



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ»

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΟΙΚΗΣΗ LOGISTICS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

INDUSTRY 4 : Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές

ΡΕΝΤΟΥΜΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ



ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2018

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
Περίληψη	2
1. Εισαγωγή.....	3
2. Industry 4.0	5
2.1 Ορισμός.....	5
2.2 Από πού ξεκίνησε.....	7
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά του Industry 4.0	9
2.4 Θεμελιώδεις αρχές του Industry 4.0	11
2.5 Βασικά στοιχεία του Industry 4.0	14
2.6 Έξυπνο Εργοστάσιο.....	17
2.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα	20
3. DigitalTwin	22
3.1 Εισαγωγή.....	22
3.2 Εφαρμογές του Digital Twin.....	23
3.3 Βασικές συνιστώσες του DigitalTwin.....	25
3.4 Μεθοδολογία σχεδιασμού του DigitalTwin ενός παραγωγικού συστήματος	28
3.5 Υλοποίηση του Digital Twin	32
3.6 Οργανόγραμμα επιχειρήσεων με βάση το DigitalTwin	35
4. Η Χρήση του DT στην παραγωγή ανταλλακτικών	39
4.1 Χαρακτηριστικά Παραγωγής Ανταλλακτικών και η ανάγκη δημιουργίας ενός νέου παραγωγικού μοντέλου.....	39
4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υπάρχοντων μοντέλων AM (Additive Manufacturing) 40	
4.3 Η ανάπτυξη του AM Digital Twin πρώτης γενιάς.....	41
4.4 Χαρακτηριστικά	41
4.5 Δομικά στοιχεία ενός Digital Twin AM	42
4.6 Τρέχουσα κατάσταση και ανάγκες έρευνας.....	45
5 Συμπεράσματα.....	46
Βιβλιογραφία	48

Περίληψη

Ο όρος «Industry 4.0» σχεδιάστηκε για να σηματοδοτήσει την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, ένα νέο πρότυπο που επιτρέπει η εισαγωγή του Διαδίκτυο των αντικειμένων/πραγμάτων (IoT) στο φυσικό παραγωγικό περιβάλλον. Το όραμα του Industry 4.0 τονίζει την χρήση μεγάλων δικτύων μηχανών στη διαμόρφωση έξυπνων γραμμών παραγωγής, ικανές να ανταλλάσσουν αυτόνομα πληροφορίες και να ελέγχουν η μία μηχανή την άλλη. Αυτό το κυβερνο-φυσικό σύστημα (Cyber-PhysicalSystem) επιτρέπει στο έξυπνο εργοστάσιο να λειτουργεί αυτόνομα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εισαγωγή στις θεμελιώδεις αρχές και χαρακτηριστικά του Industry 4.0 και στον αντίκτυπο που θα έχει στην αλυσίδα εφοδιασμού στο σύνολο της, για την αύξηση της συνεργασίας μεταξύ προμηθευτών, παραγωγών, πελατών, και τη διαφάνεια στα βήματα παραγωγής των προϊόντων μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής τους. Η εισαγωγή της ψηφιοποίησης και της αυτοματοποίησης των διαδικασιών, και η ανάγκη αναδιάρθρωσης της δομής διαχείρισης της γραμμής παραγωγής και της αλυσίδας εφοδιασμού, μας καλεί να κατανοήσουμε τις ευκαιρίες και ενδεχομένως τις απειλές από την εισαγωγή των νέων τεχνολογιών που συνοδεύουν το Industry 4.0. Πολύ σημαντική είναι επίσης η ανάλυση του ρόλου του ανθρώπινου δυναμικού στο νέο παραγωγικό περιβάλλον.

Μέσα σε αυτές τις ποικίλες μορφές ψηφιακού και αυτοματοποιημένου μετασχηματισμού που είναι επικείμενες εξαιτίας του Industry 4.0, σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι επίσης να αναλύσουν τις βασικές πτυχές του συνόλου των συστημάτων DigitalTwin. Τα συστήματα DigitalTwin (DT) αντιπροσωπεύουν την έννοια της χρησιμοποίησης εργαλείων και τεχνολογιών για τη "χαρτογράφηση" δεδομένων (bits) από φυσικά αντικείμενα (άτομα). Η δυναμική που προσφέρει είναι ότι μπορεί να αποκαλύψει την φυσική κατάσταση των ατόμων (πράγματα, συσκευές, εξαρτήματα, μηχανές, άνθρωποι), τη τρέχουσα κατάσταση διαδικασιών που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο, τρέχουσα κατάσταση του ανθρώπινου δυναμικού και να προσφέρει επίσης διαφάνεια σε οποιαδήποτε άλλη πληροφορία που αφορά τα παραπάνω.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε τα εμπόδια που καλείται να ξεπεράσει προκειμένου να διεισδύσει στη Βιομηχανία. Η πρόοδος εξαρτάται από τη σύγκλιση της τεχνολογίας της Πληροφορικής, Βιομηχανικών Λειτουργιών (OperationalTechnology) και των Τηλεπικοινωνιών. Η εξασφάλιση της συλλογής δεδομένων (πχ μέσω αισθητήρων), η δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων, και της απομακρυσμένης ανάλυσης τους είναι το κλειδί της αξίας που μπορεί να προσφέρει το DT.

Η συρροή αυτών και άλλων παραγόντων που παρουσιάζουμε σε αυτή την εργασία, θα επηρεάσει τη μελλοντική πορεία τόσο για το Industry 4.0 όσο και για το DT.

1. Εισαγωγή

Σε ένα κόσμο που γίνεται όλο και περισσότερο μια παγκόσμια κοινότητα, η ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη των επικοινωνιών και των τεχνολογιών πληροφορικής επιτρέπουν τη μετάδοση των γνώσεων σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτό το πλαίσιο, παρατηρείται ότι οι πιο ανεπτυγμένες χώρες προσπαθούν να αναπτύξουν τις δικές τους στρατηγικές για την τόνωση του βιομηχανικού τομέα ώστε να ενημερώνονται και να είναι δυναμικά ανταγωνιστικές σε μία ευμετάβλητη παγκόσμια αγορά. Επιπλέον, οι βιομηχανικοί στόχοι σχετικά με τη διατήρηση της ανταγωνιστικής ικανότητας της βιομηχανίας μπορούν επίσης να συνδέονται με κοινωνικούς στόχους και κυρίως τη κάλυψη των ανθρώπινων και κοινωνικών αναγκών ενός έθνους (BMWi, 2013).

Η προσπάθεια βελτίωσης της ανταγωνιστικότητας μέσω της τεχνολογικής διαφοροποίησης μετά την εκβιομηχάνιση επιτρέπει ένα ευρύτερο και καινοτόμο πεδίο έρευνας. Ήδη βρισκόμαστε μπροστά σε μια νέα γενιά τεχνολογιών για τους οργανισμούς και τη βιομηχανία που αρχίζει να αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζουμε τη βιομηχανία με τη κοινωνία, την αλληλεπίδραση με το ανθρώπινο δυναμικό και τα σύγχρονα εργασιακά πρότυπα. Στόχος επομένως αυτής της πτυχιακής είναι η περιγραφή του πλαισίου που διέπει τη τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, ή αλλιώς το Industry 4.0, που περιλαμβάνει πέρα από τους βασικούς λειτουργικούς του στόχους, την ανάλυση των προκλήσεων και των προοπτικών που αντιμετωπίζει έχοντας υπόψη τα παραπάνω (SMLC, 2011).

Η βιομηχανία αρχίζει να απορροφά τις ολοκληρωμένες λύσεις που παρέχει επιπλέον το «Ίντερνετ των Αντικειμένων» (Internet of Things – IoT). Οι βιομηχανίες αρχίζουν να προετοιμάζονται για σημαντικές αλλαγές στο επιχειρηματικό τους μοντέλο. Η ενσωμάτωση δικτύων στο παραγωγικό σύστημα για την ανταλλαγή δεδομένων και γνώσης, επιτρέπουν τη δημιουργία λύσεων που προσφέρουν νέα προστιθέμενη αξία και οφέλη με ένα κατανοητό τρόπο για όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη. Για παράδειγμα, η πιο άμεση αντίδραση στις μεταβολές της παγκόσμιας αγοράς που συνήθως προκαλούν αβεβαιότητα είναι ένα από τα οφέλη (SMLC, 2011).

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0) γεννήθηκε από την ανάγκη δημιουργίας ενός νέου παραγωγικού μοντέλου και ειδικά στις αναπτυγμένες χώρες. Ο αυξανόμενος ανταγωνισμός στην παγκόσμια αγορά από τις βιομηχανίες τρίτων χωρών οι οποίες διαθέτουν τεχνολογική ικανότητα και χαμηλό λειτουργικό κόστος δημιούργησε μία τέτοια πίεση στις αναπτυγμένες χώρες. Οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης και κατάρτισης εθνικών στρατηγικών με στόχο την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων από τον ανταγωνισμό των τρίτων χωρών και αντίστοιχα με σκοπό την ενίσχυση του εγχώριου βιομηχανικού τομέα και τη προώθηση στις διεθνείς αγορές καινοτόμων προϊόντων και υπηρεσιών που θα παρέχουν υψηλή προστιθέμενη αξία. Η διαφοροποίηση από τους άλλους ανταγωνιστές, η ελαχιστοποίηση του κόστους και η χρησιμοποίηση των πόρων με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα είναι ταυτόχρονα οι προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει το νέο παραγωγικό μοντέλο (ACATTECH, 2013).

Σε αυτό το νέο πλαίσιο που διαμορφώνεται, ο όρος Industry 4.0 αντιπροσωπεύει την περιγραφή ενός νέου θεμελιώδους που ορίζει τη μετάβαση από ένα ελεγκτο-κεντρικό βιομηχανικό μοντέλο παραγωγής σε ένα μοντέλο αποκεντρωμένης παραγωγής. Αυτό επιτρέπει τη διαμόρφωση εξαιρετικά ευέλικτων και εξατομικευμένων παραγωγικών διαδικασιών, όπου κλασικοί παραγωγικοί διαχωρισμοί εξαφανίζονται δημιουργώντας νέες διαδικασίες βασισμένες σε νέους τεχνολογικούς τομείς και μορφές συνεργασίας.

Οι διαδικασίες αυτές επιφέρουν επίσης αλλαγές σε διαδικασίες δημιουργίας προστιθέμενης αξίας και απαιτούν αναδιοργάνωση στο καταμερισμό της εργασίας (Westkämper, E. , 2006).

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιάσει τις βασικές πτυχές του Industry 4.0: τι είναι, από που ξεκίνησε, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Μία αντίστοιχη αναφορά θα πραγματοποιηθεί επίσης για το πρότυπο DigitalTwin στο Κεφάλαιο 3 και το Κεφάλαιο 4. Το Κεφάλαιο 5 ολοκληρώνει την εργασία.

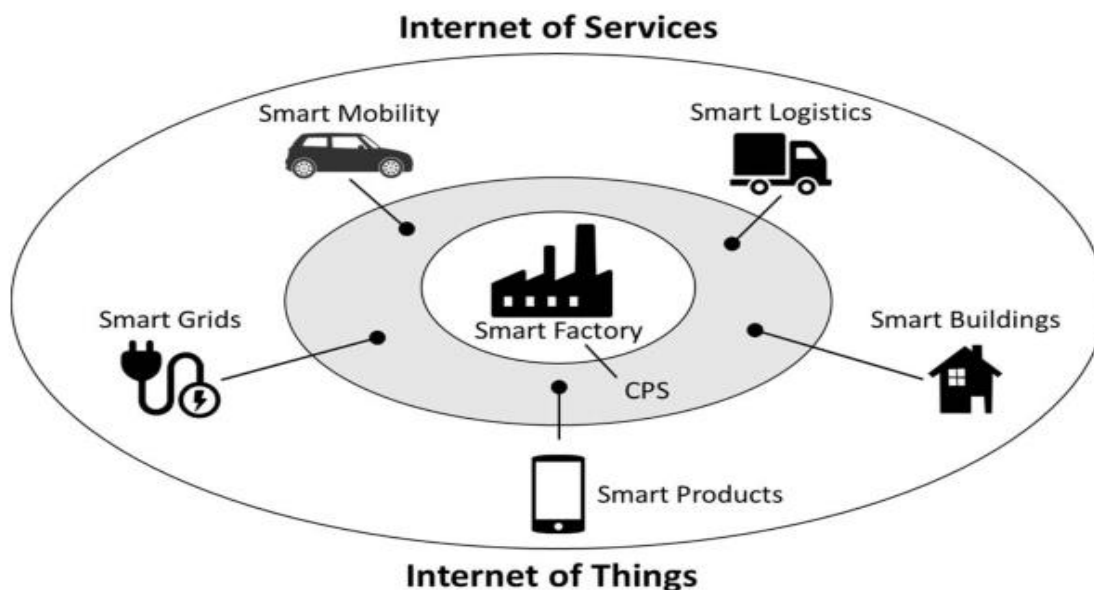
2. Industry 4.0

2.1 Ορισμός

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών στη μεταποιητική βιομηχανία ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, οι βασικές ιδέες του Industry 4.0 δημοσιεύθηκαν για πρώτη φορά το 2011 (Kagermann H, 2011). Την ίδια χρονιά υπήρξε μια στρατηγική πρωτοβουλία της γερμανικής κυβέρνησης η οποία συμπεριλήφθηκε στο «Σχέδιο δράσης για τη στρατηγική υψηλής τεχνολογίας έως το 2020» [16]. Παρόμοιες στρατηγικές έχουν επίσης προταθεί σε άλλες βιομηχανικές χώρες, π.χ. σε ευρωπαϊκό επίπεδο ο αντίστοιχος όρος είναι "Εργοστάσια του μέλλοντος", στις ΗΠΑ "Βιομηχανικό Διαδίκτυο" και στην Κίνα "Internet +".

Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον για το Industry 4.0 παγκοσμίως, δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος ορισμός για αυτό. Ορίζεται ως «η ολοκλήρωση σύνθετων φυσικών μηχανών και συσκευών με δίκτυα αισθητήρων και προγραμμάτων λογισμικού, και το τελευταίο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη, τον έλεγχο και το σχεδιασμό καλύτερων επιχειρηματικών και κοινωνικών αποτελεσμάτων» (Consortium, The Industrial Internet, 2018). Ένας άλλος ορισμός είναι «ένα νέο οργανωτικό και διοικητικό επίπεδο στην αλυσίδα αξίας σε όλη τη διάρκεια ζωής των προϊόντων» (Kagermann H, Helbig J., 2013). Επίσης έχει αναφερθεί και ως ένας «συλλογικός όρος για τεχνολογίες και ιδέες στην οργάνωση της αλυσίδας αξίας» (Hermann M, Pentek T, Otto B, 2015).

Έτσι, η έννοια του Industry 4.0 μπορεί να γίνει αντιληπτή ως στρατηγική για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας στο μέλλον. Επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της αλυσίδας αξίας των προϊόντων λόγω της εφαρμογής αυτοτελούς ελέγχου και δυναμικής παραγωγής [20]. Καλύπτει το σχεδιασμό και την υλοποίηση ανταγωνιστικών προϊόντων και υπηρεσιών, τη διοίκηση ισχυρών και ευέλικτων συστημάτων εφοδιασμού και παραγωγής (Kempf, 2018).



Εικόνα 1: Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT) – εφαρμογή στο πλαίσιο του Industry 4.0 (Wagner T. et al, 2017)

Προκειμένου να επιτευχθεί η διόγκωση της αυτοματοποίησης, οι τεχνολογικές έννοιες των Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων (CyberPhysical Systems -CPS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λειτουργήσουν αυτόνομα και να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον παραγωγής τους μέσω μικροελεγκτών, ενεργοποιητών, αισθητήρων και διεπαφών επικοινωνίας (Broy M, Kargermann H, Achatz R., 2010). Ωστόσο, η εισαγωγή τόσο του CSP όσο και του IoT, όπου τα αντικείμενα πρέπει να ξεκινήσουν μια διαδικασία προετοιμασίας, σχεδιασμού, προγραμματισμού, βελτιστοποίησης, καθώς επίσης εργασίες για εργαλεία, και ανθρώπινο δυναμικό αν είναι απαραίτητο, οδηγεί σε μία 4^η Βιομηχανική Επανάσταση στο εγγύς μέλλον (Πίνακας 1).

	Παρελθόν	Παρόν	Μέλλον
Σύστημα επικοινωνιών	Αναλογικό	Διαδίκτυο και Εσωτερικό Δίκτυο	Δίκτυο Αντικειμένων Δίκτυο Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων
Έννοια	Νέο-Τειλορισμός	Λιτή Παραγωγή (Lean Manufacturing)	Έξυπνη Παραγωγή
Λύση	Μηχανοποίηση και Αυτοματισμός	Αυτοματοποίηση και εφαρμογή υπολογιστικής	Απούλοποίηση (Virtualisation) και ολοκλήρωση

Πίνακας 1: Εξέλιξη της παραγωγής (Broy M, Kargermann H, Achatz R., 2010)

Το CPS είναι παρόμοιο με το IoT, καθώς μοιράζεται την ίδια βασική αρχιτεκτονική. Ωστόσο, παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό συνδυασμού και συντονισμού μεταξύ φυσικών και υπολογιστικών στοιχείων (Rad CR et al, 2015). Το Industry 4.0 χαρακτηρίζεται επιπρόσθετα από τις εξής έννοιες: έξυπνο προϊόν, έξυπνο μηχάνημα και ενισχυμένος χειριστής. Η κύρια ιδέα του έξυπνου προϊόντος είναι να αλλάξει το ρόλο του τεμαχίου εργασίας από ένα παθητικό σε ένα ενεργό μέρος του συστήματος. Σε ένα τέτοιο σύστημα τα προϊόντα έχουν μνήμη για την αποθήκευση των λειτουργικών δεδομένων και των μεμονωμένων απαιτήσεων, και μπορούν να ζητήσουν τους απαιτούμενους πόρους και να συντονίσουν τις διαδικασίες παραγωγής για την ολοκλήρωσή τους (Loskyll M et al, 2012).

