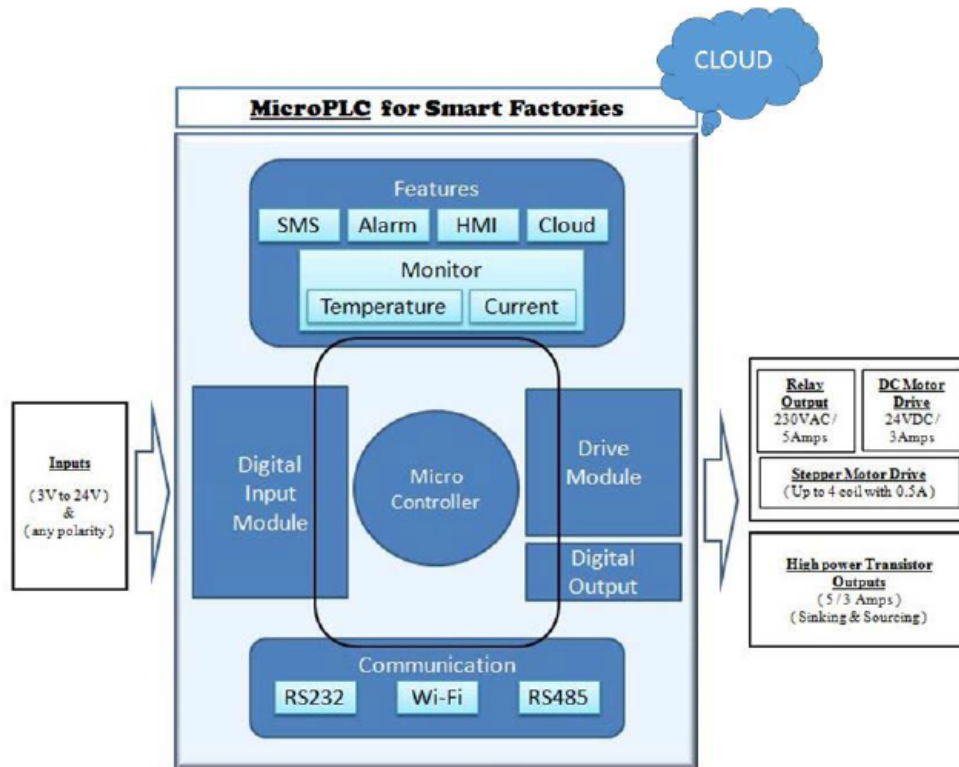
4.2.Η Περίπτωση του Micro PLC στον Αυτοματισμό

Το Industry 4.0 είναι βασικά η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της διαδικασίας διαχείρισης και των δραστηριοτήτων παραγωγής ή κατασκευής. Καθώς στο CPS θα χρησιμοποιηθούν συσκευές από πολλές διαφορετικές πηγές, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τη σωστή συμβατότητα μεταξύ των συσκευών. Πρόκειται για ένα τυπικό πρωτόκολλο για τις συσκευές CPS.

Επομένως, το προτεινόμενο προϊόν "Micro PLC" δεν είναι μια νέα ή καινοτόμος ιδέα, αλλά είναι το σκαλοπάτι στην προετοιμασία της υπάρχουσας εγκατάστασης για την εφαρμογή των έξυπνων ιδεών κατασκευής. Ο (Nigappa, 2016) περιέγραψε το προϊόν "MicroPLC" που έχει αναπτυχθεί για την επίτευξη των ακόλουθων στόχων:

- Να παρέχει έναν κόμβο CPS χαμηλού κόστους για αυτοματισμό.
- Να μπορεί να συνδέσει την υπάρχουσα εγκατάσταση με τον κόσμο του κυβερνοχώρου χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τα προτεινόμενα σενάρια σύνδεσης.
- Να είναι ένα ανεξάρτητο Κυβερνοφυσικό Σύστημα.
- Για την διευκόλυνση λειτουργιών όπως η ευκολία προγραμματισμού, ο απομακρυσμένος προγραμματισμός και η διαμόρφωση.

- Για διαφορετικές αναφορές με παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 13. Μπλοκ διάγραμμα του MicroPLC.

Το μπλοκ διάγραμμα του MicroPLC φαίνεται στο Σχήμα 13. Συνήθως πρόκειται για ένα PLC με πρόσθετες ενσωματωμένες μονάδες που απαιτούνται για την έξυπνη κατασκευή. Το "MicroPLC" μπορεί να γίνει κατανοητό σε δύο μέρη, το PLC (τμήμα αυτοματισμού) και το τμήμα Cyber-Physical.

Το μπλοκ διάγραμμα δείχνει τις συσκευές εισόδου (αισθητήρας, διακόπτες κ.λπ.) τις συσκευές εξόδου (ρελέ, κινητήρας κ.λπ.) και το ίδιο το Micro-PLC. Οι συσκευές εισόδου και εξόδου συνδέονται στο Micro-PLC για να σχηματίσουν ένα σύστημα αυτοματισμού. Το Micro-PLC περιλαμβάνει επίσης ορισμένες ενσωματωμένες λειτουργίες όπως το SMS, το Alarm, το HMI και το νέφος ενώ διευκολύνει δημοφιλείς επικοινωνίες όπως το RS232 και το RS485. Τα μπλοκ εξηγούνται παρακάτω:

- **Μονάδα ψηφιακής εισόδου:** Αυτή η μονάδα χρησιμοποιείται για να ξεπεραστεί η διαφορά στα επίπεδα τάσης. Τα επίπεδα βιομηχανικής τάσης είναι 12V DC ή 24V DC. Η μονάδα εισόδου είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί

να δέχεται και τα δύο επίπεδα τάσεων χωρίς καμία αλλαγή στο κύκλωμα. Αυτό μπορεί να λειτουργήσει με PNP καθώς και με εισόδους NPN χωρίς καμία αλλαγή στις διαμορφώσεις. Οι οπτικοί απομονωτές περιλαμβάνονται στη σχεδίαση έτσι ώστε ο MicroController να διατηρείται ασφαλής από τα σφάλματα που συνέβησαν στην πλευρά εισόδου.

- **Μονάδα ψηφιακής εξόδου:** Αυτή η μονάδα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των συσκευών εξόδου όπως ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος, ο βηματικός κινητήρας, η συσκευή AC και άλλα στοιχεία συνεχούς ρεύματος όπως τα πηνία ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας. Οι έξοδοι ομαδοποιούνται σε έλεγχο μετάδοσης κίνησης και σε ψηφιακή έξοδο. Η μονάδα ελέγχου μετάδοσης κίνησης φροντίζει για τον έλεγχο των κινητήρων και των συσκευών υψηλής βαθμολογίας. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μπορούν να συνδεθούν απευθείας στη μονάδα. Υποστηρίζει μεγάλη γκάμα χαρακτηριστικών κινητήρων καθώς χρησιμοποιείται H-Bridge με βάση ρελέ. Η μονάδα ψηφιακής εξόδου παρέχει ψηφιακή έξοδο DC με χωρητικότητα 3/5A.
- **Χαρακτηριστικά:** Στο Micro-PLC προστίθενται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που το κάνουν να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα PLC. Όλα τα σφάλματα και οι συναγερμοί μπορούν να μεταφερθούν με ασφάλεια με το βομβητή, καθώς και ανεξάρτητα εξατομικευμένα SMS. Μια διεπαφή HMI - Human machine Interface θα είναι ενσωματωμένη με το Micro-PLC που θα επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση και την παρακολούθηση της λειτουργίας του PLC. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα Έξυπνα εργοστάσια, θα πρέπει στη μονάδα να προστεθούν δυνατότητες σύνδεσης cloud. Επιπλέον θα διαθέτει μια εγκατάσταση παρακολούθησης της υγείας που θα παρακολουθεί τις ζωτικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία και το ρεύμα και επίσης θα εντοπίζει έξυπνα τις βλάβες της συσκευής και θα ενημερώνει την ομάδα συντήρησης, βοηθώντας έτσι στη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας.
- **Επικοινωνία:** Για να υπάρχει επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή παρέχεται βιομηχανικό πρότυπο πρωτόκολλο επικοινωνίας RS485. Για διαμορφώσεις και ρυθμίσεις περιλαμβάνεται επίσης το RS232. Το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας

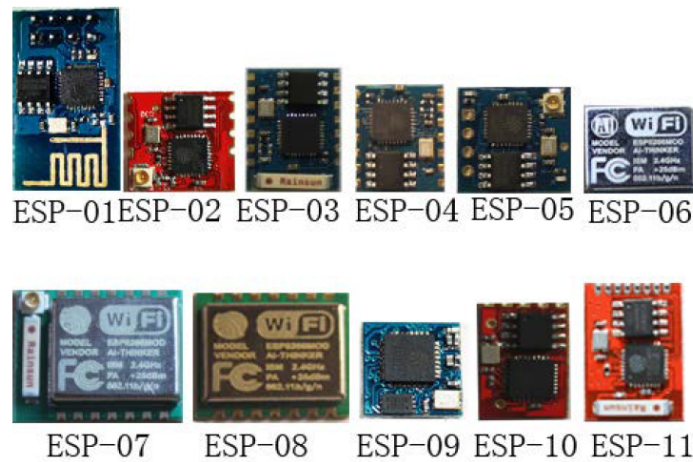
που ενσωματώνεται είναι η μονάδα Wi-Fi. Αυτό απαιτείται για την υλοποίηση των έξυπνων εργοστασίων που χρησιμοποιούν το Industrial Internet.