Η έννοια της Έξυπνης Μηχανής επικεντρώνεται στην αντικατάσταση της παραδοσιακής ιεραρχίας στη παραγωγή από μία αποκεντρωμένη που οργανώνεται από μόνη της παραγωγή με επίκεντρο τα CPS συστήματα. Σε ένα τέτοιο σύστημα ανοικτά δίκτυα και σημασιολογικές περιγραφές επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ των αυτόνομων CPS στοιχείων, ενώ τεχνητή νοημοσύνη σε επίπεδο μονάδας επιτρέπει την επικοινωνία με άλλες συσκευές, μονάδες παραγωγής και προϊόντα που κάνουν τη γραμμή παραγωγής ευέλικτη και αρθρωτή. Αυτό οδηγεί στην αυτο-οργάνωση των μηχανών εντός του δικτύου παραγωγής, την αυτόματη ενσωμάτωση και χωρίς προγραμματισμό ή ακόμα και αντικατάσταση νέων παραγωγικών μονάδων (Zamfirescu CB et al, 2014).

Τέλος, ο Ενισχυμένος Χειριστής ασχολείται με την αυτοματοποίηση των γνώσεων καθιστώντας τη φυσική οντότητα πιο ευέλικτη και προσαρμοστικό μέρος στο σύστημα παραγωγής. Ένας τέτοιος εργαζόμενος έχει μπροστά του τη πρόκληση νέων θέσεων εργασίας όπως ο ορισμός προδιαγραφών, η παρακολούθηση και η επαλήθευση στρατηγικών παραγωγής. Την ίδια στιγμή μπορεί να παρεμβαίνει χειροκίνητα στο αυτόνομο οργανωμένο σύστημα παραγωγής. Του παρέχεται η υποστήριξη μέσα από κινητές, ευέλικτα διασυνδεδεμένες διεπαφές και συστήματα υποστήριξης

φιλικές προς τον χρήστη. Του επιτρέπει να εκπληρώσει τις δυνατότητες και να έχει το ρόλο του στρατηγικά υπεύθυνου για τη λήψη αποφάσεων. Επίσης έχει τη γνώση ευέλικτων μηχανισμών επίλυσης προβλημάτων στη σταδιακά αυξανόμενη τεχνική πολυπλοκότητα (Schmitt M et al, 2013).

2.2 Από πού ξεκίνησε

Η προώθηση των μηχανών, πίσω στη δεκαετία του '70 και του '80 ως το μέλλον της παραγωγής και ως η βασική λύση για την αστάθεια που παρουσιάζει ο ανθρώπινος παράγοντας στη γραμμή παραγωγής, προκάλεσε μεγάλη ανησυχία. Η ανησυχία ήταν ότι τα μηχανήματα-ρομπότ θα είχαν κάποια στιγμή βασικό ρόλο στην παραγωγή και, όπως ήταν αρχικά επιτυχής στη βαριά βιομηχανία, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της αυτοματοποίησης στην υπόλοιπη βιομηχανία. Η αυτοματοποίηση έχει τις ρίζες της στη δεκαετία του '80, όπου η επιθυμία για αποδοτικότητα στη μεταποίηση είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια πολλών χαμηλόμισθων θέσεων εργασίας, πχ μηχανοδηγών, κάτι το οποίο θεωρήθηκε ως το τέλος για τον άνθρωπο στη γραμμή παραγωγής. Σίγουρα τα παραπάνω δεν επαληθεύτηκαν, αν και πολλοί εργάτες έχασαν με το πέρασμα των καιρών τη δουλειά τους (Pereira AC, Romero F., 2017).

Η άνοδος της υπολογιστικής μηχανικής και της ρομποτικής προήλθε από την ανάπτυξη των υπολογιστών, τη πληροφορική, και ημι-έξυπνων ρομπότ αντικαθιστώντας πολλούς εργάτες. Ωστόσο, αυτή η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση είναι η μετάβαση στον ψηφιακό μετασχηματισμό της μεταποιητικής βιομηχανίας -μια συγχώνευση του φυσικού και ψηφιακού κόσμου- που προσφέρει και άλλες δυνατότητες και δεν σημαίνει απαραίτητα συρρίκνωση της βιομηχανίας (Santos K., et al, 2017).



Εικόνα 2: Το συνολικό πλαίσιο του Industry 4.0 IMS (Ray Y. Zhong et al, 2017)

Το Industry 4.0 ξεκίνησε ως μία νέα στρατηγική της Γερμανίας για την μεταπήδηση της Γερμανικής Βιομηχανίας στην εποχή των Ευφυών Παραγωγικών Συστημάτων (Intelligent Manufacturing Systems – IMS). Τα IMS θεωρούνται η επόμενη γενιά βιομηχανοποίησης υιοθετώντας νέα μοντέλα, νέα πρότυπα παραγωγής, νέες μεθοδολογίες για την μεταμόρφωση του παραδοσιακού παραγωγικού μοντέλου σε ένα έξυπνο σύστημα παραγωγής. Πράγματι η Γερμανία έχει διαμορφώσει ένα εθνικό πρόγραμμα κατάρτισης στα λεγόμενα FestoDidactic εργοστάσια. Σε αυτά λειτουργούν CPS συστήματα και πάνω σε αυτά προσφέρεται εκπαίδευση και τεχνική κατάρτιση σε προμηθευτές, πανεπιστήμια, και σχολεία (Ray Y. Zhong et al, 2017).

Η εταιρία GE (General Electric) υιοθέτησε τον όρο «Βιομηχανικό Διαδίκτυο» για να περιγράψει το βιομηχανικό διαδίκτυο των αντικειμένων (Industrial Internet of Things – IIoT) ή αλλιώς Industry 4.0. Το Βιομηχανικό Διαδίκτυο παρέχει έναν τρόπο να βελτιωθεί η εικόνα που υπάρχει για το αποτέλεσμα και την εσωτερική οργάνωση των λειτουργιών και κρίσιμων παραγωγικών στοιχείων μίας παραγωγικής επιχείρησης μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλων μηχανικών αισθητήρων, υπηρεσιών σε επίπεδο εξυπηρετητή (middleware), λογισμικού και υπολογιστικών συστημάτων και συστημάτων αποθήκευσης που είναι διαθέσιμα σε υπολογιστικά κέντρα ή στο υπολογιστικό νέφος (Εικόνα 2). Ως εκ τούτου, παρέχει μια μέθοδο για την εξέλιξη των επιχειρησιακών διαδικασιών ανατροφοδοτώντας τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από την συλλογή μεγάλου συνόλου δεδομένων μέσω προηγμένων αναλυτικών στοιχείων (Ray Y. Zhong et al, 2017).

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά του Industry 4.0

Το Βιομηχανικό Διαδίκτυο είναι η σύνθεση αρκετών βασικών τεχνολογιών. Οι τελευταίες εξελίξεις στις τεχνολογίες των αισθητήρων, για παράδειγμα, συμβάλλουν στο να παράγονται περισσότερα δεδομένα, διαφορετικοί τύποι δεδομένων, με περισσότερα ακρίβεια, αυτογνωσία και δυνατότητα πρόβλεψης για την εναπομένουσα ωφέλιμη ζωή τους. Παρομοίως, οι αισθητήρες πάνω στις παραγωγικές μηχανές διαθέτουν ειδικούς ελεγκτές που μπορούν να αυτο-αναλύσουν, αυτο-προβλέψουν και αυτο-συγκρίνουν, για παράδειγμα τις τρέχουσες ρυθμίσεις παραμέτρων και περιβάλλοντος με προκαθορισμένα βέλτιστα δεδομένα και κατώτατα όρια. Αυτό συμβάλλει στην αυτό-διάγνωση. Η τεχνολογία των αισθητήρων έχει μειωθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια σε κόστος και μέγεθος. Αυτό έκανε τον χειρισμό των μηχανημάτων, διαδικασιών ακόμη και των ανθρώπινου δυναμικού οικονομικά και τεχνικά εφικτό (Pereira AC, Romero F., 2017).

Προηγμένες τεχνικές ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων (bigdataanalytics) αποτελούν επίσης βασικό μοχλό και παράγοντα που βοηθάει στην καλύτερη δυνατή επεξεργασία του ιστορικών δεδομένων, και να προβλέψει για το τι πραγματικά συμβαίνει μέσα σε μια μηχανή ή μια διαδικασία. Οι παραπάνω τεχνικές ανάλυσης και προβλέψεων μπορούν να παράσχουν ακριβή χρονοδιαγράμματα συντήρησης για μηχανήματα και παραγωγικά στοιχεία, διατηρώντας παράλληλα την παραγωγική τους λειτουργία και περιορίζοντας τις αναποτελεσματικές και το κόστος της περιττής συντήρησης. Αυτό επίσης επιταχύνθηκε από την εμφάνιση του υπολογιστικού νέφους (cloudcomputing) την τελευταία δεκαετία, όπου οι πάροχοι υπηρεσιών όπως το Microsoft Azure, Amazon Web Services (AWS) παρέχουν τεράστιες υποδομές υπολογιστών, αποθήκευσης και δικτύωσης που μειώνουν το κόστος της ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων (Pereira AC, Romero F., 2017).

Οι υποστηρικτές του νέου εγχειρήματος του Industry 4.0 ονομάζουν τέσσερα βασικά και ξεχωριστά χαρακτηριστικά (Pereira AC, Romero F., 2017):

1. Κάθετη ολοκλήρωση των έξυπνων συστημάτων παραγωγής

Τα έξυπνα εργοστάσια, τα οποία είναι ουσιαστικά ο πυρήνας του Industry 4.0, δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε αυτόνομη βάση. Υπάρχει ανάγκη για τη δικτύωση έξυπνων εργοστασίων, έξυπνων προϊόντων, και άλλα έξυπνων συστημάτων παραγωγής. Ο βασικός σκοπός της κάθετης ολοκλήρωσης πηγάζει από τη χρήση των CPS συστημάτων τα οποία επιτρέπουν στα εργοστάσια και παραγωγικές μονάδες να αντιδρούν γρήγορα και ευέλικτα στις όποιες παραμέτρους όπως επίπεδα ζήτησης, επίπεδα αποθεμάτων, σφάλματα στις μηχανές και απρόβλεπτες καθυστερήσεις.

Ομοίως, η δικτύωση και η ολοκλήρωση περιλαμβάνουν επίσης υπηρεσίες έξυπνης εφοδιαστικής και μάρκετινγκ ενός οργανισμού καθώς και τις έξυπνες υπηρεσίες του, δεδομένου ότι η παραγωγή είναι προσαρμοσμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εξατομικευμένη και στοχοθετημένη στις απαιτήσεις των πελατών.

2. Οριζόντια ολοκλήρωση μέσω παγκόσμιων δικτύων αλυσίδας αξιών

Η ολοκλήρωση θα διευκολύνει τη δημιουργία και διατήρηση δικτύων που δημιουργούν και προσθέτουν αξία. Ειδικά αυτή μεταξύ επιχειρήσεων και πελατών. Ωστόσο, αυτό θα μπορούσε να σημαίνει και την ολοκλήρωση νέων επιχειρηματικών μοντέλων κατά μήκη και πλάτη χωρών και ηπείρων διαμορφώνοντας ένα παγκόσμιο δίκτυο.

3. Διάφανη υλοποίηση σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας

Ολόκληρη η αλυσίδα αξίας στη βιομηχανία υπόκειται σε αυτό που ονομάζεται διάφανη υλοποίηση, κατά την οποία ο πλήρης κύκλος ζωής του προϊόντος ιχνηλατείται από την παραγωγή έως τη απόσυρση. Σύμφωνα με άλλους μεταποιητικούς κλάδους, την ένδυση για παράδειγμα, το επίκεντρο θα ήταν στη διαδικασία μεταποίησης μόνο, δηλαδή στη διαμόρφωση, πώληση και διανομή του τελικού προϊόντος, ενώ κατόπιν η διαδικασία αδιαφορεί σχετικά με αυτό. Για παράδειγμα, υπάρχει μικρή ανησυχία για το τι συμβαίνει σε ένα παραγόμενο πουκάμισο που έχει ατέλειες, πόσο μάλλον ποιες είναι οι μελλοντικές τάσεις των πωλήσεων, αφότου ο πελάτης το ρίχνει στα σκουπίδια.

Ωστόσο, όταν αναφερόμαστε σε βιομηχανικά στοιχεία, η ποιότητα είναι το επίκεντρο. Συνεπώς, πρέπει η παραγωγή να επικεντρώνεται στην ποιότητα και την ικανοποίηση των πελατών. Έτσι ο παραγωγός πρέπει να δημιουργήσει προϊόντα που να ανταποκρίνονται στις προσδοκίες του πελάτη. Για παράδειγμα, ο ιδιοκτήτης ενός MercedesBenz αυτοκινήτου θα περιμένει ότι έχει παραχθεί από βιομηχανικά στοιχεία με την υψηλότερη δυνατή ποιότητα και συνεπώς θα έχει τη κάθε δυνατή υποστήριξη μετά από κάποιο έλεγχο συντήρησης. Το Industry 4.0 καλύπτει τόσο τη διαδικασία παραγωγής όσο και το συνολικό κύκλο ζωής του προϊόντος.

4. Επιτάχυνση της παραγωγής

Οι επιχειρησιακές δραστηριότητες, ιδίως εκείνες που εμπλέκονται στη παραγωγή κάνουν χρήση πολλών τεχνολογιών, οι περισσότερες δεν είναι καινοτόμες ή ακριβές, και οι περισσότερες από αυτές ήδη υπάρχουν. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω τέσσερα χαρακτηριστικά του Industry 4.0, το νέο πλαίσιο επικεντρώνεται κατά πολύ στην έννοια της αλυσίδας αξίας.

Το παράδειγμα της Toyota

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των παραπάνω αποτελεί η εξέλιξη της γραμμής παραγωγής της Toyota υπό το πρίσμα του Industry 4.0. Έτσι στο παραπάνω μοντέλο ελάχιστης δυνατής παραγωγής που έχει καθιερώσει εδώ και δεκαετίες η Toyota (Εικόνα 3), εφαρμόστηκαν τεχνολογικά στοιχεία του Industry 4.0 για τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων (Dataacquisition and dataprocessing), στην επικοινωνία μεταξύ μηχανών (Machinetomachinecommunication) όπως και στην επικοινωνία ανθρώπινου δυναμικού – μηχανών (Human tomachinecommunication).



Εικόνα 3: Μοντέλο Ελάχιστης Δυνατής Παραγωγής (Lean Manufacturing) της Toyota (Wagner T. et al, 2017)

Ο βαθμός επίδρασης των παραπάνω συνιστωσών του Industry 4.0 στη γραμμή παραγωγής της Toyota φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

	Data Acquisition and Data Processing				Machine to Machine Communication (M2M)		Human-Machine Interaction (HMI)	
	Sensors and Actuators	Cloud Computing	Big Data	Analytics	Vertical integration	Horizontal integration	Virtual Reality	Augmented Reality
5S	+	+	+	+	+	+	++	+++
Kaizen	+	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Just-in-Time	++	++	+++	+++	+++	++	+	++
Jidoka	+	+++	+++	+++	++	++	+	+
Heijunka	++	++	+++	+++	+++	++	++	+
Standardisation	++	+++	+++	+++	++	++	+++	+++
Takt time	+	+	+++	+++	+++	+++	+	+
Pull flow	++	+	+	+	+++	+++	+	+
Man-machine separation	+	+	+	+	+	+	+++	+++
People and teamwork	+	+	+	+	+	+	+++	+++
Waste reduction	+	+	++	+++	+++	+++	+	+

Εικόνα 4: επίδραση των τεχνολογιών και δυνατοτήτων του Industry 4.0 στη γραμμή παραγωγής της Toyota (Wagner T. et al, 2017)

2.4 Θεμελιώδεις αρχές του Industry 4.0

Μία από τις βασικές αρχές του Industry 4.0 είναι η διασύνδεση συστημάτων, μηχανών και παραγωγικών μονάδων προκειμένου να δημιουργηθούν έξυπνα δίκτυα κατά μήκος της αλυσίδας αξίας τα οποία μπορούν να λειτουργούν ξεχωριστά και να ελέγχουν το ένα το άλλο με αυτόνομο αλλά συνεκτικό τρόπο. Το Industry 4.0 χαρακτηρίζεται από έξι αρχές ως προς τον σχεδιασμό του τις οποίες

οι βιομηχανίες και παραγωγικές επιχειρήσεις λαμβάνουν υπόψη τους σε όποιες προσπάθειες αυτοματοποίησης ή ψηφιοποίησης των παραγωγικών τους διαδικασιών (Tjahjono B. et al, 2017).