- **Μικροελεγκτής:** Ο εγκέφαλος του Micro-PLC είναι ο μικροελεγκτής ο οποίος ελέγχει όλα τα I/Os και είναι εκεί όπου βρίσκεται η ακολουθία και η λογική του αυτοματισμού. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται στο έργο είναι οι ARM με βάση το CORTEX M0 της Nuvoton. Χρησιμοποιείται η πλακέτα εκμάθησης NU_LB_NUC140 που ενσωματώνει μικροελεγκτή NUC140VE3AN.
- **Προγραμματισμός του PLC:** Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC) μπορεί να προγραμματιστεί χρησιμοποιώντας 5 γλώσσες. Είναι διάγραμμα κλίμακας, δομημένο κείμενο, διάγραμμα διαδοχικής ροής, λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα και λίστα οδηγιών ή λίστα καταστάσεων. Το διάγραμμα κλίμακας αποτελεί την πιο δημοφιλή και ευρέως προτιμώμενη γλώσσα για προγραμματισμό PLC. Ο προγραμματισμός λίστας εντολών είναι μια γλώσσα βασισμένη σε κείμενο, που χρησιμοποιείται για την περιγραφή προγραμμάτων PLC και είναι μία από τις πέντε μεθόδους που καθορίζονται από το διεθνές πρότυπο IEC 6113. Η λίστα εντολών θεωρείται μερικές φορές ότι είναι μια «γλώσσα χαμηλού επιπέδου», ή για μεγαλύτερη ακρίβεια «ελαφρώς χαμηλότερου επιπέδου» (από μια γραφική μέθοδο). Το διάγραμμα της κλίμακας και η λίστα οδηγιών πάνε μαζί. Μπορεί εύκολα να μεταβεί κανείς από το ένα στο άλλο. Επίσης, η λίστα εντολών που βασίζεται σε κείμενο κωδικοποίησης μπορεί να είναι πιο βολική

4.3. Το MicroPLC ως Σύνδεσμος CPS

Αυτό το προϊόν μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μαζί με το άλλο στοιχείο ελέγχου. Μπορεί να επικοινωνήσει με το υπάρχον σύστημα χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας RS232 ή RS48. Σε αυτήν τη διαμόρφωση, το MicroPLC λειτουργεί απλώς ως σύνδεσμος για τη σύνδεση του συστήματος στον κυβερνοχώρο (έναν διακομιστή) μέσω του Wi-Fi. Το ESP8266 είναι μια πολύ φθηνή μονάδα Wi-Fi. Αποτελείται από την πλήρη έκδοση της στοίβας TCP/IP και υπάρχει επίσης ένας μικροελεγκτής. Η μονάδα μπορεί ακόμη και να επαναπρογραμματιστεί ώστε να λειτουργεί ως αυτόνομη συνδεδεμένη συσκευή Wi-Fi απλώς με προσθήκη ισχύος.

Η λίστα χαρακτηριστικών αυτής της ενότητας περιλαμβάνει πρωτόκολλο 802.11 b/g/n Wi-Fi Direct (P2P), softAP και ενσωματωμένη στοίβα πρωτοκόλλου TCP/ IP. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λειτουργία σταθμού που μπορεί να συνδεθεί σε ήδη υπάρχον δίκτυο και να μεταφέρει δεδομένα. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λειτουργία Access για να λειτουργεί σαν διακομιστής, ώστε άλλες συσκευές να μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν. Όλα τα διαθέσιμα πακέτα φαίνονται στο **Σχήμα 11**. Το ESP8266-01 χρησιμοποιείται στο προτεινόμενο προϊόν.



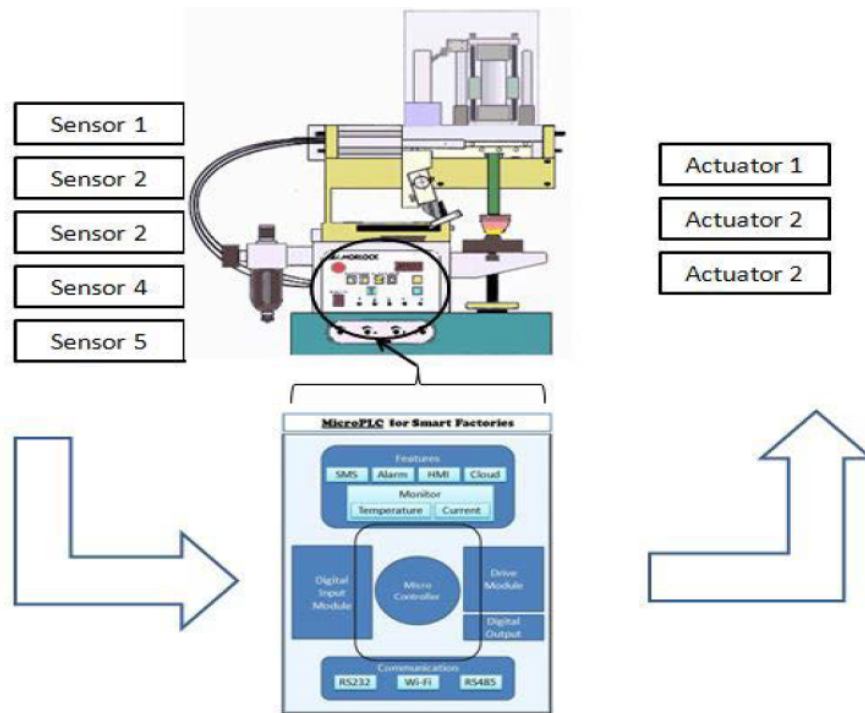
Σχήμα 14. Οικογένεια μονάδων Wi-Fi ESP 8266.

Με αυτόν τον τρόπο τα ήδη διαθέσιμα συστήματα μπορούν να συνδεθούν για να δημιουργήσουν ένα έξυπνο εργοστάσιο παραγωγής. Το MicroPLC χρησιμοποιείται ως ανεξάρτητος ελεγκτής αυτοματισμού.

Σε αυτό το σενάριο η ακολουθία λειτουργίας του μηχανήματος ελέγχεται από το Micro-PLC (όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί). Έτσι, ολόκληρη η βάση του αισθητήρα στο μηχάνημα συνδέεται στο MicroPLC. Το Th Micro-PLC θα λάβει είσοδο και, στη συνέχεια, με βάση τη σειρά που έχει προγραμματιστεί, οδηγεί τους ενεργοποιητές που αυτοματοποιούν το μηχάνημα. Η σύνδεση cloud μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση της παραμέτρου ή για την παρακολούθηση της ρύθμισης. Μπορεί επίσης να προγραμματιστεί εξ αποστάσεως χρησιμοποιώντας το δίκτυο Wi-Fi.

Το MicroPLC μπορεί επίσης να λειτουργεί απλώς ως ένα Cyber Physical System (CPS) (**Σχήμα 6**) που συνδέει το μηχάνημα με το εικονικό εργοστάσιο ή το cloud. Πρέπει στο

σημείο αυτό να σημειωθεί ότι το μηχάνημα δεν ελέγχεται από το Micro-PLC. Υπάρχει μόνο μια σύνδεση επικοινωνίας με τον άλλο ελεγκτή που αυτοματοποιεί το μηχάνημα.

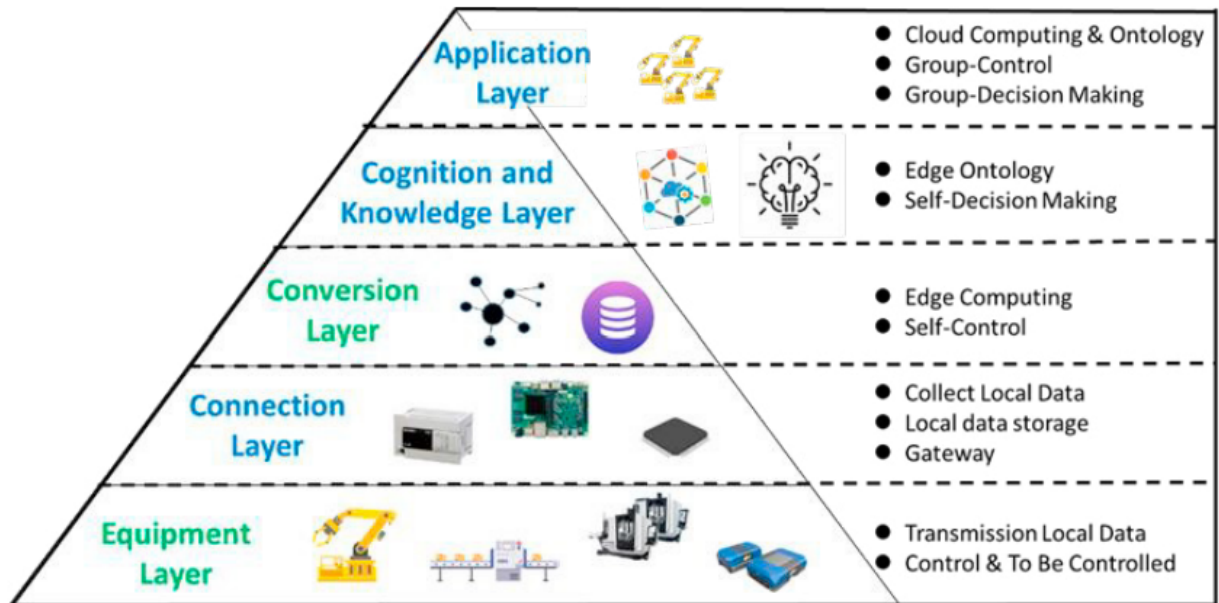


Σχήμα 15. Ανεξάρτητος ελεγκτής αυτοματισμού.

5. Εφαρμογή του Smart Control Box

5.1. Εννοιολογικό Πλαίσιο Εφαρμογής Smart Control Box

Ο Lee et al. (2015) παρουσιάζουν μια δομή CPS 5 επιπέδων, δηλαδή την αρχιτεκτονική 5C, που περιλαμβάνει τη σύνδεση, τη μετατροπή, τον κυβερνοχώρο, τη γνώση και τη διαμόρφωση (Lee et al., 2015). Ορίζουν τη δομή και τη μεθοδολογία του CPS ως κατευθυντήριες γραμμές για την εφαρμογή του στη βιομηχανία. Σε αντίθεση με τη δουλειά τους, σχεδιάζουν μια αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων που περιλαμβάνει το επίπεδο εξοπλισμού, το επίπεδο σύνδεσης, το επίπεδο μετατροπής, το επίπεδο γνώσης και γνώσης και το επίπεδο εφαρμογής (Εικ. 1). Η ιδέα είναι να εμφανιστεί η φυσική θέση του SCB στο επίπεδο σύνδεσης.



Σχήμα 16. Η έννοια της αρχιτεκτονικής 5 επιπέδων στην έξυπνη κατασκευή

5.1.1. Επίπεδο Εξοπλισμού

Η έξυπνη συσκευή που μπορεί να αντιμετωπιστεί με πρωτόκολλο επικοινωνίας μπορεί να είναι μέρος του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) (Murar & Brad, 2014). Ο εξοπλισμός θα μπορούσε να έχει δυνατότητα επικοινωνίας ώστε να συνδεθεί με άλλους μέσω προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή ή μονάδας μικροελέγχου. Σε αυτό το

επίπεδο, εάν υπάρχουν μη φυσιολογικά δεδομένα ή σήμα, ο εξοπλισμός θα μπορούσε να καθοδηγηθεί αμέσως από εντολές από το επίπεδο μετατροπής.

5.1.2. Επίπεδο Σύνδεσης

Το επίπεδο σύνδεσης συλλέγει και αποθηκεύει τα τοπικά δεδομένα. Λόγω των διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας που εφαρμόζονται από τις συσκευές στο επίπεδο εξοπλισμού, το επίπεδο σύνδεσης πρέπει να ενοποιεί τα πρότυπα επικοινωνίας. Ο modularization (σχεδιασμός κατά ενότητες/σπονδυλοποίηση) καθορίζεται στο επίπεδο σύνδεσης για την επίλυση του προβλήματος των διαφορετικών πρωτοκόλλων.

5.1.3. Επίπεδο Μετατροπής

Ο αριθμός των αισθητηριακών συσκευών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αυξάνεται ραγδαία και το απαιτούμενο εύρος ζώνης αυξάνεται, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καθυστέρησης και της ταχύτητας του δικτύου (Sahlmann & Schwotzer, 2018). Στο επίπεδο μετατροπής, εφαρμόζουμε ανάλυση δεδομένων στην άκρη για να λύσουμε τα παραπάνω προβλήματα. Η έννοια σε αυτό το επίπεδο είναι ότι τα δεδομένα μπορούν να υπολογιστούν και να αναλυθούν στην άκρη. Εάν υπάρχουν μη φυσιολογικά δεδομένα ή ακανόνιστα αποτελέσματα ανάλυσης, θα ελέγξει ή θα προσαρμοστεί από μόνο του.

5.1.4. Επίπεδο Γνωστικής Λειτουργίας και Γνώσης

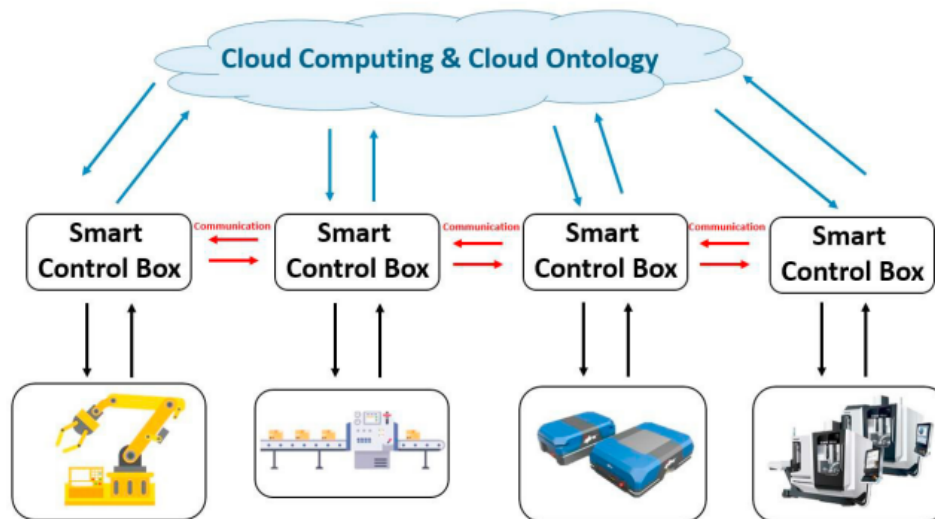
Όταν μια μηχανή είναι εξοπλισμένη με βάση δεδομένων και βάση γνώσεων, αναπτύσσεται γνωστικό και γνωσιακό μοντέλο. Όταν εμφανιστούν μη φυσιολογικά δεδομένα, το σύστημα θα ξέρει αμέσως πώς να αντιδράσει. Μπορεί να παρακολουθεί και να ελέγχει το μηχάνημα από μόνη της και να αποφασίζει για το τι πρέπει να κάνει στη συνέχεια το μηχάνημα.

5.1.5. Επίπεδο Εφαρμογής

Στο επίπεδο εφαρμογής, σχηματίζεται η οντολογία μηχανών (Monostori et al., 2016). Με τη γνώση της οντολογίας, τα συστήματα παραγωγής μπορούν να συντονίσουν και να συγχρονίσουν έξυπνα τους πόρους και να προσαρμοστούν.