Διαλειτουργικότητα (Interoperability)

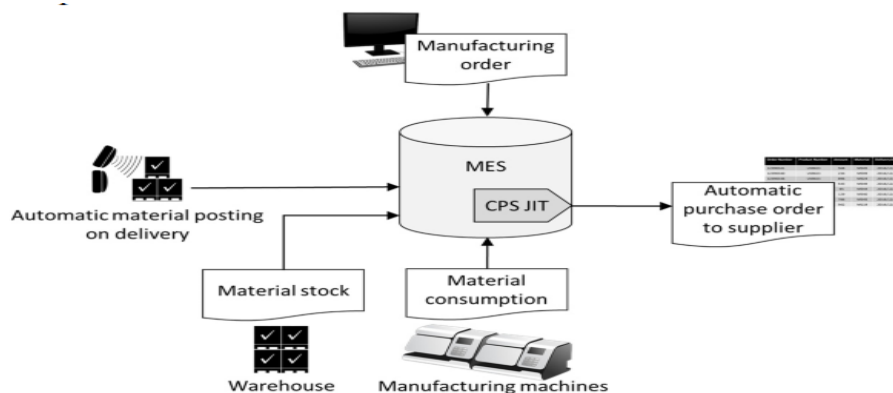
Η διαδικασία παραγωγής δεν ακολουθεί απλώς ένα προκαθορισμένο σύνολο μεθόδων ή βήματα και δεν αφορά μόνο τους ανθρώπους, τις μηχανές και τις διαδικασίες που είναι άμεσα εμπλεκόμενοι. Η διαλειτουργικότητα απαιτεί την αλληλεπίδραση μέσα ένα ολόκληρο περιβάλλον και την ευέλικτη συνεργασία μεταξύ όλων των στοιχείων. Για παράδειγμα, οι σταθμοί συναρμολόγησης δεν ξεχωρίζουν από τα προϊόντα που δημιουργούνται ή από τους ανθρώπους που δουλεύουν πάνω σε αυτούς. Η διαλειτουργικότητα αναφέρεται στη δυνατότητα όλων των οντοτήτων να συνδέονται, επικοινωνούν και να λειτουργούν μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT). Αυτό περιλαμβάνει τους ανθρώπους, τα έξυπνα εργοστάσια και τις σχετικές τεχνολογίες.

Αποϋλοποίηση (Virtualisation)

Η παρακολούθηση των πραγματικών διεργασιών και φυσικών μηχανών πραγματοποιείται στο φυσικό κόσμο και τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες θα είναι διαθέσιμα σε εικονικά μοντέλα ή μοντέλα που δημιουργούνται μέσω προσομοίωσης. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές επί των παραγωγικών διαδικασιών μπορούν τότε να προσαρμόσουν, να αλλάξουν και να δοκιμάσουν αλλαγές ή αναβαθμίσεις σε ένα εικονικό περιβάλλον, χωρίς να επηρεάσουν τις φυσικές διαδικασίες. Οι παραγωγικές επιχειρήσεις στην εγκατάσταση του Industry 4.0 θα χρησιμοποιήσουν τότε ένα «εικονικό δίδυμο» (virtualtwin) του σχεδίου ενός έξυπνου εργοστασίου για να ενισχύσουν σημαντικά τις υπάρχουσες διαδικασίες και προϊόντα δημιουργώντας νέες παραγωγικές διαδικασίες και μειώνοντας το χρόνο δημιουργίας κερδών από τη διαθεσιμότητα νέων προϊόντων.

Αποκέντρωση (Decentralisation)

Το Industry 4.0 υποστηρίζει την αποκέντρωση, η οποία επιτρέπει στα διάφορα συστήματα μέσα στο έξυπνο εργοστάσιο να λαμβάνουν αποφάσεις αυτόνομα, χωρίς να αποκλίνουν από την πορεία προς τον ενιαίο, τελικό οργανωτικό στόχο.



Εικόνα 5: παράδειγμα εφαρμογής Cyber-Physical Συστημάτων σε μοντέλο παραγωγής και διανομής βάση της ζήτησης (Just-In-Time) (Wagner T. et al, 2017)

Δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο (Real-time capability)

Οι προσπάθειες του Industry 4.0 επικεντρώνονται επίσης στην υλοποίηση των πάντων σε πραγματικό χρόνο, κάτι το οποίο απαιτεί τη συλλογή δεδομένων από την παραγωγική διαδικασία, την ανατροφοδότηση και τη παρακολούθηση των διαδικασιών επίσης σε πραγματικό χρόνο.

Για παράδειγμα σε ένα μοντέλο παραγωγής και διανομής βάση της ζήτησης (Just—in-time) η λειτουργία και ο έλεγχος αυτής γίνεται σε τέσσερα βασικά σημεία:

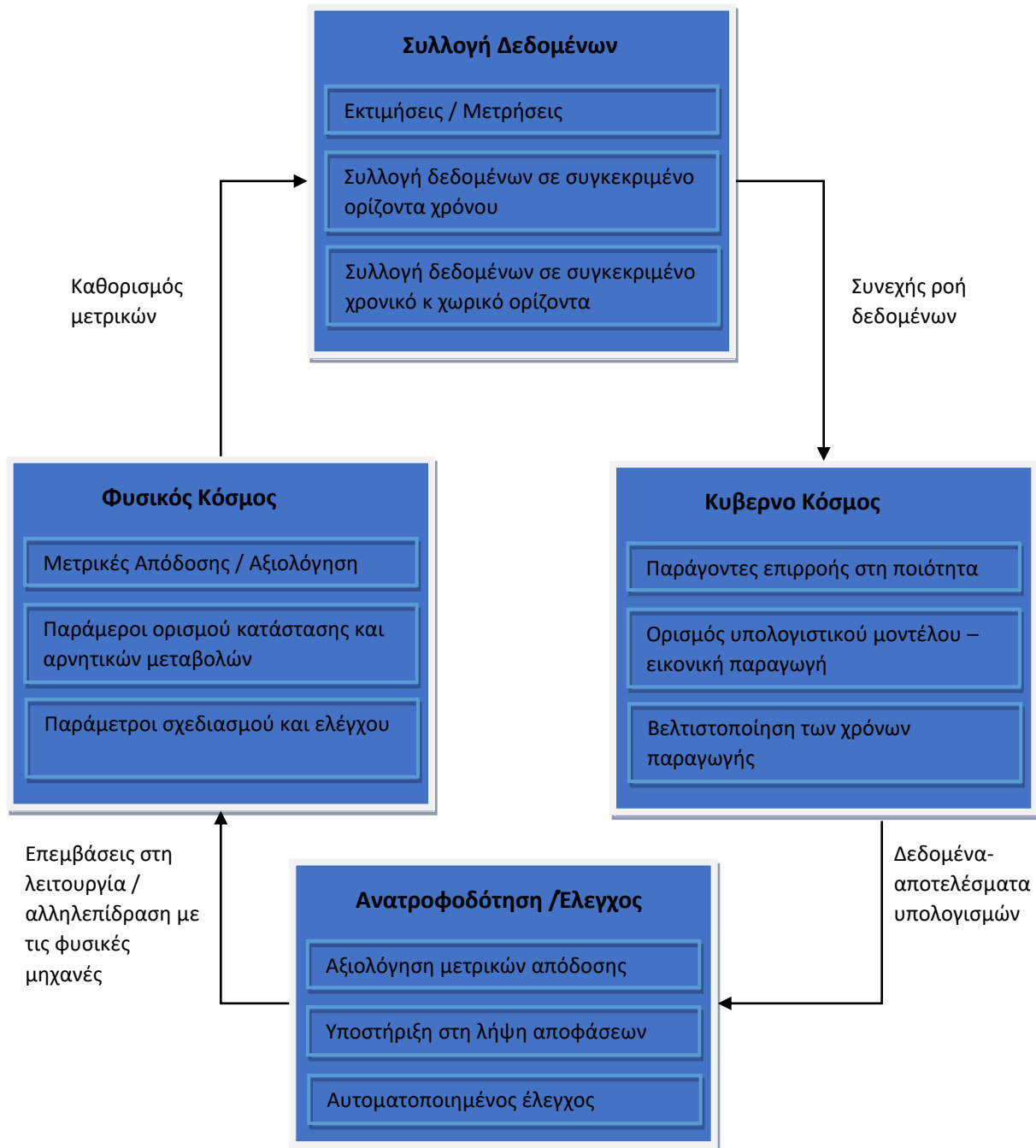
- a. Φυσικός κόσμος: Ο σχεδιασμός και υλοποίηση της ροής των φυσικών υλικών βασίζεται σε παραμέτρους όπως οι βιομηχανικές παραγγελίες, το απόθεμα στην αποθήκη, η κατανάλωση των υλικών και η παράδοση/διαθεσιμότητα των υλικών.
- b. Συλλογή δεδομένων: Η συλλογή εκτελείται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές/τοπολογικές διαστάσεις και επικεντρώνεται στη συγκέντρωση επαρκούς δείγματος.
- c. Κυβερνο-κόσμος: οι παραγωγικές διαδικασίες μοντελοποιούνται σε ένα εικονικό κόσμο που αναπαριστούν τη ροή των υλικών ακόμη και τη παραγγελία των πρώτων υλών.
- d. Ανατροφοδότηση / Έλεγχος: Η διαδικασία ανατροφοδότησης ελέγχεται αυτόματα όπως επίσης και οι αποφάσεις σχετικά με διορθωτικές ενέργειες εκτελούνται αυτόματα, είναι όμως ορατές / προσβάσιμες στο ανθρώπινο δυναμικό.

Υπηρεσιο-Κεντρική Αρχιτεκτονική (Service Orientation)

Το IoT δημιουργεί δυναμικές υπηρεσίες τις οποίες μπορούν προγράμματα ή υπηρεσίες τρίτων να κάνουν χρήση. Συνεπώς, εσωτερικές και εξωτερικές υπηρεσίες θα εξακολουθήσουν να απαιτούνται από τα έξυπνα εργοστάσια, για αυτό και το IoT είναι τόσο σημαντικό συστατικό στοιχείο του Industry 4.0.

Οργάνωση σε ενότητες (Modularity)

Η ευελιξία είναι επίσης μια άλλη βασική αρχή στο σχεδιασμό του Industry 4.0 έτσι ώστε τα έξυπνα εργοστάσια να μπορούν εύκολα να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και τις απαιτήσεις. Σχεδιάζοντας και παράγοντας προϊόντα, γραμμές παραγωγής και παραγωγικά συστήματα, το έξυπνο εργοστάσιο διαθέτει την ευελιξία και την ευκολία της προσαρμογής να μπορεί να αλλάξει κάτι από τα παραπάνω. Με λίγα λόγια, οι παραγωγικές μονάδες θα μπορούν να εξασφαλίσουν ότι θα μπορούν μεμονωμένες γραμμές παραγωγής να αντικατασταθούν, χωρίς να επηρεάσουν τον κορμό της παραγωγής (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: κύκλωμα ελέγχου και επεμβάσεων στη παραγωγή είτε συνολικά ή σε μεμονωμένες μονάδες (Wagner T. et al, 2017)

2.5 Βασικά στοιχεία του Industry 4.0

Εννέα τεχνολογικές τάσεις έχουν προσδιοριστεί ως κύρια εργαλεία για τη διαμόρφωση της βιομηχανικής παραγωγής (M. Rüßmann et al, 2018).



Εικόνα 7: Εννέα τεχνολογίες – καταλύτες εξέλιξης της βιομηχανικής παραγωγής (Industry 4.0) (M. Rüßmann et al, 2018)

1. Ανάλυση Μεγάλου Όγκου Δεδομένων (Big Data Analytics)

Ο τομέας της σύγχρονης μεταποίησης βρίσκεται αντιμέτωπος με την αύξηση του όγκου των δεδομένων από διάφορες πηγές και υπάρχει ανάγκη να συγκεντρωθούν όλα αυτά τα δεδομένα, να ταξινομηθούν και οργανωθούν με συνεκτικό τρόπο και να γίνει χρήση εργαλείων ανάλυσης για την υποστήριξη των διαφόρων αποφάσεων της διοίκησης. Οι επιχειρήσεις δεν έχουν πλέον την πολυτέλεια να αγνοούν τα δεδομένα που εισέρχονται, καθώς θα μπορούσαν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, της ποιότητας και της εξυπηρέτησης, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της παραγωγικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν από τις διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας. Οι μεγάλοι όγκοι δεδομένων θα αναλυθούν σε συσχέτιση μεταξύ τους, προκειμένου να προσδιοριστούν οι φάσεις με περιττές διαδικασίες που μπορούν να εξορθολογιστούν. Οι συσχετίσεις αυτές είναι:

- συνδέσεις που σχετίζονται με αισθητήρες και δίκτυα
- Υπηρεσίες του υπολογιστικού νέφους (cloud computing)
- Εικονικό μοντέλο παραγωγής
- Περιεχόμενο / πλαίσιο παραγωγής
- Κοινή χρήση και συνεργασία μεταξύ ενδιαφερομένων
- Προσαρμογή βάσει κριτηρίων

2. Ρομποτική

Η χρήση ρομπότ στη παραγωγική διαδικασία δεν είναι κάτι το καινοτόμο. Ωστόσο, τα ρομπότ υπόκεινται επίσης σε βελτιώσεις και εξέλιξη. Οι δημιουργοί τους τα σχεδιάζουν να είναι αυτόνομα, αυτόνομα και διαδραστικά, έτσι ώστε να μην είναι πλέον απλά εργαλεία που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο, αλλά να είναι ήδη ενσωματωμένες μονάδες εργασίας που λειτουργούν μαζί με τους ανθρώπους.

3. Προσομοίωση

Σε προηγούμενες φάσεις, αν οι κατασκευαστές ήθελαν να ελέγξουν εάν μια διαδικασία λειτουργεί αποδοτικά και αποτελεσματικά, απαιτούνταν δοκιμές και σφάλματα. Το Industry 4.0 χρησιμοποιεί μηχανισμούς αποαύλοποίησης για τη δημιουργία ψηφιακών δίδυμων που χρησιμοποιούνται για προσομοίωση μοντέλων και δοκιμών. Οι μηχανισμοί προσομοίωσης θα διαδραματίσουν σημαντικότερους ρόλους στη βελτιστοποίηση της παραγωγής, καθώς και τη ποιότητα των μελλοντικών προϊόντων.

4. Οριζόντια και κάθετη ολοκλήρωση συστημάτων

Το να υπάρχουν ολοκληρωμένα λειτουργικά/παραγωγικά και πληροφοριακά συστήματα είναι κάτι στο οποίο στοχεύει το Industry 4.0. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα σενάριο όπου η μηχανική, η παραγωγή, η εμπορία, και η εξυπηρέτηση μετά την πώληση θα είναι στενά συνδεδεμένα. Ομοίως, οι εταιρείες στην αλυσίδα εφοδιασμού επίσης, να είναι πιο ολοκληρωμένες, δημιουργώντας δίκτυα ενσωμάτωσης δεδομένων, συνεργασίες σε επίπεδα αυτοματοποίησης και αλυσίδες αξίας που είναι πλήρως αυτοματοποιημένες.

5. Βιομηχανικό Διαδίκτυο Αντικειμένων

Ενσωματωμένοι μικρο-υπολογιστές και η επέκταση των δικτύων υπολογιστών επιτρέπουν τη σύνδεση μορφοτροπέων (transducers) και συσκευών καθώς αυτό αποτελεί ουσιαστικό μέρος του Industry 4.0. Το βιομηχανικό Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Industrial IoT) θα το καταστήσει εφικτό, καθώς οι μορφοτροπείς και οι νέες συσκευές στο παραγωγικό πεδίο έχουν σχεδιαστεί να είναι συμβατές με το IoT. Είναι εξοπλισμένες με ασύρματη δικτύωση χαμηλής ισχύος για να τους επιτρέψουν να αλληλοεπιδρούν και να επικοινωνούν μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα συνδέονται μέσω πύλης σε ένα επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει πανταχού παρούσα σε όλο το Έξυπνο Εργοστάσιο και την αλυσίδα εφοδιασμού.

6. Κυβερνο-ασφάλεια

Τα βιομηχανικά συστήματα γίνονται όλο και πιο ευάλωτα σε απειλές, όπως αυτό προέκυψε από τις πρόσφατες επιθέσεις κατά βιομηχανικών στόχων τα τελευταία τρία χρόνια. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, πρέπει να θεσπιστούν μέτρα για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο που να αναγνωρίζουν τα νέα τρωτά σημεία και τις προκλήσεις που φέρνει στον βιομηχανικό έλεγχο, διαδικασίες και συστήματα, η σύνδεση με το Διαδίκτυο.

7. Υπολογιστικό Νέφος (CloudComputing)

Οι μεγάλοι όγκοι δεδομένων που εμπλέκονται στο Industry 4.0 σημαίνουν ότι η ανταλλαγή δεδομένων δεν θα είναι μόνο επιθυμητή αλλά επιτακτική ανάγκη για να αξιοποιηθούν οι πλήρεις δυνατότητες του μέσα στην αξιακή αλυσίδα. Ωστόσο, λίγες μονάδες παραγωγής θα έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης και ανάλυσης τεράστιου όγκου δεδομένων που συλλέγονται. Παρόλα αυτά, οι πάροχοι υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους έχουν την ικανότητα και μπορούν να δημιουργήσουν ιδιωτικά δίκτυα υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους κατάλληλα για την αποθήκευση και επεξεργασία παραγωγικών δεδομένων.