5.2.Ανάπτυξη Smart Control Box

Για να εφαρμοστεί το επίπεδο σύνδεσης μέχρι το επίπεδο εφαρμογής, χρειάζονται πολύ περισσότερες συσκευές και μέθοδοι. Είναι δύσκολο να συνδυαστούν μαζί, λόγω των διαφόρων πρωτοκόλλων/προτύπων επικοινωνίας. Ένα Έξυπνο Κιβώτιο Ελέγχου (SCB) έχει οριστεί για τη σύνδεση όλων των επιπέδων. Σε αυτήν την έρευνα, υποθέτουμε ότι κάθε μηχανή έχει ένα SCB (Εικ.2)



Σχήμα 17. Αρχιτεκτονική Εξοπλισμού με Smart Box

Τα έξυπνα κουτιά ελέγχου μπορούν να σχηματίσουν ένα περιβάλλον υπολογιστικής αιχμής παραγωγής σε ένα έξυπνο εργοστάσιο. Οι λειτουργίες της κατασκευής υπολογιστών αιχμής περιλαμβάνουν:

(1) Κάθε μεμονωμένο SCB

- Τοπική αποθήκευση δεδομένων
- Τοπική γρήγορη λήψη αποφάσεων από τη βάση γνώσεων

(2) Συλλογικά SCB (χρειάζονται υπολογιστική ισχύ από τον υπολογιστή μιας πλακέτας και υψηλότερα επίπεδα)

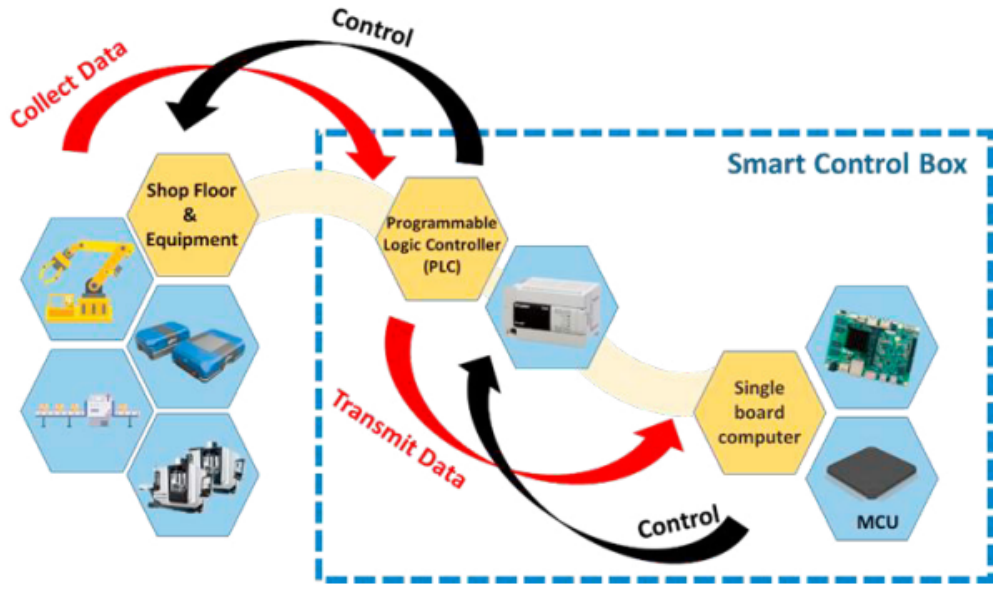
- Αναλύσεις δεδομένων
- Συντήρηση γνωσιακής βάσης

(3) Διεπαφές

- PLC στο στρώμα εξοπλισμού
- Επικοινωνία με άλλο εξοπλισμό
- Μετάδοση απαραίτητων δεδομένων στην ομίχλη ή στο σύννεφο

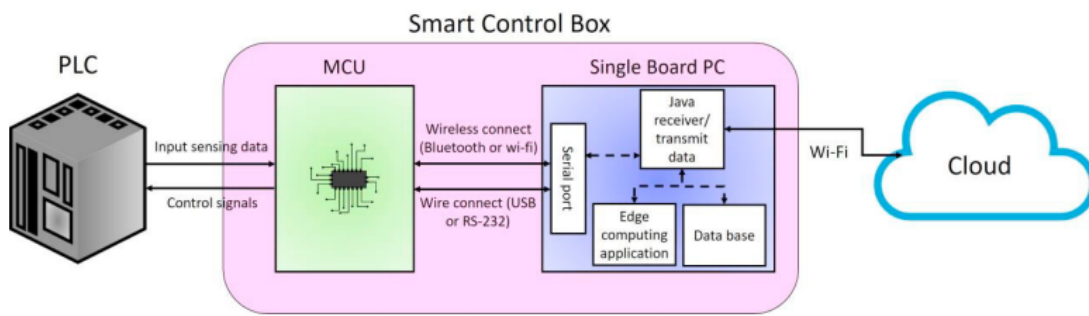
Το SCB μπορεί να παίζει το ρόλο του αντιπροσώπου για να ενσωματώσει τις απαραίτητες γνώσεις και να συνεργαστεί με άλλα SCB/αντιπροσώπους (Leitão, 2009). Αυτή η έρευνα αποσκοπεί στο να δημιουργήσει μια βάση SCB για να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της Βιομηχανίας 3.0 και της Βιομηχανίας 4.0. Επειδή τα PLC (όπως οι εκπρόσωποι της Βιομηχανίας 3.0) εξακολουθούν να κυριαρχούν στον χώρο του καταστήματος παραγωγής, συνδέοντας το IoT με MCU (Μονάδα Μικρο Ελέγχου) στο PLC και εγκαθιστώντας τη νοημοσύνη στον υπολογιστή μιας πλακέτας (Εικ. 3), μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια έξυπνη κατασκευή χωρίς να αλλάξουμε τις παραγωγικές εργασίες επί τόπου. Ωστόσο, η SCB μπορεί να παρέχει περαιτέρω καθοδήγηση και συμβουλές, επειδή τα δεδομένα που συλλέγονται από το επίπεδο εξοπλισμού μαθαίνονται στο επίπεδο γνωστικής λειτουργίας και γνώσης για να βοηθήσουν τις λειτουργίες στο επίπεδο εξοπλισμού, π.χ., προληπτική συντήρηση. Επιπλέον, το επίπεδο εφαρμογής μπορεί να επιβλέπει τον έλεγχο των λειτουργιών στο επίπεδο εξοπλισμού όταν το MCU παίρνει τη θέση του PLC.

Ένα SCB αποτελείται από έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή και έναν υπολογιστή μονής πλακέτας που έχει μέσα τη μονάδα Micro Control (Μικρο Ελέγχου) και βασίζεται σε αρχιτεκτονική 5 επιπέδων στην έξυπνη κατασκευή (Εικ. 3). Η κύρια συσκευή στο SCB είναι η εξής:



Σχήμα 18. Αρχιτεκτονική του Έξυπνου Κιβωτίου Ελέγχου

Η λεπτομερής αρχιτεκτονική του Έξυπνου Κιβωτίου Ελέγχου (SCB) φαίνεται στην Εικόνα 4. Ένα SCB αποτελείται από ένα MCU και έναν υπολογιστή με μία πλακέτα. Τα σήματα εισόδου του PLC γίνονται αισθητά από το MCU. Στη συνέχεια, τα σήματα μεταδίδονται στον υπολογιστή μίας πλακέτας για υπολογισμό άκρων και αποθήκευση δεδομένων μέσω ασύρματης/ενσύρματης επικοινωνίας. Μετά την ανάλυση ακμών, η εντολή απόφασης αποκρίνεται στο PLC μέσω του MCU.