8. Προσθετική Κατασκευή

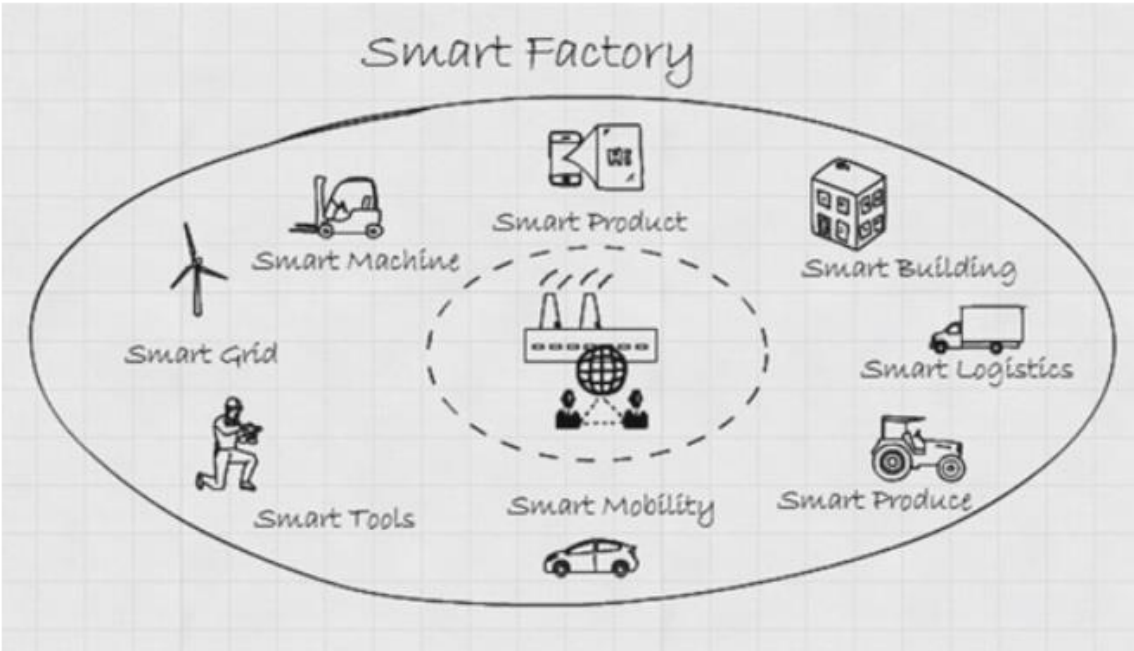
Η προσθετική κατασκευή όπως η εκτύπωση τρισδιάστατων (3D) αντικειμένων επιτρέπει στους κατασκευαστές να σχεδιάζουν πρωτότυπα και μοντέλα νέων ιδεών, τα οποία μειώνουν σημαντικά τον σχεδιαστικό χρόνο και προσπάθεια. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει επίσης την παραγωγή σε μικρές παρτίδες προϊόντων που είναι προσαρμοσμένα σε ομάδες προτιμήσεων και προσφέρουν περισσότερη αξία στους πελάτες ή τους τελικούς χρήστες, μειώνοντας παράλληλα το κόστος και την αναποτελεσματικότητα του κατασκευαστή.

9. Επαυξημένη Πραγματικότητα (AugmentedReality)

Οι επιχειρήσεις προσπαθούν όλο και περισσότερο να μειώσουν τα έξοδα συντήρησης και κατάρτισης που σχετίζονται με την παραγωγή, το μάρκετινγκ και την υποστήριξη μετά την πώληση. Οι κατασκευαστές στρέφονται προς συστήματα που βασίζονται στην επαυξημένη πραγματικότητα για να βελτιώσουν τις διαδικασίες συντήρησής τους, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος της παρουσίας ειδικών συμβούλων στο χώρο τους.

2.6 Έξυπνο Εργοστάσιο

Ένα Έξυπνο Εργοστάσιο (Smart Factory) φιλοξενεί έξυπνες διαδικασίες παραγωγής έχοντας ως βασικά συστατικά του όσα περιγράψαμε στη προηγούμενη ενότητα και υπόσχοντας σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά τους δείκτες αποδοτικότητας και παραγωγικότητας (A. Gilchrist, 2016).



Εικόνα 8: Έξυπνο Εργοστάσιο (Smart Factory) (A. Gilchrist, 2016)

Για τη καλύτερη κατανόηση του τρόπου που λειτουργεί ας πάρουμε ως παράδειγμα μια γραμμή παραγωγής με διαφορετικές γραμμές σαμπουάν. Σε αυτό το σενάριο γραμμής παραγωγής, ένα έξυπνο μηχάνημα γεμίζει κάθε φιάλη με τα ίδια βασικά συστατικά. Κάθε παραλλαγή της μάρκας μπορεί να έχει διαφορετικά πρόσθετα χρώματος ή αρώματος που προστίθενται για να καταλήξει σε ένα αποτέλεσμα ανάλογο με τα προϊόντα που προορίζονται για την καταναλωτική αγορά.

Στην παραδοσιακή βιομηχανική παραγωγή, αυτό θα απαιτούσε μια γραμμή παραγωγής για καθένα μεμονωμένο προϊόν. Η διαδικασία παραγωγής καθορίζει ότι κάθε φιάλη θα αποσταλεί σε μια γραμμή παραγωγής με μια μηχανή διανομής, η οποία θα γεμίσει τη φιάλη με το απαιτούμενο μείγμα συστατικών όπως απαιτείται. Ωστόσο, αν η εταιρία έχει πολλές δευτερεύουσες διαφοροποιήσεις της μάρκας σαμπουάν τότε αυτό είναι εξαιρετικά αναποτελεσματικό καθώς πολλές μηχανές κάνουν την ίδια δουλειά. Η πρόκληση είναι να μπορεί η παραγωγική μονάδα να προσδιορίσει τη κάθε ποικιλία του προϊόντος που έρχεται κατά μήκος της γραμμής και να γεμίζει όπως απαιτείται.

Αυτή είναι μια από τις βάσεις που θέτει η Έξυπνη Βιομηχανική Παραγωγή, επειδή μπορεί να μειώσει το κόστος και τον χρόνο με τον δυναμικό καθορισμό των προϊόντων πάνω στη γραμμή παραγωγής, τον προσδιορισμό της φάσης παραγωγής την οποία διανύουν και ποια πρέπει να διανύσουν μετά, καθώς και το ιστορικό τους. Το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς τρόπους (Shiyong Wang et al, 2016).

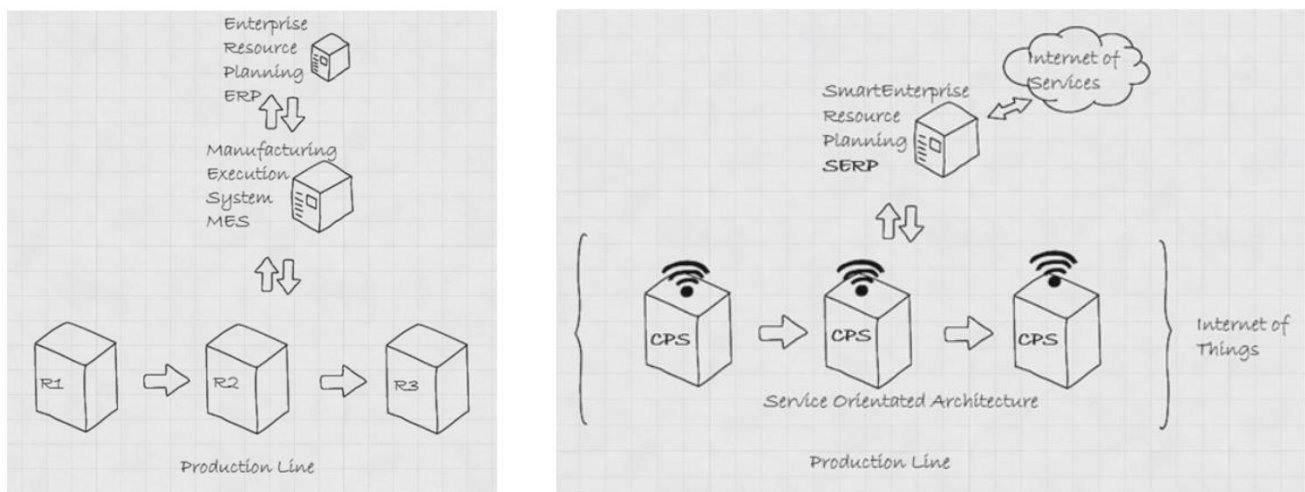
Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ετικέτες RFID που είναι μικροσκοπικές και ενσωματώνονται σε μια ετικέτα ή να χρησιμοποιηθείτε τεχνολογία NFC (κοντά στην επαφή συχνότητας) όπως σε συστήματα πληρωμών με κάρτα. Το NFC είναι περισσότερο εύθραυστο και απαιτεί στενή εγγύτητα στον αναγνώστη, ενώ το RFID έχει σημαντικές δυνατότητες και αντοχές. Με τη χρήση RFID, κάθε προϊόν γνωρίζει τι είναι, πόσο χρονών είναι, και ποιο είναι το επόμενο στάδιο παραγωγής που ακολουθεί. Μπορεί επίσης να φέρει πολύ περισσότερες πληροφορίες όπως ιδανικές

συνθήκες αποθήκευσης ή μεθόδους χειρισμού οι οποίες είναι επωφελείς όχι μόνο για τη διαδικασία παραγωγής αλλά και ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος.

Το παρακάτω σχήμα - Εικόνα 9 - δείχνει τις διαφορές ανάμεσα στο παραδοσιακό μοντέλο παραγωγής και το αντίστοιχο στο νέο μοντέλο του Έξυπνου Εργοστασίου.

Στο παραδοσιακό μοντέλο παραγωγής, η παραγωγή του σαμπουάν θα απαιτούσε τρεις πόρους, μία μονάδα ελέγχου, το σύστημα εκτέλεσης της παραγωγής (MES), και το σύστημα διαχείρισης πόρων και λειτουργιών (ERP). Ο πρώτος πόρος R1 παράγει και αποθηκεύει τα βασικά συστατικά. Ο δεύτερος πόρος R2 λαμβάνει μια ελεγχόμενη ποσότητα από το βασικό υγρό, το οποίο αναμιγνύεται με παραλλαγές συγκεκριμένων πρόσθετων χρωμάτων, αρώματα, και χημικά / θρεπτικά συστατικά. Ο πόρος R3 δέχεται το μείγμα από το R2 και γεμίζει την κατάλληλη φιάλη. Το σύστημα ERP ελέγχει το επίπεδο παραγωγής παρακολουθώντας ταυτόχρονα τις παραγγελίες μέσω του δικτύου πωλήσεων, τις αλυσίδες μεταπωλητών και τα σούπερ μάρκετ. Με τον τρόπο αυτό καθορίζει τις οδηγίες προς το MES για την παραγωγή των κατάλληλων ποσοτήτων ανά είδος. Το MES κινεί την παραγωγή για να εκπληρώσει τις παραγγελίες και παρέχει ανατροφοδότηση για την κατάσταση στη παραγωγή προς το σύστημα ERP.

Εξετάζοντας μερικές από τις αδυναμίες του παραδοσιακού μοντέλου, η πρώτη αδυναμία βρίσκεται στην σειριακή γραμμή παραγωγής και συγκεκριμένα στο βαθμό που αν αποτύχει ένας πόρος, τότε ολόκληρη η γραμμή παραγωγής αποτυγχάνει. Δεύτερον, οποιαδήποτε αποτυχία στο ERP ή στο MES θα εμποδίσει επίσης την παραγωγή. Η επέκταση ή η αναδιάρθρωση της γραμμής παραγωγής είναι δύσκολη λόγω των δυσκολιών διασύνδεσης μεταξύ του MES και των πόρων, καθώς μπορεί να υπάρχουν εκατοντάδες επιλογές διασύνδεσης. Ομοίως, η διασύνδεση με το σύστημα ERP μπορεί να είναι πολύπλοκη λόγω της μονολιθικής αρχιτεκτονικής τους. Τρίτον, αν και είναι πολύ επιθυμητό, δεν είναι πάντα εφικτό να ενημερώνεται το σύστημα ERP σε πραγματικό χρόνο από το MES για την κατάσταση της παραγωγής, για παράδειγμα, για τον αριθμό των φιαλών που παράχθηκαν και την υπόλοιπη ποσότητα για να ολοκληρωθεί μια παραγγελία.



Εικόνα 9: παραδοσιακή γραμμή παραγωγής έναντι γραμμής παραγωγής έξυπνου εργοστασίου (A. Gilchrist, 2016)

Το μοντέλο του Industry 4.0 μπορεί να μετριάσει ορισμένες, αν όχι όλες, από αυτές τις αδυναμίες. Ο τρόπος λειτουργίας του Industry 4.0 είναι ότι οι πόροι του προηγούμενου παραδείγματος αντικαθίστανται από μονάδες CPS. Με τις μονάδες αυτές η αυστηρή σειριακή γραμμή δεν είναι πλέον σταθερή. Γίνεται ευέλικτη καθώς οι μονάδες CPS είναι ευφυείς και διαδραστικές. Οι μονάδες CPS έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες και μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων ραδιοζεύξεων, πράγμα που επιτρέπει σε ένα CPS να αναλάβει τα καθήκοντα ενός άλλου CPS που παρουσίασε σφάλμα.

Η δυνατότητα αυτή των CPS αυτοδιάγνωσης και ελέγχου της κατάστασης στη γραμμή παραγωγή και στη συνέχεια να μπορούν να λάβουν κατάλληλη συνεργατική δράση, παρέχει βελτιωμένη διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα. Επιπλέον, επειδή τα CPS διασυνδέονται μεταξύ τους απευθείας, δεν απαιτούν ένα σύστημα MES και έτσι παραλείπεται ένα άλλο πιθανό σημείο αποτυχίας. Το πιο σημαντικό είναι ότι η κατάργηση του MES μετριάζει τα προβλήματα με αναντιστοιχία διασύνδεσης και επαναπαραμετροποίησης που ήταν ένα σημαντικό νευραλγικό σημείο με την προηγούμενη τοπολογία (Shiyong Wang et al, 2016).

Στο νέο μοντέλο, το προϊόν είναι επίσης έξυπνο. Για παράδειγμα, τα μπουκάλια σαμπουάν είναι εφοδιασμένα με ετικέτες RFID, οι οποίες προσδιορίζουν ποια μάρκα και παραλλαγή είναι και τη κατάσταση της παραγωγής (το ιστορικό παραγωγής μέχρι σήμερα), καθώς και το επόμενο στάδιο για την ολοκλήρωση της παραγωγής του. Επιπλέον, η ευφυΐα του προϊόντος εκτείνεται πέρα από τη γραμμή παραγωγής και το έξυπνο εργοστάσιο, στην αποθήκη και αργότερα στην αλυσίδα μεταπωλητών. Επιπλέον, η ευφυΐα του προϊόντος παραμένει ενεργή ακόμη και στην υπηρεσία του πελάτη. Για παράδειγμα, στη περίπτωση κατασκευής ενός κινητήρα, ο έξυπνος κινητήρας θα μπορούσε κατά τη διάρκεια της παραγωγικής του ζωής να παρέχει αυτό-διάγνωση και προειδοποίηση προς τον πελάτη ή το τμήμα εξυπηρέτησης για τη κατάσταση συντήρησης και ακόμη και πρόβλεψη βλάβης ενός εξαρτήματος. Αυτό είναι σημαντική αλλαγή στον κύκλο συντήρησης και εξυπηρέτησης του τελικού καταναλωτή με σκοπό την αποφυγή της διακοπής της υπηρεσίας και πολύ καλύτερη εμπειρία.

Αντίστοιχα το παραδοσιακό ERP εξελίσσεται σε έξυπνο ERP (SERP) και επικοινωνεί απευθείας με τις μονάδες CPS, και ελέγχει την παραγωγή προϊόντων για την εκπλήρωση των βιβλίων παραγγελιών. Είναι απευθείας συνδεδεμένο και επομένως μαθαίνει σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση της παραγωγής, την κατάσταση των CPS και άλλα δεδομένα από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο. Το SERP χρησιμοποιεί κατόπιν δικές του βάσεις δεδομένων εντός μνήμης για συνεχείς αναλύσεις των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (analytics) για να επιτρέψουν την επιχείρηση να τρέχει διαδικασίες γρηγορότερα και καλύτερα (Dmitry Ivanov et al, 2016).

2.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα του νέου βιομηχανικού μοντέλου είναι (A. Gilchrist, 2016):

- Επιτυγχάνονται μεγαλύτερα κέρδη για τις επιχειρήσεις μέσω της αύξησης της λειτουργικής απόδοσης και της επιτάχυνσης της παραγωγικότητας, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη

μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και συνεπώς των κερδών.

- Έχει επίσης χαρακτηριστεί ως «δύναμη του 1%», καθώς όπως στις περισσότερες βιομηχανίες απαιτείται η εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους/μείωση της αναποτελεσματικότητας κατά 1% για να προκύψουν τεράστια οφέλη, έτσι και στο IIoT απαιτείται 1% για να επιτευχθούν σημαντικά κέρδη. Για παράδειγμα, στην αεροπορία, η εξοικονόμηση καυσίμων κατά 1% ετησίως σχετίζεται με εξοικονόμηση 30 δισεκατομμυρίων δολαρίων (Santos K., et al, 2017).

Επιπλέον, οι παραγωγοί σε χώρες με υψηλούς μισθούς που για πολλά χρόνια θεωρούσαν οικονομικά πιο αποδοτικό να αναθέτουν την παραγωγή στην Κίνα, την Ινδία, τη Βραζιλία, τη Ρωσία ή τις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης, θα είναι πλέον σε θέση να υιοθετήσουν μια διαφοροποιημένη προσέγγιση. Το Industry 4.0 θα καταστήσει την παραγωγή σε ανεπτυγμένες χώρες πολύ πιο οικονομικά αποδοτική και θα μετριάσει το πλεονέκτημα των χαμηλών μισθών των ανταγωνιστών. Χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γαλλία μπορούν να αρχίσουν να επαναπατρίζουν τις βιομηχανίες τους και μεγάλο μέρος της παραγωγής που έχουν αναθέσει σε εξωτερικούς συνεργάτες στο εξωτερικό.

Οι αναπτυσσόμενες χώρες με χαμηλούς μισθούς που είχαν επικεντρωθεί στη χειροκίνητη παραγωγή θα χάσουν αναπόφευκτα βραχυπρόθεσμα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η Κίνα και η Ινδία έχουν αναγνωρίσει τη σημασία του Industry 4.0 και έχουν δεσμευτεί να αλλάξουν μέσω πρωτοβουλιών τύπου "Made in China" και "Made in India".

Ένα από τα μειονεκτήματα που πρέπει να αντιμετωπίσει ο σύγχρονος κόσμος με τον ερχομό του νέου μοντέλου παραγωγής είναι το γεγονός ότι το εργατικό δυναμικό σε πολλές θέσεις της παραγωγής θα αντικατασταθεί από ρομπότ. Η αυτοματοποίηση αντικαθιστά όχι μόνο την απλή εργασία, αλλά και τους εξειδικευμένους εργαζόμενους όπου οι δυνάμεις της αγοράς έχουν αντικαταστήσει τις ειδικευμένες θέσεις εργασίας με λογισμικό. Μία σταδιοδρομία στην ανάπτυξη λογισμικού ήταν μέχρι πρόσφατα κάτι που προωθούσαν σημαντικά τα πανεπιστήμια ως εργασία του μέλλοντος. Διαφαίνεται ότι όλοι αυτοί οι απόφοιτοι θα είναι τώρα μπροστά από την ουρά αυτοματισμού.

Είναι αλήθεια ότι το εργατικό δυναμικό της εργασίας θα μειωθεί αλλά και το υπάρχον θα πρέπει να προσαρμοστεί στις επόμενες απαιτήσεις. Οι επιχειρήσεις θα απαιτήσουν αναλυτές δεδομένων, επιστήμονες ειδικευμένους στην ανάπτυξη αλγορίθμων που θα διαμορφώνουν την στρατηγική της εταιρείας. Είναι σημαντικό να συλλέγονται τεράστιοι όγκοι επιχειρησιακών δεδομένων, αλλά αν δεν μπορούμε να διατυπώσουμε τις σωστές ερωτήσεις και να έχουν νόημα οι επιστρεφόμενες απαντήσεις τότε η παραπάνω επένδυση δεν ωφελεί. Κατά συνέπεια, μειώνοντας τον αριθμό του χαμηλόμισθου προσωπικού που κάνει χειρωνακτική εργασία θα είναι λειτουργικά επωφελής βραχυπρόθεσμα, αλλά οποιοδήποτε βραχυπρόθεσμο όφελος θα ισοζυγιστεί από το κόστος των προσλήψεων έμπειρου επιστημονικού προσωπικού που θα διαμορφώσει την ψηφιακή εποχή.

3. DigitalTwin

3.1 Εισαγωγή

Η χρήση του όρου «Twin» χρησιμοποιήθηκε από τη NASA κατά τη διάρκεια του προγράμματος Apollo, όπου τουλάχιστον δύο ίδια διαστημικά οχήματα κατασκευάζονταν για κάθε αποστολή ώστε να προσομοιώνονται οι συνθήκες πτήσεις του διαστημικού οχήματος κατά τη διάρκεια της αποστολής του στο δεύτερο όχημα στο έδαφος. Το διαστημικό όχημα στο έδαφος ονομαζόταν δίδυμο «Twin». Το δίδυμο αυτό όχημα χρησιμοποιούνταν εκτενώς για εκπαίδευση κατά την προετοιμασία της πτήσης. Επίσης κατά τη διάρκεια της αποστολής, χρησιμοποιούνταν για να προσομοιώσει εναλλακτικές λύσεις με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα πτήσης και να βοηθήσει τους αστροναύτες σε τροχιά να λάβουν σωστές και ακριβείς κατά το δυνατό αποφάσεις σε κρίσιμες καταστάσεις (A. Lyer, 2017).

Ο όρος "Digital Twin" αναπτύχθηκε ευρύτερα από τη NASA για να περιγράψει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης ενός οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, το ιστορικό του στόλου και άλλα δεδομένα με σκοπό να απεικονίσει τη ζωή και τη συμπεριφορά του αντίστοιχου υπτάμενου δίδυμου. Όπως είναι προφανές, το κύριο πεδίο εφαρμογής του αρχικού ορισμού του "Digital Twin" ήταν να αντικατοπτρίζει τη ζωή των αεροσκαφών με μια σειρά ολοκληρωμένων υπο-μοντέλων, λαμβάνοντας υπόψη τα ιστορικά δεδομένα και τα δεδομένα αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένων και αυτών των αλληλεπιδράσεων του οχήματος με τον πραγματικό κόσμο.

Στη συνέχεια σε ερευνητικά έργα που πραγματοποιήθηκαν το ίδιο έτος, προέκυψαν και άλλες πτυχές όπως η εκτίμηση του κύκλου ζωής, ο έλεγχος κάλυψης των απαιτήσεων της αποστολής καθώς και η χρήση του "Digital Twin" για προγνωστικές και διαγνωστικές δραστηριότητες, που από τότε παρέμειναν βασικά χαρακτηριστικά της έννοιας. Λίγο αργότερα το 2013 αναφέρθηκαν ερευνητικά έργα επάνω στο "Digital Twin" στο τομέα της παραγωγής. Συγκεκριμένα, οι Lee και οι συνεργάτες το προσδιόρισαν ως το εικονικό αντίγραφο των παραγωγικών πόρων, και όχι μόνο του προϊόντος, που θέτει τη βάση για μια συζήτηση για το ρόλο του "Digital Twin" σε προηγμένα περιβάλλοντα βιομηχανικών κατασκευών, και δη στο νέο πλαίσιο που εισάγει το Industry 4.0 με τις τεχνολογίες αιχμής του πυρήνα του, ανάλυση μεγάλων δεδομένων σε υποδομές υπολογιστικού νέφους (A. Lyer, 2017).

Το 2015 με το έργο του Rios και των συναδέλφων του, δόθηκε ένας γενικότερος ορισμός του DT ανοίγοντας περαιτέρω το δρόμο για τη χρήση μιας τέτοιας έννοιας σε άλλους τομείς και όχι μόνο σε αυτόν της αεροδιαστημικής. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό ως "Digital Twin" εννοούμε ένα προϊόν-ψηφιακό αντίγραφο ενός φυσικού προϊόντος (T. Uhlemann et al).

3.2 Εφαρμογές του Digital Twin

Για τη καλύτερη επεξήγηση της εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνολογίας δίνεται το ακόλουθο παράδειγμα: Ο εργαζόμενος Χ παρακολουθεί μια κεφαλή τρυπανιού σε λειτουργία, σε μια πλατφόρμα γεώτρησης για να προσδιορίσει τη μετρική MTBF (μέση χρονική περίοδος μεταξύ αποτυχίας) και να υπολογίσει τον χρόνο αντικατάστασης και έτσι να αποτρέψει την διακοπή της λειτουργίας της μηχανής (S. Palit, A. Datta , 2017).

Η κάμερα στην άκρη της κεφαλής του τρυπανιού και οι αισθητήρες του τρυπανιού (π.χ. για δόνηση, θερμοκρασία, γυροσκόπιο, μέτρηση επιτάχυνσης) μεταδίδουν (ενσύρματα, ή ασύρματα) βίντεο, ήχο και άλλα δεδομένα τα οποία πρέπει να αναλυθούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα σε πραγματικό χρόνο και σε σχέση με τον εντοπισμό αντικειμένων, την γεωγραφική ακρίβεια και τη συσχέτιση μεταξύ διεργασιών. Τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων βασισμένες σε Τεχνητή Νοημοσύνη ενημερώνουν τις τιμές της μετρικής MTBF. Ανάλογα με το εύρος τιμών MTBF και σε βαθμό εμπιστοσύνης 80% - 90% όπως αποφασίζεται από την επιχειρησιακή λογική (για το πότε πρέπει να αντικατασταθεί), η αλυσίδα εφοδιασμού ανταλλακτικών (πχ της κεφαλής του τρυπανιού) πρέπει να συνδεθεί με τη παραπάνω διαδικασία για να ενεργοποιήσει μία νέα «παραγγελία» - αντικατάσταση όταν η τιμή MTBF ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο.

Τις εντολές αγοράς (προμήθειας) ακολουθούν η μεταφορά και η υλικοτεχνική υποστήριξη για την παράδοση και τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού, προκειμένου να εκτελεστεί η αντικατάσταση πριν από τη θραύση της κεφαλής (πληρωμή, σύμβαση, τιμολόγηση και λογιστικές πράξεις πρέπει να ενταχθούν και να εκτελεστούν). Τα δεδομένα για την κεφαλή του τρυπανιού και ο χρόνος καθυστέρησης για κάθε διαδικασία / λειτουργία συγκεντρώνονται από την ομάδα διαχείρισης των λειτουργιών σε μία απομακρυσμένη τοποθεσία. Εκεί πραγματοποιούν επίσης και εκ των υστέρων περαιτέρω συγκεντρωτικές μελέτες ή συλλογικές αξιολογήσεις.

Το ερώτημα που προκύπτει στο παραπάνω σενάριο είναι αν μπορούμε να απεικονίσουμε ολόκληρη αυτή τη διαδικασία από άκρη σε άκρη ως «ψηφιακό δίδυμο» (παραγωγή – εφοδιαστική αλυσίδα) που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο.

Στον υφιστάμενο τρόπο λειτουργίας των παραγωγικών υποδομών, η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει πληθώρα λειτουργικών σιλό (λειτουργικά αντικείμενα, λειτουργία γεώτρησης, μηχανολογικά συστήματα, αλυσίδα εφοδιασμού, χρηματοδότηση, ανθρώπινο δυναμικό), λογισμικό (συνδεσιμότητα μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών, υποδομή υπολογιστικού νέφους, κυβερνοασφάλεια), ανταλλακτικά, παραγωγική υποδομή (πχ. Τρυπάνι), αλλά και υπολογιστικό υλικό / διακομιστές σε διαφορετικές τοποθεσίες που είναι απαραίτητες για την υποδομή πληροφορικής).

Η εφαρμογή της έννοιας του DigitalTwin στο παραπάνω υποθετικό σενάριο σημαίνει ότι η ροή δεδομένων, διαδικασιών και αποφάσεων καταγράφεται σε ένα avatar λογισμικού που μιμείται τη παραγωγική λειτουργία, δηλαδή παρουσιάζεται ως το ψηφιακό αντίγραφο (proxy) της φυσικής παραγωγικής διαδικασίας. Η τρισδιάστατη "twin" έκδοση του ψηφιακού αντίγραφου μπορεί να απεικονιστεί στην οθόνη του αναλυτή ή διαχειριστή που μπορεί να είναι ένας υπολογιστής ή ένα κινητό τηλέφωνο. Προβάλλοντας στη συσκευή μία σχηματική απεικόνιση και γράφοντας τη λέξη "κεφάλι τρυπανιού" μπορεί τότε το κινητό να συνδεθεί με την κάμερα του τρυπανιού σε ένα νέο παράθυρο ξεκινώντας μία ζωντανή αναμετάδοση της λειτουργίας του (S. Palit, A. Datta , 2017).

Διάφορα πεδία δεδομένων και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το τρυπάνι που λειτουργεί εκείνη τη στιγμή (πίεση, ροπή, βάθος, θερμοκρασία, περιστροφή) εμφανίζονται στην οθόνη κάνοντας κλικ στο εικονίδιο για το τρυπάνι. Μια γραφική παράσταση που δείχνει τα δεδομένα και τη μέτρηση MTBF μπορεί να παρουσιαστεί χρησιμοποιώντας μια εντολή (ή πατώντας ένα εικονίδιο "δεδομένα σχεδίου"). Δείχνει πώς τροφοδοτούν τα δεδομένα του ζωντανού αισθητήρα τη δυναμική γραφική παράσταση, εμφανίζοντας τα χαρακτηριστικά της κεφαλής διάτρησης και τον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται το MTBF. Το εύρος τιμών του μπορεί να οριστεί από τον χρήστη (ή το σύστημα) χρησιμοποιώντας τιμές βάσει προδιαγραφών ή προβλέψεων από εργαλεία μηχανικής μάθησης που λειτουργούν σε "διαγνωστικό" τρόπο λειτουργίας.

Με τον τρόπο αυτό η εφαρμογή του Digital Twin:

- επιτρέπει την πραγματοποίηση αναλύσεων ("τι γίνεται αν"): ο αναλυτής μπορεί να δει στο DT τι θα γίνει αν αλλάξει το εύρος τιμών του MTBF και να διερευνήσει πώς οι μεταγενέστερες διαδικασίες μπορούν να αλλάξουν. Το ψηφιακό αντίγραφο για την αλυσίδα εφοδιασμού θα πρέπει να ενεργοποιηθεί, παρουσιάζοντας χρόνους υστέρησης της παράδοσης από διαφορετικούς προμηθευτές και κόστος κανονικής έναντι ταχείας παράδοσης.
- Η σύνθεση του κράματος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της κεφαλής διάτρησης πρέπει να είναι ορατή. Ο αναλυτής μπορεί να χρησιμοποιήσει μια διαδικασία επιλογής βάσει διαφόρων κριτηρίων και να προσδιορίσει έναν νέο προμηθευτή. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να ενεργοποιήσει τη ροή εκκίνησης της διαδικασίας ειδοποίησης του προσωπικού (βάσει ρόλων) στην πορεία υλοποίησης της απαίτησης και δημιουργίας εντολής αγοράς προς τον νέο προμηθευτή.
- Θα πρέπει να μπορεί να επαληθεύσει αυτόματα τον νέο προμηθευτή για να ελέγξει τα διαπιστευτήρια, το απόθεμα, το κόστος, τον προγραμματισμό των μεταφορών, τις εκθέσεις ποιότητας των υπηρεσιών και τις αξιολογήσεις πελατών από προηγούμενες συμβάσεις.
- Χρησιμοποιώντας μια διαφορετική εφαρμογή, επιλέγεται ένας προμηθευτής για τον σχεδιασμό και την εκτύπωση σε 3D μίας κεφαλής τρυπανιού που να ταιριάζει με ακρίβεια στο προηγούμενο ανταλλακτικό. Ο προμηθευτής έχει πρόσβαση στο βίντεο (από το υπολογιστικό νέφος) του τρυπανιού. Ο διαχειριστής που παρακολουθεί την αλυσίδα από άκρο σε άκρο:
 - επιλέγει την ομάδα μηχανικών που θα αντικαταστήσει το τρισδιάστατο τρυπάνι χρησιμοποιώντας ένα μενού διαχείρισης ανθρώπινου δυναμικού (HR) που αναφέρει τα σύνολα δεξιοτήτων, τις ικανότητες και τα έτη εμπειρίας κατά κατηγορία
 - επιλέγει το ψηφιακό δίδυμο για να ενεργοποιήσει τη διαδικασία αντικατάστασης της αλυσίδας εφοδιασμού, όταν η μετρική MTBF φτάσει στο 72%, διότι η εκπλήρωση διαρκεί 21 ημέρες και μέχρι τότε (δηλαδή 21 ημέρες αργότερα) το MTBF προβλέπεται να φτάσει στο 85% (πάνω από αυτή τη τιμή θα σημαίνει άμεση αντικατάσταση).

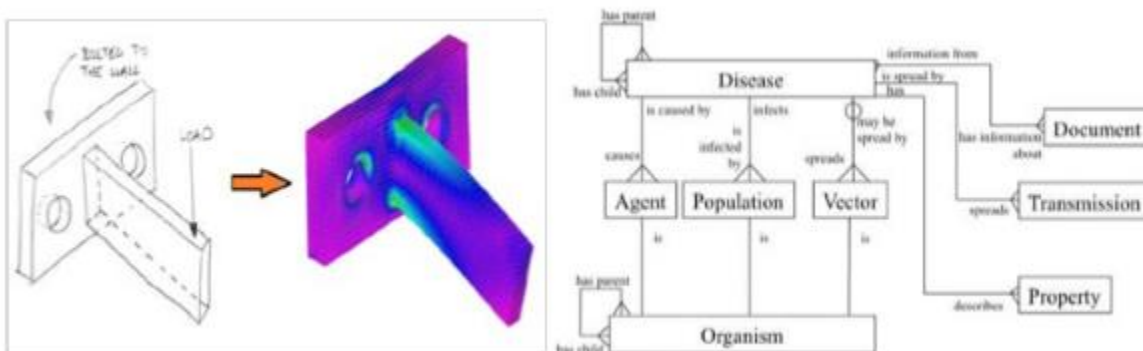
Κάθε τμήμα της παραγωγικής μονάδας πρέπει να συνεργάζεται και να συγχρονίζει (το σύστημα, τα πρότυπα, τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα) την αναπαράσταση της λειτουργίας τους στο ψηφιακό τους αντίγραφο σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Ο σχεδιασμός του περιεχομένου προς αναπαράσταση και η συνδεσιμότητα μεταξύ φυσικών και ψηφιακών συστημάτων απαιτεί νέες αρχές υλοποίησης βάσει μοντέλου, ενσωμάτωσης νέων προτύπων και αρχιτεκτονικών για την προώθηση ενός νέου ψηφιακού υποδείγματος σχεδιασμού.

Τα νέα μοντέλα ενθαρρύνουν την εφαρμογή της τεχνολογίας IoT με βάση νέα πρότυπα ψηφιακού σχεδιασμού, τη διαλειτουργικότητα μεταξύ προτύπων και την ύπαρξη κυβερνοασφάλειας κατά απαίτηση. Τα σιλό των παραγωγικών αντικειμένων (OT), της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών πρέπει να συγκλίνουν για να δημιουργήσουν αυτή τη νέα βάση ψηφιακής σχεδίασης των ψηφιακών διδύμων ή των ψηφιακών εκπροσώπων.