Σχήμα 19. Λεπτομερής αρχιτεκτονική του Έξυπνου Κιβωτίου Ελέγχου

5.2.1. Ο Ρόλος του PLC στο Smart Control Box

Ο PLC έχει τα πλεονεκτήματα της εύκολης χρήσης, της ευελιξίας σχεδιασμού, της ισχυρής ευστροφίας, της υψηλής αξιοπιστίας, του απλού προγραμματισμού κ.λπ. Έχει εφαρμοστεί ευρέως σε διαφορετικά συστήματα ελέγχου και παίζει ζωτικό ρόλο στο σύστημα ελέγχου αυτοματισμού. Η ιδέα αυτής της έρευνας είναι να βασιστούν οι λειτουργίες του PLC στο σύστημα. Η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων του PLC για το I/O (*input/output είσοδος/έξοδος*) με τον εξοπλισμό και η συμπερίληψή του σε ένα SCB θα φέρει το πλεονέκτημα της μη αλλαγής του ελέγχου ρεύματος. Ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργήσει σύμφωνα με τα προγράμματα και τη λογική ελέγχου στο PLC. Ταυτόχρονα, δεδομένα εισόδου/εξόδου PLC μεταδίδονται επίσης στο MCU που είναι με τον υπολογιστή μιας πλακέτας. Ο υπολογιστής μονής πλακέτας μπορεί να φτιάξει υπολογιστές αιχμής και να μετατρέψει πληροφορίες σε βάση δεδομένων ή σε γνώση βάσει του ορισμού στα υψηλότερα επίπεδα. Εάν έχει κάποια μη φυσιολογικά δεδομένα και ακανόνιστα αποτελέσματα, θα επιστρέψει τα σήματα πίσω στο PLC και το PLC μπορεί να ελέγξει τις συσκευές.

5.2.2. Μονάδα Μικροελέγχου (MCU)

Η μονάδα μικροελέγχου βρίσκεται στον υπολογιστή μιας πλακέτας και αποτελείται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), τη μνήμη και την περιφερειακή λειτουργία που μπορεί να συνδεθεί με τη συσκευή. Η MCU μπορεί ταυτόχρονα να λαμβάνει τα σήματα δεδομένων από το PLC και τα προγράμματα που είναι γραμμένα στη MCU είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό ακμών, μπορεί να ελέγχει την περιφερειακή συσκευή μέσω των καναλιών εξόδου του PLC. Το Arduino και το LinkIt της Mediatek (MediaTek, 2022) είναι τυπικά MCU.

5.2.3. Υπολογιστής Μονής Πλακέτας

Αυτός ο υπολογιστής μονής πλακέτας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μικρός υπολογιστής δίπλα στον εξοπλισμό και μπορεί να έχει MCU μέσα στα οποία μπορούν να λαμβάνουν τα δεδομένα από τη συσκευή. Το UDOO X86 είναι ένα τυπικό παράδειγμα υπολογιστών μιας πλακέτας (UDOO, 2019). Σύμφωνα με τα δεδομένα, μπορεί να κάνει τον υπολογισμό αιχμής και τη συλλογιστική γνώσης οντολογίας στον πίνακα. Εάν εντοπιστούν ακανόνιστα αποτελέσματα, επιστρέφει ένα μήνυμα στο MCU για έλεγχο της συσκευής. Ο σκοπός του υπολογισμού στην άκρη είναι να αποφευχθεί η καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων με τη βάση δεδομένων cloud και να μειωθεί η ανάγκη για υπολογιστικό νέφος. Η αποθήκευση δεδομένων και η ασφάλεια των δεδομένων είναι εγγυημένα με τη χρήση του υπολογιστή μιας πλακέτας ως υπολογιστών άκρων.

5.2.4. Εφαρμογή Smart Control Box

Αρχικά, τα σήματα εισόδου του PLC θα πρέπει να γίνονται αισθητά από το MCU. Τα σήματα εισόδου του PLC συνήθως λειτουργούν σε ψηφιακά σήματα που είναι 0V (LOW/ Χαμηλά) και 24V (HIGH/ Υψηλά). Η μονάδα ψηφιακής εισόδου του MCU μπορούσε να ανιχνεύσει την υψηλή και χαμηλή τάση. Ωστόσο, η τάση λειτουργίας του MCU είναι 3,3V~5V και το MCU θα μπορούσε να καταστραφεί από τα σήματα HIGH του PLC. Για να ταιριάζει με την τάση λειτουργίας MCU, εφαρμόζεται ένα κύκλωμα πτώσης στο SCB μεταξύ PLC και MCU, όπως φαίνεται στο Σχ. 5. Στη συνέχεια, τα δεδομένα από τον αισθητήρα δεν μεταδίδονται μόνο στο PLC αλλά και στο MCU. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μεταδίδονται στη σειριακή θύρα ενός υπολογιστή μονής πλακέτας μέσω μονάδας Bluetooth. Μέσω προγραμματισμού Java, τα δεδομένα θα μπορούν να ληφθούν από τη σειριακή θύρα και να εφαρμοστούν για την ανάλυση ακμών.

Μετά την ανάλυση, η εντολή απόφασης θα σταλεί στο MCU, στη διαδρομή όπως η μεταφορά δεδομένων ανίχνευσης. Υπάρχουν τρεις καταστάσεις εντολής απόφασης για μηχανές:

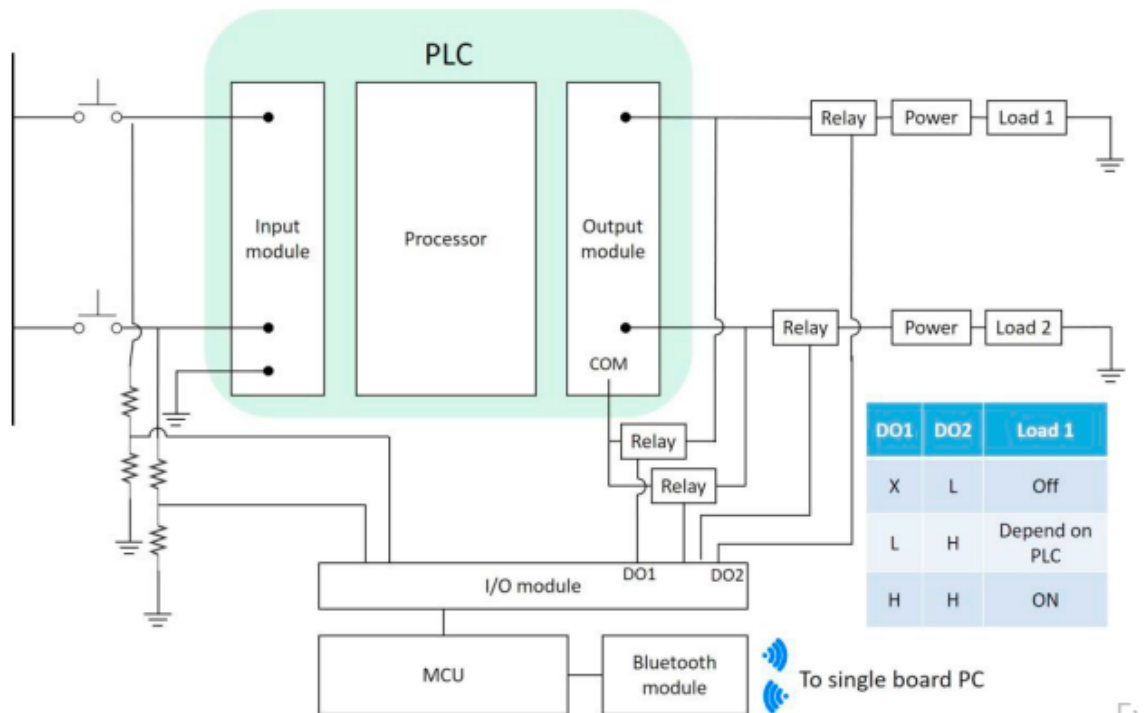
(i) υποχρεωτική ενεργοποίηση, (ii) υποχρεωτική απενεργοποίηση και (iii) καμία απόφαση.

Σύμφωνα με τις τρεις καταστάσεις, η διάταξη του ηλεκτρικού κυκλώματος φαίνεται στην Εικόνα 5. Στην Εικόνα 5, το MCU θα μπορούσε να ελέγξει ένα ρελέ με εξόδους σήματος HIGH και LOW. Τα σήματα ΥΨΗΛΟ/ΧΑΜΗΛΟ κάνουν τους διακόπτες των ρελέ ON/OFF αντίστοιχα. Λόγω τριών καταστάσεων, δύο ψηφιακά σήματα εξόδου MCU, DO1 και DO2, εφαρμόζονται στον έλεγχο PLC. Η σχέση δύο εντολών εξόδου ψηφιακών σημάτων και απόφασης συνοψίζεται στον πίνακα που εισάγεται στην Εικ. 5.

Συνοπτικά, το SCB που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία έχει τρεις λειτουργίες:

- (1) Λήψη των δεδομένων εισόδου του PLC
- (2) Έλεγχος της εξόδου του PLC
- (3) Υπολογισμός ακμών

Με το SCB, συνδέεται το παλαιού τύπου PLC στο cloud και εκτελεί έξυπνες εργοστασιακές εφαρμογές.