3.3 Βασικές συνιστώσες του DigitalTwin

Η ταχεία διάχυση του DigitalTwin απαιτεί νέα μοντέλα σε επίπεδο οντοτήτων και ανοικτού κώδικα που να ορίζουν τα υποσυστήματα (μονάδες) μίας παραγωγής. Κάθε υποσύστημα περιλαμβάνει τμήματα με διάφορες μονάδες ή αλλιώς συστατικά που πρέπει να δημιουργηθούν (κατασκευαστούν). Πηγή σχεδιασμού ψηφιακών διδύμων θα αποτελέσει, για παράδειγμα, ένα CAD / CAM μοντέλο ενός ανταλλακτικού ή προϊόντος. Ένα τέτοιο σχέδιο θα δημιουργηθεί και θα προστεθεί σε ένα κοινό αποθετήριο. Ουσιαστικά αυτό περιέχει τα υπολογιστικά χαρακτηριστικά του ανταλλακτικού ή προϊόντος εφοδιασμένα επίσης με θεωρητικούς κανόνες φυσικής και κατασκευής των υλικών μαζί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του για την υποστήριξη της όποιας προσομοίωσης. Για παράδειγμα, η «φυσική» έννοια ενός συστατικού θα συλλέξει τους φυσικούς νόμους που διέπουν όλες αυτές τις οντότητες (S. Palit, A. Datta , 2017).

Τα ψηφιακά δίδυμα των επιμέρους συνιστωσών της παραγωγής πρέπει να συνδέονται με τις αντίστοιχες ροές δεδομένων από τους αισθητήρες των τμημάτων. Αυτά τα μοντέλα σχέσεων οντοτήτων πρέπει να είναι προσβάσιμα από διαχειριστές ή αναλυτές που μπορούν να μεταφέρουν και να προβάλλουν τα διάφορα μέρη από τα διάφορα αποθετήρια σε μία γραφική οθόνη.



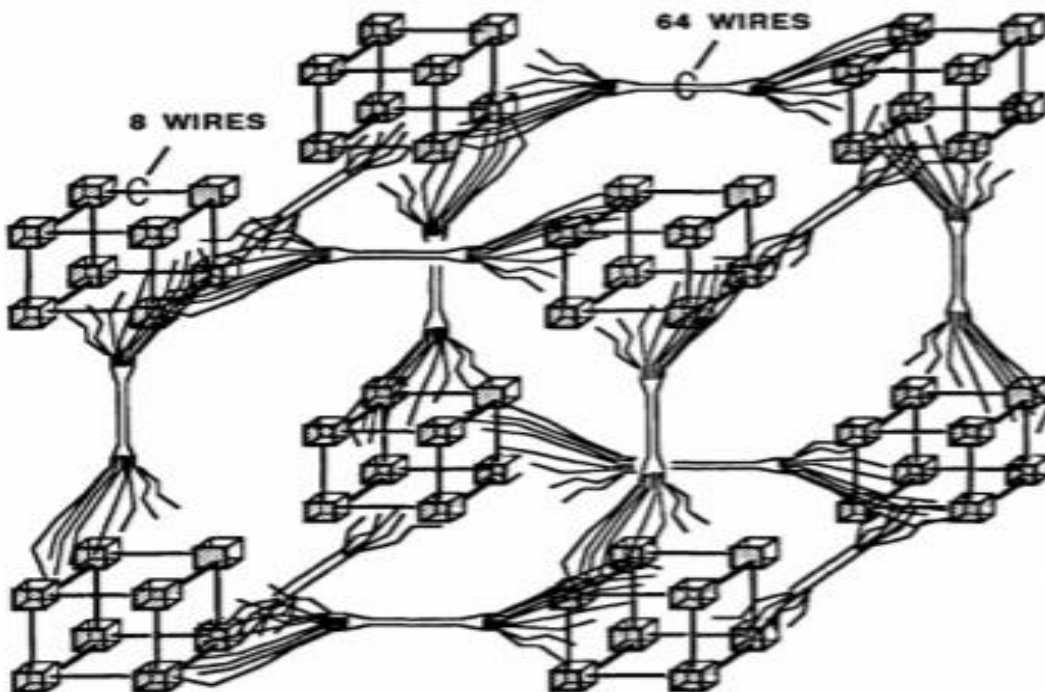
Εικόνα 10: Ψηφιακά Δίδυμα ως Βιολογικά Μοντέλα αναπαράστασης σχέσεων οντοτήτων (S. Palit, A. Datta , 2017)

Το επίπεδο των συστατικών στοιχείων απαραίτητων για τη σύνθεση και κίνηση των DigitalTwins (DT), μπορεί να είναι εφάμιλλα, με τα στοιχεία ενός blockchain, δηλαδή μίας σειράς καταχωρίσεων που αφορούν συναλλαγές σε ένα δημόσιο κατάστιχο (ledger). Κάθε καινούρια ομάδα καταχωρήσεων -ένα

«block»- συνδέεται με τα προηγούμενα, δημιουργώντας μία «αλυσίδα» καταχωρίσεων, δηλαδή ένα «blockchain».

Η λειτουργικότητα όλων των παραπάνω είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις αρχές και την πρακτική της συνδεσιμότητας. Προκειμένου να αποδώσει αξία, η συνδεσιμότητα πρέπει να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα δυναμικών οικοσυστημάτων. Η υλοποίηση μιας τέτοιας συνδεσιμότητας πρέπει να έχει γνώση των πρωτοκόλλων στο πιο κάτω επίπεδο, γνώση της τοποθεσίας ή τοποθεσιών των ομάδων στοιχείων και να προσαρμόζει το χρόνο λειτουργίας τους (πχ μεγιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων, ελαχιστοποίηση των βημάτων εκτέλεσης μίας διαδικασίας), με βάση την αρχή της μέτρησης και της απόκρισης, από το κάθε άκρο του συστήματος ως το πυρήνα του.

Επειδή το IoT αναμένεται να συνδέσει τρισεκατομμύρια αντικείμενα, η κλιμάκωση θα είναι βασικός παράγοντας. Πράγματι τις έννοιες "ομάδα στοιχείων" και "συνδεσιμότητα" τις έχουμε συναντήσει και σε άλλα πεδία, για παράδειγμα Agent συστήματα. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σε αφαιρετικό επίπεδο "ο κύβος πάνω στον κύβο" όπου κάθε κύβος είναι ένας agent (πράκτορας) λογισμικού. Η έννοια του κύβου είναι σχετική με τις παραπάνω έννοιες, επειδή κάθε κύβος μπορεί να θεωρηθεί ως "ομάδα στοιχείων" στην αλυσίδα καταχωρίσεων (blockchain) ή ως "βασική μονάδα" στο πρότυπο του DT. Η προέλευση της έννοιας από το πεδίο των πρακτόρων λογισμικού, τονίζει τη σύνδεση με τα πεδία της σημασιολογίας, οντολογίας και άλλα συναφή πεδία τα θα μπορούσαν να φτάσουν εξίσου βαθιά, για παράδειγμα τα νευρωνικά δίκτυα, τη γνώση και ακόμη και την επιστημολογία.



Εικόνα 11: παράδειγμα του προτύπου «Κύβος πάνω σε κύβο» για τη διασύνδεση πρακτόρων λογισμικού (S. Palit, A. Datta , 2017)

Στο παραπάνω σχήμα 8 agents κάνουν ένα κύβο και 8 κύβοι κάνουν ένα υπερκύβο από 64 agents. Η ένωση 8 υπερκύβων θα μας δώσει 512 Agents και αν επαναλάβουμε το πρότυπο 10 φορές θα προκύψει υπερκύβος του 1 δισεκατομμυρίου Agents. Επιπλέον, αν κάθε Agent συνδεθεί με άλλους 30 αντί για μόνο 6 τότε κάθε Agent θα έχει σύνδεση με άλλο 1 δισεκατομμύριο Agents αντί για μόνο 6 πετυχαίνοντας σημαντικά μεγαλύτερη κλιμάκωση. Η απεικόνιση (κύβος πάνω σε κύβο) απλοποιεί την την αρχή των "ομάδων στοιχείων" που αντιπροσωπεύουν αντικείμενα, δεδομένα, διαδικασίες και αποφάσεις (παραγόμενα αποτελέσματα). Οι ομάδες στοιχείων, όταν είναι συνδεδεμένα, μπορούν να συνθέσουν μια ποικιλία οντοτήτων ή δικτύων που συνδέονται με κοινά ψηφιακά νήματα.

Η σύνθεση των κατάλληλων ομάδων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία των αναγκαίων υποδομών για την εφαρμογή του IoT. Μπορούν να διαμορφωθούν τμήματα και υπομονάδες, ώστε να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό δίδυμο μιας μηχανής (πχ η κεφαλή ενός τρυπανιού στο παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας). Τα αντικείμενα που δημιουργούνται μέσα από διεργασίες και συναλλαγές αντιπροσωπεύονται ως ομάδα στοιχείων που επίσης καταχωρούνται σε ένα κοινό κατάστιχο όπως στη περίπτωση της εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain για την εφαρμογή χρηματοπιστωτικών συναλλαγών.

Σε ένα άλλο παράδειγμα, θεωρούμε τη περίπτωση ενός οχήματος (χωρίς οδηγό) που σταματάει σε σταθμό εφοδιασμού καυσίμων. Το αυτοκίνητό αναγνωρίζει την "άφιξη" στο σταθμό εφοδιασμού, επαληθεύει το χαμηλό αποθεματικό καυσίμου και ξεκλειδώνει το καπάκι εισαγωγής καυσίμου στο αυτοκίνητο. Η αντλία βενζίνης αναγνωρίζει ότι το αυτοκίνητο βρίσκεται εντός της απαραίτητης εγγύτητας στο διανομέα και υπενθυμίζει την επιλογή του οδηγού για αμόλυβδα προϊόντα καυσίμου. Το ακροφύσιο του διανομέα ανακαλύπτει την είσοδο αερίου και αρχίζει να γεμίζει όταν το καπάκι εισαγωγής καυσίμου ανοίξει. Επίσης επιβεβαιώνει ότι το ακροφύσιο παραδίδει βενζίνη και όχι ντίζελ. Μόλις ολοκληρωθεί ο ανεφοδιασμός, ανάβει μία σχετική ένδειξη στον πίνακα ελέγχου του αυτοκινήτου. Ο οδηγός λαμβάνει ένα SMS, το οποίο υποδεικνύει την ολοκλήρωση της τροφοδοσίας. Το τελευταίο αυτομάτως ενεργοποιεί μια οικονομική συναλλαγή για το κόστος των καυσίμων. Η τράπεζα επιβεβαιώνει την πληρωμή μέσω μιας εφαρμογής smartphone. Ενημερώνει επίσης ένα δεύτερο άτομο (αν απαιτείται εξουσιοδότηση) ότι η συναλλαγή ολοκληρώθηκε.

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών IoT, DT και blockchain στο παραπάνω παράδειγμα είναι εμφανής. Το οικοσύστημα των επιχειρήσεων συνδέει οντότητες που συμβολίζουν λειτουργίες σε μια επιχειρησιακή ακολουθία, και παρουσιάζει μια σειρά βημάτων, τα οποία μπορούν να υποδιαιρεθούν σε ομάδες που δεν είναι μόνο αντικείμενα / πράγματα, αλλά πράκτορες λογισμικού, παραγωγικές διαδικασίες, έλεγχος ταυτότητας, εξουσιοδότηση, αποφάσεις, επικοινωνίες με τρίτους, ανατροφοδότηση, ασφάλεια, μετρικές και καθορισμό εξαρτήσεων. Τα αρθρωτά δομικά στοιχεία των παραπάνω, για τους τομείς που καλύπτουν και αλληλεπικαλύπτονται στα πεδία του IoT, DT και blockchain (χωρίς να περιορίζονται μόνο στις χρηματοπιστωτικές συναλλαγές) είναι οδηγός των εξελίξεων στην παγκόσμια οικονομία.

Η ιδέα μιας κατανεμημένης ομάδας ή ομάδων στην οποία να τους ανατεθεί η αρχιτεκτονική αυτών των ομάδων στοιχείων μπορεί να είναι μία λογική επιλογή. Και αυτό γιατί η κατακερματισμένες καταστάσεις στον κόσμο και ο εγγενής αντίκτυπος της χρήσης φυσικής γλώσσας στη δημιουργία των απαιτούμενων σημασιολογικών λεξικών και οντολογικών πλαισίων θα εισάγει σοβαρές κοινωνικο-τεχνικές διαφωνίες. Ως εκ τούτου, μία αξιόπιστη ακαδημαϊκή ηγεσία κοινοπραξιών βιομηχανιών-

κυβερνήσεων σε συνεργασία με παγκόσμιους οργανισμούς ή φορείς τυποποίησης, μπορεί να είναι μια συνετή επιλογή.

Με τον τρόπο αυτό αν μερικές παγκόσμιες κοινοπραξίες δημιουργήσουν τις ομάδες στοιχείων και συμφωνήσουν να δημιουργήσουν τα εργαλεία διαλειτουργικότητας, τότε μπορούμε να προβλέψουμε τη δημιουργία ενός μελλοντικού παγκόσμιου κατάστιχου για αυτές τις ψηφιακές ομάδες που θα επιταχύνουν τον παγκόσμιο ψηφιακό μετασχηματισμό. Η αναμενόμενη αξία που θα προκύψει από τη συνδεσιμότητα, προϋποθέτει τη λειτουργία πολλών οικοσυστημάτων, τα οποία πρέπει να συγκλίνουν, για να προσφέρουν αυτό το όφελος. Ο Πίνακας 2 δείχνει ορισμένα από τα επίπεδα και τα συστατικά Στοιχεία που είναι απαραίτητα για αυτό το τεχνολογικό οικοσύστημα.

01	I	Υποδομή (Infrastructure)	Υποδομές που περιλαμβάνουν ενέργεια, το διαδίκτυο, και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα
02	T	Τηλεπικοινωνίες (Telecommunications)	Η ραχοκοκαλιά της συνδεσιμότητας, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία σε διαφορετικές τοποθεσίες
03	P	Πρωτόκολλα (Protocol)	Απόκριση σε συναλλαγές που εκτελούνται βάσει συγκεκριμένου πρωτοκόλλου – σύνδεση του περιεχομένου της απόκρισης σε μία επόμενη συναλλαγή (ενός άλλου πρωτοκόλλου)
04	D	Εντοπισμός νέων στοιχείων (Discovery)	Τα μπλοκ / οντότητες πρέπει να μπορούν να εντοπίσουν το ένα το άλλο για να επικοινωνήσουν
05	C	Συνδεσιμότητα (Connectivity)	Επιτρέπει τον ψηφιακό μετασχηματισμό, εκτός εάν περιορίζεται από συγκεκριμένα όρια
06	S	Μέτρηση (Sense)	Δεδομένα που ανακτούνται από σημεία αλληλεπίδρασης για κατανόηση της κατάστασης / χαρακτηριστικών
07	R	Απόκριση (Response)	Εκτέλεση ενεργειών μετά από ανάλυση δεδομένων συνθέτοντας διαφορετική γνώση
08	O	Λειτουργία (Operate)	Το αποτέλεσμα είναι προκαθορισμένο ή αλλάζει κατεύθυνση εάν επηρεάζεται από τρίτους παράγοντες
09	A	Προσαρμογή (Adapt)	Ικανότητα να παραμείνει δυναμική και ευκίνητη με επαναξιολόγηση λειτουργιών (π.χ. SCM)
10	K	Γνώση (Knowledge)	Μάθηση μέσα από τη λειτουργία (αποθήκευση / διαγραφή δεδομένων), διάδοση, ενημέρωση αναλυτικών στοιχείων

Πίνακας 2: επίπεδα, και δομικά στοιχεία για το οικοσύστημα IoT, DigitalTwin, Blockchain(S. Palit, A. Datta , 2017)

3.4 Μεθοδολογία σχεδιασμού του DigitalTwin ενός παραγωγικού συστήματος

Στο πλαίσιο των συστημάτων παραγωγής όπως αρχίσουν να αναπτύσσονται στο πλαίσιο του Industry 4.0 κάθε μηχανο-υπολογιστικό (mechatronic) στοιχείο ή σύστημα (π.χ. ενεργοποιητές / αισθητήρες καθώς και ολόκληρες γραμμές παραγωγής) ορίζεται ως βασικό παραγωγικό στοιχείο (asset). Το Ψηφιακό Δίδυμο ενός συστήματος αποτελείται από δεδομένα και πληροφορίες για κάθε παραγωγικό στοιχείο στον πραγματικό κόσμο, καθώς και διαφορετικά μοντέλα και δεδομένα σε διαφορετικά

επίπεδα λεπτομέρειας. Επιπλέον, παρέχει μια διασύνδεση με αυτά τα μοντέλα και διατηρεί τη συνεκτικότητά τους. Με αυτό τον τρόπο το Digital Twin εξελίσσεται μαζί με το πραγματικό σύστημα σε όλο τον κύκλο ζωής και ενσωματώνεται στις τρέχουσες διαθέσιμες γνώσεις σχετικά με αυτό (B. Talkhestani et al).

Με αυτόν τον τρόπο τα μοντέλα δεδομένων ενός Digital Twin ανήκουν στις παρακάτω κατηγορίες:

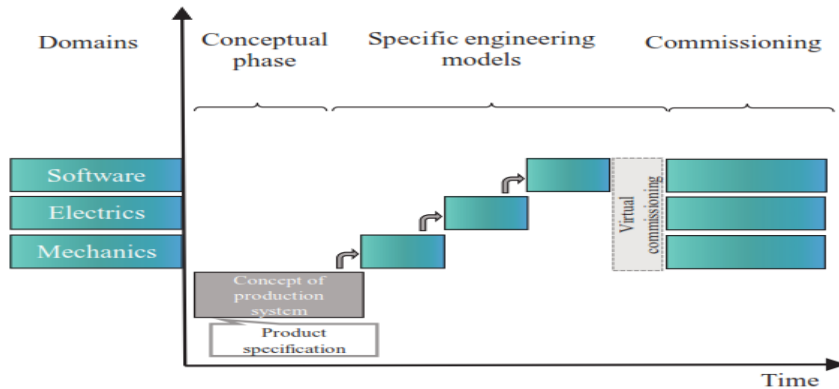
- Τεχνικά μοντέλα
- Μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα

Η τεχνική διαδικασία περιλαμβάνει την φάση της Ανάλυσης για τον εννοιολογικό σχεδιασμό, την ανάλυση των απαιτήσεων φυσικής εγκατάστασης, παραμετροποίησης και την ενεργοποίηση της λειτουργίας όλων των συνιστωσών. Είναι μια πρόκληση καθώς συνδέει την ανάλυση σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία: μηχανολογικό, ηλεκτρολογικό, ανάπτυξης λογισμικού. Ως αποτέλεσμα της ανάλυσης θα πρέπει να προκύψουν τεχνικά μοντέλα ή μοντέλα δεδομένων σχεδιασμένα από μηχανικούς διαφορετικών ειδικοτήτων που κάνουν χρήση των δικών τους εξειδικευμένων εργαλείων (π.χ. μοντέλα MCAD / ECAD, μοντέλα λογισμικού, μοντέλα προσομοίωσης).

Τα μοντέλα δεδομένων είναι μοντέλα που ορίζουν δεδομένα διαδικασιών (π.χ. στοιχεία αισθητήρα / ενεργοποιητή από το πεδίο) και αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Υπάρχουν επίσης άλλα δεδομένα που αφορούν γενικότερα το σύστημα (π.χ. αύξων αριθμός, ημερομηνίες κατασκευής). Ωστόσο, η συνοχή των σχετικών δεδομένων στα τεχνικά μοντέλα ενός παραγωγικού στοιχείου στους διάφορους συγκεκριμένους τομείς και κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος είναι πολύ σημαντική. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα παραγωγής στον πραγματικό κόσμο αλλάζει κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Μία σημαντική πρόκληση εδώ είναι, πώς οι αλλαγές σε πραγματικό κόσμο μπορεί να ανιχνευθούν και να συγχρονιστούν έτσι ώστε να διατηρείται η συνοχή του μοντέλου δεδομένων του DigitalTwin.

Η παραπάνω πρόκληση στη διαδικασία ανάπτυξης των μελλοντικών συστημάτων παραγωγής μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση εικονικών, μηχανο-υπολογιστικών μοντέλων συστημάτων ως τα κύτταρα της παραγωγής. Η μεθοδολογία υλοποίησης του παραγωγικού συστήματος αρχίζει με τον σχεδιασμό του προϊόντος που πρόκειται να παραχθεί στο σύστημα παραγωγής.

Οι διαφορετικοί τομείς αρχίζουν με τον ορισμό κοινών εννοιών για τα προϊόντα και τα συστήματα παραγωγής. Βασισμένη στην έννοια της μονάδας παραγωγής, διαφορετικά μοντέλα γραμμών παραγωγής πρέπει να αναπτυχθούν σε διάφορους συγκεκριμένους τομείς που να περιέχουν όλες τις πληροφορίες σχετικά με τα μηχανο-υπολογιστικά στοιχεία και τα αυτοματοποιημένα συστήματα, τα οποία είναι απαραίτητα για την εκτέλεση των διάφορων διαδικασιών παραγωγής.



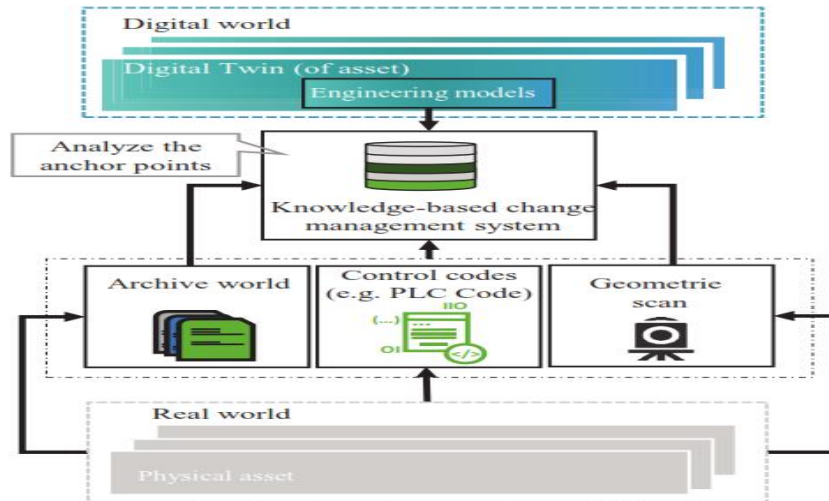
Εικόνα 12: Μεθοδολογία υλοποίησης παραγωγικών συστημάτων προσαρμοσμένων στα επιμέρους πεδία (B. Talkhestani et al)

Στην αρχή, ένα ενιαίο σύνολο βημάτων παραγωγής καθορίζονται βάσει του ορισμού του προϊόντος. Ο ρόλος του σχεδιαστή του συστήματος παραγωγής είναι να μετατρέψει αυτές τις απαιτήσεις σε μια τεχνική λύση. Η διαδικασία σχεδιασμού ξεκινά με το μηχανολογικό σχέδιο που δημιουργεί τη γεωμετρική δομή και την επιλογή των εξαρτημάτων αυτοματισμού. Η τελευταία φάση της μηχανολογικής σχεδίασης περιλαμβάνει το λεπτομερή σχεδιασμό των διαφόρων εξαρτημάτων και συνθέσεων αυτών.

Κατόπιν προσδιορίζοντας τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές στο ηλεκτρολογικό τμήμα γίνεται η μετάβαση από το μηχανολογικό τμήμα στο ηλεκτρολογικό τμήμα. Εδώ, οι ηλεκτρολόγοι σχεδιάζουν την υποδομή του συστήματος ως ένα σχέδιο CAD (ECAD) και προσθέτουν τους αισθητήρες και ενεργοποιητές που καθορίζονται από το μηχανολογικό τμήμα. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, οι ηλεκτρολόγοι σχεδιάζουν τα διαγράμματα των κυκλωμάτων. Μόλις ολοκληρωθούν όλες οι διεπαφές αποστολής και λήψης σημάτων, μεταφέρονται στο τμήμα αυτοματισμού μαζί με τις μηχανολογικές προδιαγραφές.

Στον τομέα του λογισμικού, ο σχεδιαστής αυτοματισμού αρχίζει να ορίζει τις διαφορετικές καταστάσεις των μηχανο-υπολογιστικών στοιχείων του συστήματος στο λογισμικό. Αυτές οι καταστάσεις είναι γενικά κινηματικές μαζί με λειτουργίες ασφαλείας και συνθήκες αποφυγής αδιεξόδων. Στο τελικό βήμα της σχεδιαστικής διαδικασίας, ο κώδικας λογισμικού των μονάδων PLC ελέγχεται έναντι των μοντέλων συμπεριφοράς των αυτοματοποιημένων συστημάτων καθώς και έναντι των μοντέλων των μηχανο-υπολογιστικών στοιχείων στη λεγόμενη εικονική έναρξη της παραγωγικής λειτουργίας.

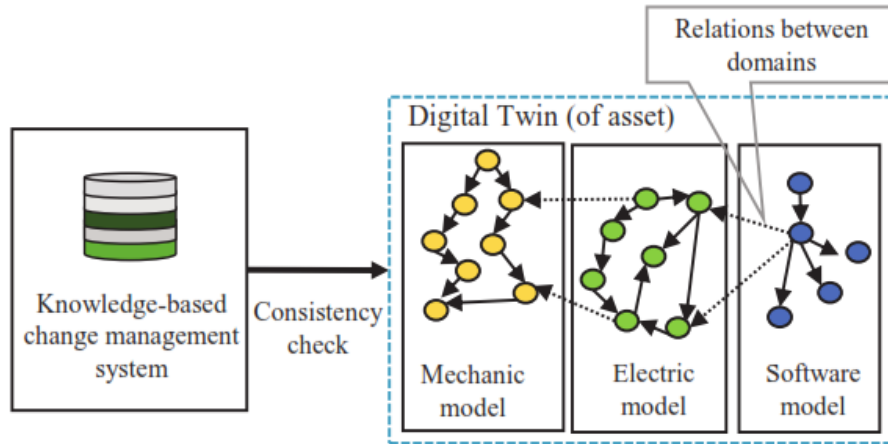
Ο στόχος της εικονικής ανάθεσης είναι, μεταξύ άλλων, η επικύρωση του κώδικα που έχει υλοποιηθεί για τα PLC ελέγχοντας την ακολουθία των ενεργειών του, των ενεργοποιητών και των αισθητήρων. Ο δυαδικός κώδικας λογισμικού αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων μετά την εικονική έναρξη της παραγωγικής λειτουργίας και το σύστημα παραγωγής συναρμολογείται στη τελική του μορφή και τίθεται σε λειτουργία. Στη συνέχεια, το σύστημα παραγωγής διαμορφώνεται τελικά με τη φυσική εγκατάσταση των παραγωγικών μονάδων.



Εικόνα 13: Συγχρονισμός του DigitalTwin και του παραγωγικού συστήματος λαμβάνοντας υπόψη εξαρτώμενα στοιχεία των μηχανο-υπολογιστικών στοιχείων (B. Talkhestani et al)

Όπως αναλύεται στην Εικόνα 13 – παραπάνω- η έναρξη της πραγματικής παραγωγικής λειτουργίας είναι το τελικό στάδιο της παραπάνω μεθοδολογίας αφού επαληθευθεί η λειτουργικότητα και διορθωθούν τα όποια σφάλματα. Από τα παραπάνω γίνεται επίσης σαφές, ότι η αμέσως επόμενη πρόκληση είναι να διατηρηθούν τα ψηφιακά μοντέλα σε συγχρονισμό με το φυσικό παραγωγικό σύστημα. Για να γίνει αυτό πρέπει να προσδιοριστούν τα εξαρτώμενα στοιχεία μέσα σε κάθε μηχανο-υπολογιστική οντότητα.

Για παράδειγμα, ένα εξαρτώμενο στοιχείο είναι ένα νέο σήμα που εντοπίστηκε στον κώδικα PLC του φυσικού συστήματος. Μπορεί να ερμηνευτεί ότι ένας νέος αισθητήρας είναι συνδεδεμένος στο αυτοματοποιημένο σύστημα. Με βάση τις αναλύσεις δεδομένων γύρω από αυτό το νέο σήμα στον κώδικα PLC προσδιορίζεται το κομμάτι κώδικα και η διεύθυνση υλικού του αισθητήρα από όπου προήλθε το σήμα καθώς επίσης εντοπίζονται όλες οι σχέσεις και εξαρτήσεις μεταξύ άλλων συνιστωσών. Ένα άλλο παράδειγμα εξαρτώμενου στοιχείου είναι ένα νέο σύνολο γεωμετρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο. Αφετέρου διαμορφώνουν νέα έκδοση του μηχανολογικού σχεδίου και επηρεάζουν επίσης τις ηλεκτρολογικές συνδέσεις και τις διεπαφές αυτοματισμού.



Εικόνα 14: προσδιορισμός σημείων αλλαγών (εξαρτώμενων στοιχείων) μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων (B. Talkhestani et al)

3.5 Υλοποίηση του Digital Twin

Δεδομένου ότι η βάση δεδομένων των στοιχείων παραγωγής στις Βιομηχανικές Μονάδες είναι εξαιρετικά ετερογενής, και η ποιότητα της είναι τακτικά ανεπαρκής για την υλοποίηση του DT, τα ακόλουθα δύο συστήματα εισάγονται για την απόκτηση δεδομένων (T. Uhlemann et al):

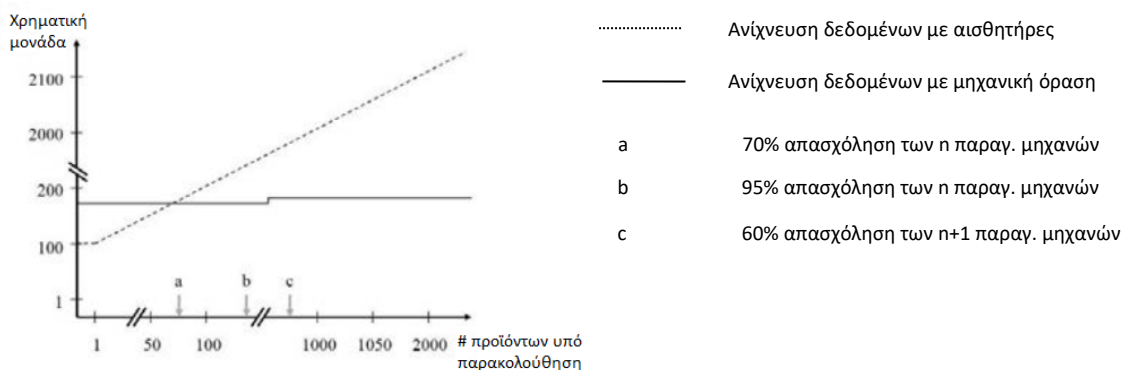
- Συλλογή δεδομένων βασισμένη σε αισθητήρες
- μηχανική όραση

Η παρακολούθηση που βασίζεται σε αισθητήρες παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις διαδρομές και τη θέση των εργαζομένων στην παραγωγή, τις διαδρομές και τη θέση παραγωγικών μηχανημάτων μεγάλης και υψηλής κινητικότητας, π.χ. φορτωτές. Ο χαμηλός αριθμός κινούμενων μηχανών και εργατικού δυναμικού σε σύγκριση με τον αριθμό των προϊόντων επιτρέπουν την απόκτηση και παρακολούθηση δεδομένων με τη χρήση αισθητήρων. Επιπλέον, η μηχανική όραση βασίζεται στην μόνιμη παρακολούθηση εργαζομένων και κινούμενων μηχανών, κάτι που δεν μπορεί να εξασφαλιστεί στα παραγωγικά συστήματα ενώ η παρακολούθηση του προϊόντος είναι εύκολο να επιτευχθεί στις μηχανές παραγωγής και κατά μήκος της παραγωγικής αλυσίδας.

Ως εκ τούτου, η μηχανική όραση χρησιμεύει για τον εντοπισμό προϊόντων πάνω στη μηχανή παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η τοποθέτηση σε κάθε μεμονωμένο προϊόν κάποιου αισθητήρα ή ετικέτας. Αυτό οδηγεί σε μια κοστολογική δομή για την απόκτηση δεδομένων που δεν είναι ανάλογη με τον αριθμό των προϊόντων που παρακολουθούνται (Εικόνα 15).

Η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική εάν υπάρχει υψηλός αριθμός προϊόντων στην παραγωγή και αν το σύστημα παραγωγής ή τα χαρακτηριστικά του προϊόντος ή διεργασίας δεν είναι κατάλληλα για παρακολούθηση βασισμένα σε αισθητήρα, π.χ. σκλήρυνση. Αυτά τα εμπόδια είναι τυπικοί περιορισμοί στα κοινά παραγωγικά συστήματα που μπορούν να αποφευχθούν μέσω της μηχανικής όρασης. Η αναγνώριση εικόνας επιτρέπει επίσης την ανίχνευση και τον εντοπισμό δοχείων μικρών τεμαχίων (πχ

με πρώτες ύλες ή ανταλλακτικά) χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αρίθμησης, εάν είναι απαραίτητη η μεμονωμένη αναγνώριση.



Εικόνα 15: Σχηματική εξέλιξη τους κόστους της συλλογής δεδομένων που βασίζεται σε αισθητήρες και μηχανική όραση (T. Uhlemann et al)

Σε αυτό το πλαίσιο, η αναγνώριση εικόνας χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό τύπων προϊόντων στα μηχανήματα παραγωγής που ανιχνεύουν και εντοπίζουν μικρές συσκευές παραγωγής και συγκεκριμένα προϊόντα, εάν αυτό απαιτείται ξεχωριστά.

Πληροφορία	Συλλογή βάσει αισθητήρων	Συλλογή με μηχανική όραση	Συνδυασμός
Προϊόν (τύπος)	Όχι	Ναι	-
Προϊόν (συγκεκριμένο)	Όχι	Ναι	-
Κύκλος παραγωγής	Όχι	Ναι	-
Μέγεθος παρτίδας	Όχι	Ναι	-
Διαδρομές μεταφοράς/εργασίας	Ναι	Όχι	-
Προϊόντα προς μεταφορά	Όχι	Όχι	Ναι
Μέγεθος παρτίδας προς μεταφορά	Όχι	Όχι	Ναι
Απασχόληση μηχανής	Όχι	Ναι	-
Χρόνος απαραίτητων ρυθμίσεων	Όχι	Όχι	Ναι

Πίνακας 3: Επιλογή κατάλληλων δεικτών απόδοσης με χρήση δεδομένων από αισθητήρες και μηχανική όραση (T. Uhlemann et al)

Έχοντας αποκτήσει δεδομένα στο πλαίσιο του συστήματος παραγωγής, αυτά πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η απόκτηση και η αξιολόγηση δεδομένων ανεξάρτητα από τοποθεσία αποτελεί βασικό στοιχείο, καθώς εξαιτίας του χαμηλού επιπέδου τεχνογνωσίας στις μικρές βιομηχανίες, ειδικά στον τομέα της εφαρμογής του Industry 4.0, μια διεξοδική αξιολόγηση μέσα στο χώρο της παραγωγής δεν είναι αναμενόμενη. Ακόμη και σε εταιρείες που αρχίζουν να εφαρμόζουν το πρότυπο Industry 4.0, στερούνται ειδικών στελεχών στο συγκεκριμένο πρότυπο. Η εξειδίκευση στην αξιολόγηση και την προσομοίωση δεδομένων αποτελεί βασική αρμοδιότητα και ως τέτοια και ίσως να μην είναι διαθέσιμη σε πολλές βιομηχανίες.