Σχήμα 20. Διάταξη κυκλώματος εφαρμογής έξυπνου κιβωτίου ελέγχου

6. Συμπεράσματα

Ενώ, σε γενικές γραμμές, το edge computing είναι μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική που μετακινεί τις δυνατότητες αποθήκευσης και υπολογισμού πιο κοντά στις πηγές δεδομένων και τους ενεργοποιητές, παραδόξως, ο ίδιος ο όρος έχει έτσι διέφευγε πολύ έναν ενιαίο ορισμό. Επιπλέον, ανάλογα με το πλαίσιο και τη χρονική ενσωμάτωση της πηγής, χρησιμοποιούνται άλλοι όροι όπως υπολογισμός ομίχλης, υπολογισμός ομίχλης και cloudlets και ορίζεται επίσης με αρκετά διαφορετικούς τρόπους. Οι Bellavista et al., (2019) παρέχουν περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με τη διαφοροποίηση αυτών των όρων.

Ο Peter Levine, στην παρουσίασή του το 2017, ενσωμάτωσε αρκετά καλά το edge computing στο ευρύτερο πλαίσιο του κατανεμημένου υπολογισμού. Για περίπου 70 χρόνια, παρατηρήσαμε μια εναλλασσόμενη τάση στα κατανεμημένα συστήματα υπολογιστών. Ενώ οι πρώτες κεντρικές μονάδες επεξεργασίας μπορούσαν ήδη να χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερα τις δεκαετίες του 1950 και του 1960, η τάση άλλαξε τις δεκαετίες του 1980 και του 1990 προς όφελος των κατανεμημένων συστημάτων πελάτη-διακομιστή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σε αυτό το πλαίσιο είναι η ανάπτυξη δικτύων παράδοσης περιεχομένου (CDN), στα οποία τα δεδομένα αποθηκεύονται και έχουν πρόσβαση σε κατανεμημένο και πιο κοντά στο σημείο που χρειάζεται. Μετά την αρχική έρευνα κάτω από την ομπρέλα του προτύπου του κατανεμημένου πλέγματος υπολογιστών, δεδομένα και υπηρεσίες αποθηκεύονται και φιλοξενούνται και πάλι όλο και πιο κεντρικά υπό τον όρο υπολογιστικό νέφος από την αρχή της νέας χιλιετίας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ωστόσο, δεν μπορούν και δεν πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία όλα τα δεδομένα εκτός του δικού τους διοικητικού τομέα και εκτός καθορισμένων γεωπολιτικών ορίων. Οι λόγοι για την τοπική ή κεντρική επεξεργασία δεδομένων είναι πολλαπλοί και σχετίζονται κυρίως με τα «έναντι των μεγάλων δεδομένων»: όγκος (αύξηση μεγέθους δεδομένων), ποικιλία (διάφοροι τύποι δεδομένων) και ταχύτητα (αύξηση της ταχύτητας με την οποία πρέπει να γίνουν τα δεδομένα επεξεργασμένο). Ωστόσο, σημειώστε ότι, ανάλογα με την πηγή, ο αριθμός των V μπορεί να διαφέρει μεταξύ τριών (Zikopoulos & Eaton, 2011) και εννέα (Owais & Hussein, 2016), με διάφορες διαβαθμίσεις (π.χ. ακρίβεια, εγκυρότητα, μεταβλητότητα,

μεταβλητότητα, οπτικοποίηση και τιμή). Στο πλαίσιο του βιομηχανικού αυτοματισμού, ωστόσο, προστίθενται και άλλες απαιτήσεις όπως η καθυστέρηση και ο ντετερμινισμός.

Στη βιβλιογραφία, μία από τις πρώτες εμφανίσεις του όρου edge computing μπορεί να βρεθεί το 2001, όπου οι συγγραφείς του (Gelsinger, 2001) περιέγραψαν συνοπτικά τις μελλοντικές προκλήσεις για το σχεδιασμό μικροεπεξεργαστή. Σε μια από τις πιο αναφερόμενες εργασίες (DHJ, 2015) τονίστηκαν οι μελλοντικές προκλήσεις στον υπολογισμό αιχμής το 2005. Έκτοτε, έχουν δημοσιευθεί πολυάριθμες έρευνες και ο αυξανόμενος αριθμός σχετικών εργασιών υποδηλώνει υψηλό ερευνητικό ενδιαφέρον.

Επιπλέον, οργανισμοί ανάπτυξης προτύπων (SDOs) έχουν αρχίσει να αντιμετωπίζουν και αυτό το ζήτημα. Για παράδειγμα, στο πλαίσιο του ETSI, η ομάδα εργασίας MEC έχει δημοσιεύσει περισσότερες από 35 προδιαγραφές από τότε 2015, με το (MEC, 2020) να είναι το πιο πρόσφατο, και εντός του IEC το θέμα της ευφυΐας edge computing συζητήθηκε (IEC, 2017). Μια ευρύτερη επισκόπηση, με έμφαση στη βιωσιμότητα, δίνεται από τους Hamm et al., (2019). Σε αυτό το άρθρο, μια παλαιότερη έκδοση του μοντέλου RAMEC έχει περιγραφεί εν συντομία για πρώτη φορά, ωστόσο, όχι στην έκταση αυτής της δημοσίευσης.

Σε αυτήν τη δημοσίευση, ακολουθούμε τον ορισμό του edge computing που δημοσιεύτηκε από το Linux Foundation τον Αύγουστο του 2019. Αυτός ο ορισμός έχει υιοθετηθεί ευρέως στη σχετική κοινότητα, καθώς διάφοροι οργανισμοί και έργα έχουν εμπλακεί στη σύνταξη του αντίστοιχου γλωσσαρίου:

«Η παροχή υπολογιστικών δυνατοτήτων στα λογικά άκρα ενός δικτύου αποσκοπεί στο να βελτιωθεί η απόδοση, το λειτουργικό κόστος και η αξιοπιστία εφαρμογών και υπηρεσιών. Συντομεύοντας την απόσταση μεταξύ των συσκευών και των πόρων cloud που τις εξυπηρετούν, και επίσης μειώνοντας τα άλματα δικτύου, ο υπολογισμός αιχμής μετριάξει τους περιορισμούς καθυστέρησης και εύρους ζώνης του σημερινού Διαδικτύου, εισάγοντας νέες κατηγορίες εφαρμογών. Πρακτικά, αυτό σημαίνει διανομή νέων πόρων και στοιβών λογισμικού κατά μήκος της διαδρομής μεταξύ των σημερινών κεντρικών κέντρων δεδομένων και του ολοένα και μεγαλύτερου αριθμού συσκευών στο πεδίο, συγκεντρωμένες, ιδιαίτερα, αλλά όχι αποκλειστικά, σε κοντινή απόσταση από το

δίκτυο του τελευταίου μιλίου, τόσο από την πλευρά της υποδομής όσο και από την πλευρά της συσκευής.» (Edge, 2019).

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το παράδειγμα υπολογιστών αιχμής δεν έχει αυξήσει μόνο το ενδιαφέρον στο πλαίσιο της έρευνας και της τυποποίησης. Λόγω του πιθανού επιχειρηματικού αντίκτυπου, έχουν αναπτυχθεί αρκετές εμπορικές και μη εμπορικές εφαρμογές. Χωρίς καμία αξίωση πληρότητας, τα ακόλουθα παραδείγματα θα πρέπει να παρέχουν μια αρχική επισκόπηση και υπόκεινται σε αλλαγές.

Εμπορικές πλατφόρμες που υποστηρίζουν και προωθούν ενεργά το πρότυπο υπολογιστών αιχμής, μεταξύ άλλων, είναι οι SAP Leonardo Edge Computing, Siemens MindSphere Industrial Edge, Microsoft Azure IoT Edge, Amazon Web Services IoT Greengrass και IBM Watson IoT Platform Edge. Ταυτόχρονα, υπάρχουν ήδη πολλές λύσεις ανοιχτού κώδικα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση των πρώτων έργων.

Βιβλιογραφία

- Abbasi, A. (2016). Ghost in the PLC: stealth on-the-fly manipulation of programmable logic controllers' I/O. *Proceedings of the Black Hat EU, London, UK*, 1-4.
- Aboah Boateng, E., & Bruce, J. W. (2022). Unsupervised Machine Learning Techniques for Detecting PLC Process Control Anomalies. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 2(2), 220-244.
- Ahmad, I., Shahabuddin, S., Malik, H., Harjula, E., Leppänen, T., Loven, L., ... & Riekkilä, J. (2020). Machine learning meets communication networks: Current trends and future challenges. *IEEE Access*, 8, 223418-223460.
- Ahmed, S., Lee, Y., Hyun, S. H., & Koo, I. (2019). Unsupervised machine learning-based detection of covert data integrity assault in smart grid networks utilizing isolation forest. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 14(10), 2765-2777.
- Arsenijević, D., Stankovski, S., Ostojić, G., Baranovski, I., & Oros, D. (2018). An Overview of IoT Readiness Assessment Methods. In *Zbornik radova 8th International Conference on Information Society and Technology-ICIST* (Vol. 1, pp. 48-53).
- Azarmipour, M., Elfaham, H., Gries, C., & Epple, U. (2019, October). Plc 4.0: A control system for industry 4.0. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Vol. 1, pp. 5513-5518). IEEE.
- Bangemann, T., Riedl, M., Thron, M., & Diedrich, C. (2016). Integration of classical components into industrial cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 104(5), 947-959.
- Bellavista, P., Corradi, A., Foschini, L., & Scotece, D. (2019). Differentiated service/data migration for edge services leveraging container characteristics. *IEEE Access*, 7, 139746-139758.
- Bengio, Y., & LeCun, Y. (2007). Scaling learning algorithms towards AI. *Large-scale kernel machines*, 34(5), 1-41.

- Benkraouda, H., Chakkantakath, M. A., Keliris, A., & Maniatakos, M. (2020, April). Snifu: Secure network interception for firmware updates in legacy plcs. In *2020 IEEE 38th VLSI Test Symposium (VTS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Boeckl, K., Boeckl, K., Fagan, M., Fisher, W., Lefkovitz, N., Megas, K. N., ... & Scarfone, K. (2019). *Considerations for managing Internet of Things (IoT) cybersecurity and privacy risks*. Gaithersburg: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Buyya, R., & Srirama, S. N. (Eds.). (2019). *Fog and edge computing: principles and paradigms*. John Wiley & Sons.
- Ceruzzi, P. E. (2012). *Computing: a concise history*. MIT press.
- Chalapathy, R., Menon, A. K., & Chawla, S. (2018). Anomaly detection using one-class neural networks. *arXiv preprint arXiv:1802.06360*.
- Chiang, M., & Zhang, T. (2016). Fog and IoT: An overview of research opportunities. *IEEE Internet of things journal*, 3(6), 854-864.
- Colombo, A. W., Bangemann, T., Karnouskos, S., Delsing, J., Stluka, P., Harrison, R., ... & Lastra, J. L. (2014). Industrial cloud-based cyber-physical systems. *The Imc-aesop Approach*, 22, 4-5.
- Colombo, A. W., Karnouskos, S., Kaynak, O., Shi, Y., & Yin, S. (2017). Industrial cyberphysical systems: A backbone of the fourth industrial revolution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 6-16.
- Cristani, M., Demrozi, F., & Tomazzoli, C. (2018). ONTO-PLC: An ontology-driven methodology for converting PLC industrial plants to IoT. *Procedia Computer Science*, 126, 527-536.
- Cruz, T., Simoes, P., & Monteiro, E. (2016). Virtualizing programmable logic controllers: Toward a convergent approach. *IEEE Embedded Systems Letters*, 8(4), 69-72.
- Danielis, P., Skodzik, J., Altmann, V., Schweissguth, E. B., Golatowski, F., Timmermann, D., & Schacht, J. (2014, September). Survey on real-time

communication via ethernet in industrial automation environments. In *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE.

Delsing, J. (Ed.). (2017). *Iot automation: Arrowhead framework*. Crc Press.

DHJ, L. P. M. A. E. (2015). Datta A Higashino T Iamnitchi A Barcellos MP Felber P Rivière E. *Edge-centric computing: vision and challenges ACM Special Interest Group on Data Communication*, 45(5), 37.

Di Martino, B., Li, K. C., Yang, L. T., & Esposito, A. (2018). Internet of Everything. *cit. on*, 15.

Discover UDOO x86 II: The Most Powerful Maker Board ever. UDOO. (2019, July 26). Retrieved from <https://www.udoo.org/discover-udoo-x86-ii/>

Dizdarević, J., Carpio, F., Jukan, A., & Masip-Bruin, X. (2019). A survey of communication protocols for internet of things and related challenges of fog and cloud computing integration. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 51(6), 1-29.

Edge, L. F. (2019). Open Glossary of Edge Computing. *14th September*.

Elnour, M., Meskin, N., Khan, K., & Jain, R. (2020). A dual-isolation-forests-based attack detection framework for industrial control systems. *IEEE Access*, 8, 36639-36651.

Engel, G., Stahl, C., Greiner, T., Barth, M., & Gorecky, D. (2015). Cloud-basierte Automatisierung. *atp magazin*, 57(03), 38-47.

Ferrer, B. R., Mohammed, W. M., Chen, E., & Lastra, J. L. M. (2017, October). Connecting web-based IoT devices to a cloud-based manufacturing platform. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 8628-8633). IEEE.

Finn, N. (2018). Introduction to time-sensitive networking. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(2), 22-28.

Galloway, B., & Hancke, G. P. (2012). Introduction to industrial control networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 15(2), 860-880.

- Gaushell, D. J., & Darlington, H. T. (1987). Supervisory control and data acquisition. *Proceedings of the IEEE*, 75(12), 1645-1658.
- Gauthama Raman, M. R., Somu, N., & Mathur, A. P. (2019, November). Anomaly detection in critical infrastructure using probabilistic neural network. In *International Conference on Applications and Techniques in Information Security* (pp. 129-141). Springer, Singapore.
- Gelsinger, P. P. (2001, February). Microprocessors for the new millennium: Challenges, opportunities, and new frontiers. In *2001 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. ISSCC (Cat. No. 01CH37177)* (pp. 22-25). IEEE.
- Gilchrist A., (2016). *Industry 4.0*, Apress, Berkeley, CA.
- Givehchi, O., Imtiaz, J., Trsek, H., & Jasperneite, J. (2014, May). Control-as-a-service from the cloud: A case study for using virtualized PLCs. In *2014 10th IEEE Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2014)* (pp. 1-4). IEEE.
- Goldschmidt, T., Hauck-Stattelmann, S., Malakuti, S., & Grüner, S. (2018). Container-based architecture for flexible industrial control applications. *Journal of Systems Architecture*, 84, 28-36.
- Gutiérrez, M., Ademaj, A., Steiner, W., Dobrin, R., & Punnekkat, S. (2017, September). Self-configuration of IEEE 802.1 TSN networks. In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE.
- Hamm, A., Willner, A., & Schieferdecker, I. (2019). Edge computing: a comprehensive survey of current initiatives and a roadmap for a sustainable edge computing development. *arXiv preprint arXiv:1912.08530*.
- Heynicke, R., Krush, D., Scholl, G., Kaercher, B., Ritter, J., Gaggero, P., & Rentschler, M. (2017, June). IO-link wireless enhanced sensors and actuators for industry 4.0 networks. In *AMA Conferences* (pp. 134-138).

- Huda, A. S., & ERÇELEBİ, E. (2017). Development of smart security system for remote control using small computer. *Turkish Journal of Science and Technology*, 12(2), 107-112.
- IEC (Sept. 2017). “Edge Intelligence,” tech. rep., pp. 1–134. Available at: <http://www.d-long.com/eWebEditor/uploadfile/2019032821205257349837.pdf>
- Inoue, J., Yamagata, Y., Chen, Y., Poskitt, C. M., & Sun, J. (2017, November). Anomaly detection for a water treatment system using unsupervised machine learning. In *2017 IEEE international conference on data mining workshops (ICDMW)* (pp. 1058-1065). IEEE.
- Ito, A., Kohiyama, T., Sato, K., & Tamura, F. (2018). IoT-ready industrial controller with enhanced data processing functions. *Hitachi Review*, 67(2), 208-209.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Acatech–National academy of science and engineering. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE, 4*.
- Kairouz, P., McMahan, H. B., Avent, B., Bellet, A., Bennis, M., Bhagoji, A. N., ... & Zhao, S. (2021). Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 14(1–2), 1-210.
- Kiran, A. R., Sundeep, B. V., Vardhan, C. S., & Mathews, N. (2013). The principle of programmable logic controller and its role in automation. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4(3), 500-502.
- Krush, D., Cammin, C., Heynicke, R., & Scholl, G. (2016). Standardisierung eines schnellen drahtlosen Sensor/Aktor-Netzwerkes fuer die Fertigungsautomatisierung. *tm-Technisches Messen*, 83(4), 201-207.
- Kusiak, A. (2019). Fundamentals of smart manufacturing: A multi-thread perspective. *Annual Reviews in Control*, 47, 214-220.
- Langarica, S., Ruffelmacher, C., & Núñez, F. (2019). An industrial internet application for real-time fault diagnosis in industrial motors. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(1), 284-295.

- Langmann, R., & Stiller, M. (2019). The PLC as a smart service in industry 4.0 production systems. *Applied Sciences*, 9(18), 3815.
- Leavens, G. T., & Sitaraman, M. (Eds.). (2000). *Foundations of component-based systems*. Cambridge University Press.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- Leitão, P. (2009). Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering applications of artificial intelligence*, 22(7), 979-991.
- Li, H., Bose, A., & Venkatasubramanian, V. M. (2015). Wide-area voltage monitoring and optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 785-793.
- Li, X., & Kao, I. (2005, August). Analytical fault detection and diagnosis (FDD) for pneumatic systems in robotics and manufacturing automation. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 2517-2522). IEEE.
- Liu, B., Chen, J., & Hu, Y. (2022). Mode division-based anomaly detection against integrity and availability attacks in industrial cyber-physical systems. *Computers in Industry*, 137, 103609.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10.
- MEC, E. G. (2020). *028: Multi-access Edge Computing (MEC); WLAN Information API*. Tech. rep. Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute (ETSI).
- Mediatek Labs announces availability of new LinkIt development platform. MediaTek. (2022, July 16). Retrieved from <https://corp.mediatek.com/news-events/press-releases/mediatek-labs-announces-availability-of-new-linkit-development-platform-for-rtos>
- Mellado, J., & Núñez, F. (2022). Design of an IoT-PLC: A containerized programmable logical controller for the industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 25, 100250.

- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., ... & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *Cirp Annals*, 65(2), 621-641.
- Muna, A. H., Moustafa, N., & Sitnikova, E. (2018). Identification of malicious activities in industrial internet of things based on deep learning models. *Journal of information security and applications*, 41, 1-11.
- Murar, M., & Brad, S. (2014, May). Monitoring and controlling of smart equipments using Android compatible devices towards IoT applications and services in manufacturing industry. In *2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics* (pp. 1-5). IEEE.
- Núñez, F., Langarica, S., Díaz, P., Torres, M., & Salas, J. C. (2019). Neural network-based model predictive control of a paste thickener over an industrial internet platform. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2859-2867.
- Oliveira, R. M., Facina, M. S., Ribeiro, M. V., & Vieira, A. B. (2016). Performance evaluation of in-home broadband PLC systems using a cooperative MAC protocol. *Computer Networks*, 95, 62-76.
- O'Regan, G., & O'Regan. (2008). *A brief history of computing* (pp. I-XIX). London: Springer.
- Owais, S. S., & Hussein, N. S. (2016). Extract five categories CPIVW from the 9V's characteristics of the big data. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(3).
- Parr, E. A. (2003). *Programmable controllers: an engineer's guide*. Newnes.
- Pedreiras, P., Gai, P., Almeida, L., & Buttazzo, G. C. (2005). FTT-Ethernet: A flexible real-time communication protocol that supports dynamic QoS management on Ethernet-based systems. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 1(3), 162-172.
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214.

- Pérez, F., Irisarri, E., Orive, D., Marcos, M., & Estevez, E. (2015, September). A CPPS Architecture approach for Industry 4.0. In *2015 IEEE 20th conference on emerging technologies & factory automation (etfa)* (pp. 1-4). IEEE.
- Plėta, T., Tvaronavičienė, M., Della Casa, S., & Agafonov, K. (2020). Cyber-attacks to critical energy infrastructure and management issues: overview of selected cases. *Insights into Regional Development*, 2 (3), 703-715.
- Potluri, S., Diedrich, C., & Sangala, G. K. R. (2017, September). Identifying false data injection attacks in industrial control systems using artificial neural networks. In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE.
- Qi, Q., & Tao, F. (2019). A smart manufacturing service system based on edge computing, fog computing, and cloud computing. *IEEE Access*, 7, 86769-86777.
- Sahlmann, K., & Schwotzer, T. (2018, October). Ontology-based virtual IoT devices for edge computing. In *Proceedings of the 8th International Conference on the Internet of Things* (pp. 1-7).
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30-39.
- Schmitt, J., Goldschmidt, T., & Vorst, P. (2014). Cloud-enabled Automation Systems using OPC UA. *atp magazin*, 56(07-08), 34-40.
- Scholten, B. (2007). *The road to integration: A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing*. Isa.
- Scholten, B. (2007). *The road to integration: A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing*. Isa.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE internet of things journal*, 3(5), 637-646.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE internet of things journal*, 3(5), 637-646.
- Spyridopoulos, T., Tryfonas, T., & May, J. (2013). Incident analysis & digital forensics in SCADA and industrial control systems.

- Stankovski, S., Ostojić, G., Baranovski, I., Babić, M., & Stanojević, M. (2020, March). The impact of edge computing on industrial automation. In *2020 19th International Symposium Infoteh-Jahorina (Infoteh)* (pp. 1-4). IEEE.
- Stouffer, K. A., Falco, J. A., & Scarfone, K. A. (2008). Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security (final draft).
- Tasca, L. C., de Freitas, E. P., & Wagner, F. R. (2020). A study on the performance impact of programmable logic controllers based on enhanced architecture and organization. *Microprocessors and Microsystems*, 76, 103082.
- Tomlin Jr, L., Farnam, M. R., & Pan, S. (2016). A clustering approach to industrial network intrusion detection. *Proceedings of the 2016 Information Security Research and Education (INSuRE) Conference (INSuRECon-16)*, Charleston, SC, USA.
- Tsiknas, K., Taketzis, D., Demertzis, K., & Skianis, C. (2021). Cyber threats to industrial IoT: a survey on attacks and countermeasures. *IoT*, 2(1), 163-186.
- Vermesan, O., EisenHauer, M., Serrano, M., Guillemin, P., Sundmaeker, H., Tragos, E. Z., ... & Darmois, E. C. (2018). The next generation internet of things—hyperconnectivity and embedded intelligence at the edge. *Next Generation Internet of Things. Distributed Intelligence at the Edge and Human Machine-to-Machine Cooperation*.
- Wan, J., Cai, H., & Zhou, K. (2015, January). Industrie 4.0: enabling technologies. In *Proceedings of 2015 international conference on intelligent computing and internet of things* (pp. 135-140). IEEE.
- Wardak, H., Zhioua, S., & Almulhem, A. (2016, December). PLC access control: a security analysis. In *2016 World Congress on Industrial Control Systems Security (WCICSS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Welborn, T. (2021). *One-Class Support Vector Machines Approach for Trust-Aware Recommendation Systems*. Shareok: Norman, OK, USA.

- Wu, T., & Nurse, J. R. (2015). Exploring the use of PLC debugging tools for digital forensic investigations on SCADA systems. *Journal of Digital Forensics, Security and Law*, 10(4), 7.
- Xiao, Y. J., Xu, W. Y., Jia, Z. H., Ma, Z. R., & Qi, D. L. (2017). NIPAD: a non-invasive power-based anomaly detection scheme for programmable logic controllers. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18(4), 519-534.
- Xu, M. (2021). PLC course performance evaluation based on machine learning and image feature retrieval. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(4), 7209-7219.
- Yau, K., Chow, K. P., Yiu, S. M., & Chan, C. F. (2017, October). Detecting anomalous behavior of PLC using semi-supervised machine learning. In *2017 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)* (pp. 580-585). IEEE.
- Zhang, L. (2013). Applications of PAC in control system at Xeiqiao new coal prepartaion plant. *Coal Preperation Technology*, 3, 80-81.
- Zhang, X. D. (2008). Tide Simulation System Based on PAC. *Modern Electronic Technique*, 21(11), 113-116.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)* (pp. 2147-2152). IEEE.
- Zikopoulos, P., & Eaton, C. (2011). *Understanding big data: Analytics for enterprise class hadoop and streaming data*. McGraw-Hill Osborne Media.