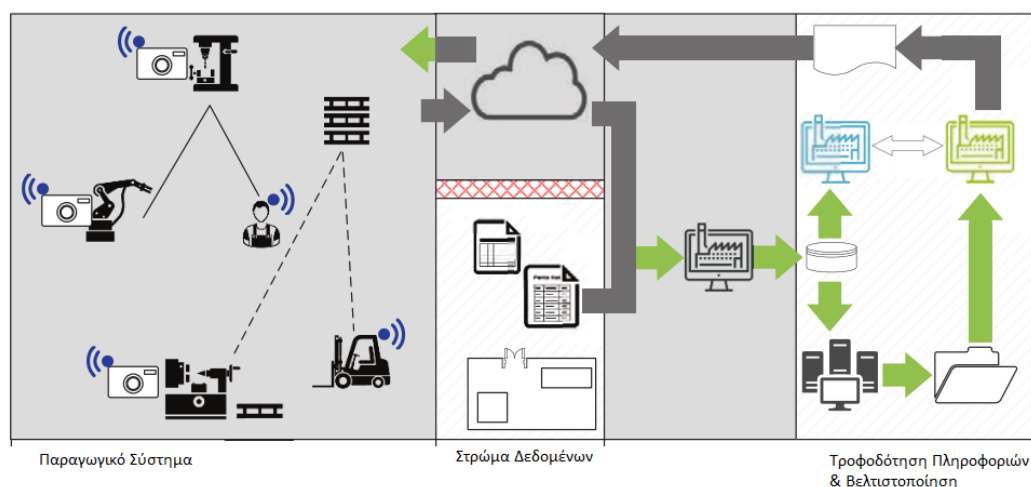
Πράγματι, η Εικόνα 16 παρουσιάζει την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος που πετυχαίνει τον διαχωρισμό των δεδομένων και ταυτόχρονα εξασφαλίζει την εγγενή ασφάλεια των δεδομένων. Εδώ, ο διαχωρισμός των μη πτητικών και συνεπώς μη εξαρτώμενων από το χρόνο δεδομένων, όπως π.χ.

- κάτοψη
- διάταξη
- σκοπό της μηχανής παραγωγής
- λίστα ανταλλακτικών
- προσόντα (ειδικότητες) του προσωπικού
- βάρδιες
- κα








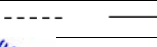




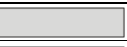







έναντι των στοιχείων που εξαρτώνται από το χρόνο, όπως π.χ.

- ροή παραγωγής
- κινητικότητα εργαζομένων
- ανάθεση εργασιών σε μηχανές
- δρομολόγηση μεταφορών
- κλπ

έρχεται στο προσκήνιο.



Εικόνα 16: Υλοποίηση του DigitalTwin στο παραγωγικό σύστημα μίας επιχείρησης (Cyber-PhysicalProductionSystem) (T. Uhlemann et al)

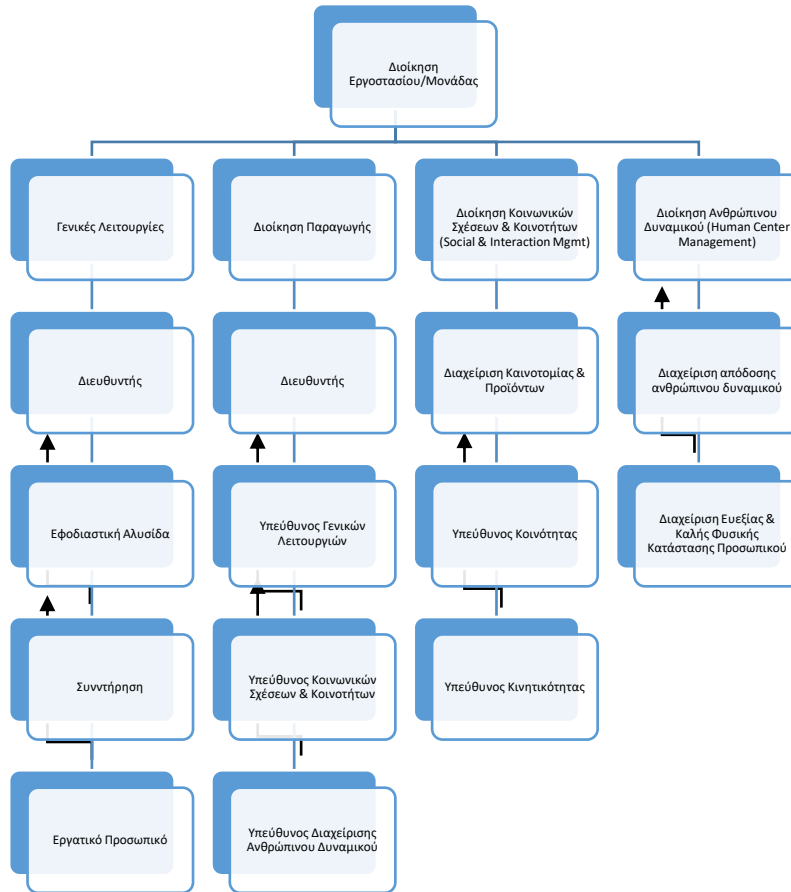
Σύμβολο	Περιγραφή
	DigitalTwin με βελτιστοποιημένο σύνολο παραμέτρων. Επεξεργάζεται τη βάση δεδομένων και συγκρίνει τα αποτελέσματα με το DigitalTwin για να μετρήσει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης που επιτυγχάνεται
	DigitalTwin υποσύστημα συνδεδεμένο με τη βάση δεδομένων
	Ψηφιακό αντίγραφο το οποίο συνδέεται σε πραγματικό χρόνο με το σύστημα παραγωγής και δημιουργεί βάση δεδομένων για τη βελτιστοποίηση
	Μηχανές παραγωγής
	Προϊόντα
	Εργαζόμενος στη παραγωγή υπό παρακολούθηση μέσω αισθητήρων
	Μηχάνημα στη παραγωγή υπό παρακολούθηση μέσω αισθητήρων
	Δρομολόγια μεταφοράς ή εργασίας
	Σύστημα μετάδοσης δεδομένων μηχανικής οπτικής αναγνώρισης
	Βασικά δεδομένα, π.χ. διάταξη, λίστα ανταλλακτικών, πρόγραμμα βαρδιών, κλπ
	Υπηρεσία υπολογιστικού νέφους
	Διαχωρισμός πτητικών δεδομένων και βασικών δεδομένων για την προστασία της γνώσης
	Στοιχεία δημιουργίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο
	Στοιχεία που δεν δημιουργούν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Η χρονική καθυστέρηση έως ότου τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης είναι προσβάσιμα εξαρτάται από την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και τη συχνότητα της εξόδου δεδομένων. Με αυξημένη υπολογιστική ισχύ και συχνότητα εξόδου δεδομένων αυξάνεται η δυνατότητα δημιουργίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
	Ροή δεδομένων
	Ροή πληροφοριών
	Διαρκώς ενημερωμένη βάση δεδομένων για προσομοίωση και βελτιστοποίηση
	Βελτιστοποιημένο σύνολο παραμέτρων για τον έλεγχο της παραγωγής
	Βελτιστοποίηση, παραλληλισμός στο μέγιστο δυνατό βαθμό
	Σύσταση βελτίωσης του ελέγχου παραγωγής

Πίνακας 4: σύμβολα επεξήγησης του παραπάνω διαγράμματος εφαρμογής του DigitalTwin σε γραμμή παραγωγής (Cyber-PhysicalProductionSystem) (T. Uhlemann et al)

3.6 Οργανόγραμμα επιχειρήσεων με βάση το DigitalTwin

Η αναδιάρθρωση των οργανωτικών μονάδων των επιχειρήσεων / παραγωγικών μονάδων είναι απαραίτητη για τη δημιουργία νέων μοντέλων εργασίας και τη δημιουργία ευκαιριών για εργασία σε κοινότητες, για την ανταλλαγή των πληροφοριών μεταξύ των οργανισμών, τη δημιουργία κεντρικών

σημείων τεχνογνωσίας και δημιουργία προστιθέμενης αξίας, διεπιστημονική επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων προς κάθε μέλος αυτής της κοινότητας. Σημασία αυτής της αναδιάρθρωσης είναι η επίδραση της οργανωτικής δομής, της ηγεσίας και της επικοινωνίας στην αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα. Ένα τέτοιο οργανόγραμμα είναι σε εφαρμογή σε πειραματικό στάδιο (Εικόνα 17).



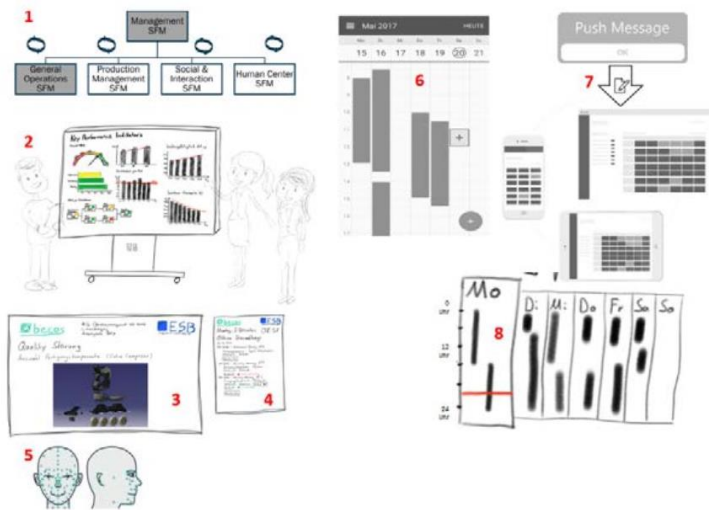
Εικόνα 17: Νέες οργανωτικές μονάδες σε πειραματικό στάδιο (B. Brenner, V. Hummel, 2017)

Σύμφωνα με τις παραπάνω οργανωτικές μονάδες πραγματοποιούνται διαφορετικές συναντήσεις στη μονάδα ενός τέτοιου εργοστασίου. Σε αυτές τις συναντήσεις και δομές πρέπει να αντιμετωπιστούν ορισμένα θέματα, όπως η παροχή των δεδομένων που λαμβάνονται για την προσομοίωση των σεναρίων παραγωγής και την ενσωμάτωση στη βάση δεδομένων για μελλοντική ανάλυση και άντληση τεχνογνωσίας. Δημιουργία μεταβλητών και γραφική προβολή τους προσαρμοσμένη σε μία συγκεκριμένη κατάσταση έχοντας υπόψη (B. Brenner, V. Hummel, 2017):

- τωρινά δεδομένα και δεδομένα του παρελθόντος
- ιστορικό σφαλμάτων και λειτουργίας
- πρόβλεψη απόδοσης και άλλων μετρικών που σχετίζονται με την παραγωγή
- επιδόσεις των εργαζομένων και των μηχανών
- καμπύλες άγχους και μάθησης
- βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής
- προσαρμογή των διατάξεων και λειτουργιών του εργοστασίου σε όλα τα παραπάνω

Σε ένα νέο εργασιακό μοντέλο, οι εργαζόμενοι υποβάλλουν ατομικές αιτήσεις εργασίας για την επόμενη εβδομάδα. Δευτέρα έως Κυριακή (μεταβλητές καθημερινές), 0-24 ώρες (μεταβλητός χρόνος), με ελάχιστο χρόνος εργασίας (που ορίζεται στη σύμβαση) που καταγράφεται σε πρέπει να εγγραφεί σε μια εφαρμογή προγραμματισμού βαρδιών. Ο χρόνος εργασίας μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τη ζήτηση για εργασία την αντίστοιχη ημέρα.

Οι συναντήσεις μεταξύ των τμημάτων μπορούν να γίνουν από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου και είναι πλέον υποχρεωτικές στην σύγχρονη παγκοσμιοποιημένη οικονομία. Σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές με πίνακες ελέγχου και αλληλεπίδρασης για την ανάγνωση, αποστολή, αλλαγή δεδομένων από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου και μέσω κινητών συσκευών διευκολύνουν αυτές τις συναντήσεις (Εικόνα 18).



1. Συναντήσεις Παραγωγικής μονάδας
Καθημερινά: Γενικές Λειτουργίες
Εβδομαδιαία: Διοίκηση
2. Τηλεδιάσκεψη διοικήσεων/μονάδων ανά τον κόσμο
3. Νέες καινοτομίες, Έλεγχος ποιότητας
Προβολή 3D μοντέλων
4. Συντήρηση
Ενημερώσεις για
επιδιορθώσεις/αλλαγές ανταλλακτικών
5. Οπτική αναγνώριση προσώπων
6. Ευέλικτος προγραμματισμός βαρδιών
7. Μήνυμα άμεσης αλλαγής εργαζομένου στη βάρδια
8. Δυναμική αλλαγή στον
προγραμματισμό των παραγγελιών

Εικόνα 18: Μοντέλο διοίκησης και επικοινωνίας στις μελλοντικές παραγωγικές μονάδες που εφαρμόζουν το DigitalTwin (B. Brenner, V. Hummel, 2017)

Το Digital Twin διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε αυτές τις συνεδρίες επικοινωνιών και τηλεδιασκέψεων μέσω υπολογιστών και κινητών συσκευών. Η ανταλλαγή ψηφιακής εικόνας και δεδομένων επιτρέπει τον άμεσο συγχρονισμό του DT με το πραγματικό παραγωγικό σύστημα μηχανών - αισθητήρων - πραγματικών αντικειμένων. Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του ψηφιακού και πραγματικού μοντέλου μέσα από τέτοιες συναντήσεις εξασφαλίζει τις ταχύτερες δυνατές βελτιώσεις.



Εικόνα 19: παράδειγμα τηλεδιάσκεψης παραγωγικής μονάδας (B. Brenner, V. Hummel, 2017)

4. Η Χρήση του DT στην παραγωγή ανταλλακτικών

4.1 Χαρακτηριστικά Παραγωγής Ανταλλακτικών και η ανάγκη δημιουργίας ενός νέου παραγωγικού μοντέλου

Παρά το γεγονός ότι η βάση δεδομένων των στοιχείων παραγωγής στις Βιομηχανικές Μονάδες είναι εξαιρετικά ετερογενής, και η ποιότητα της είναι τακτικά ανεπαρκής για την υλοποίηση του DT, στον τομέα παραγωγής ανταλλακτικών γίνονται προσπάθειες για την δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου που θα βοηθούσε στην πιστότητα των τελικών προϊόντων και στην μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής τους. Η πολυπλοκότητα της μικροδομής και της γεωμετρίας αυτών των προϊόντων χρήζει αναγκαία την δημιουργία και την επικύρωση ενός DT το οποίο θα μπορεί να παρέχει ακριβείς προβλέψεις σχετικά με τις χωρικές και χρονικές μεταβολές των μεταλλουργικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη δομή και τις ιδιότητες των συστατικών. Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός ψηφιακά αποδοτικού DT πρώτης γενιάς το οποίο θα κατασκευάζει ανταλλακτικά υλικά θα χρησιμοποιεί ένα μεταβατικό, τρισδιάστατο μοντέλο που υπολογίζει τα διάφορα και πεδία και τις παραμέτρους που συντελούν σε αυτήν την διαδικασία.

Πιο συγκεκριμένα οι ιδιότητες και η δυνατότητα συντήρησης των μεταλλικών εξαρτημάτων που παράγονται με λέιζερ εξαρτώνται από την γεωμετρία, την μικροδομή και τα ελαττώματά τους. Η εξέλιξη της μικροδομής και της γεωμετρίας επηρεάζονται από τα πεδία της μεταβατικής θερμοκρασίας, τα ποσοστά ψύξης και τις παραμέτρους στερεοποίησης (H.L. Wei et al 2016-2017), οι οποίες με την σειρά τους εξαρτώνται από τις μεταβλητές της διεργασίας, το κράμα και τη διαδικασία επεξεργασίας των συγκεκριμένων AM. Για την δημιουργία ενός δομικά ορθού και αξιόπιστου εξαρτήματος απαιτείται η προδιαγραφή ενός βέλτιστου συνόλου μεταβλητών και διαδικασιών που σχετίζονται με τα μεταβατικά πεδία της θερμοκρασίας, τη γεωμετρία και τις ταχύτητες ψύξης.

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές αλληλένδετες μεταβλητές στην διαδικασία, η επιλογή ενός βελτιστοποιημένου συνδυασμού ικανού για να παράγει ένα δομικά ορθό και αξιόπιστο εξάρτημα είναι δύσκολη. Τα πεδία θερμοκρασίας και η γεωμετρία της δεξαμενής όπου γίνεται η τήξη των μετάλλων (molten pool) είναι δύσκολο να παρακολουθούνται και να ελέγχονται σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια κατασκευής του AM. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δομή και οι ιδιότητες των συστατικών να βελτιστοποιούνται συνήθως με την προσαρμογή των μεταβλητών πολλών διαδικασιών με την τεχνική των δοκιμών (trial and error) χωρίς κανένα πλαίσιο επιστημονικής καθοδήγησης. Σχεδόν όλες οι μελέτες που έχουν γίνει βασίζονται καθαρά σε εμπειρικές τεχνικές στις οποίες η διαδικασία επιλογής παραμέτρων ποικίλει ενώ όλα τα υπόλοιπα διατηρούνται σταθερά έτσι ώστε να επιτευχθούν οι αποδεκτές ιδιότητες. Οι αναλύσεις μετά την διαδικασία καθορίζουν την γεωμετρία, την μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του συναρμολογημένου στοιχείου. Αυτή η προσέγγιση είναι χρονοβόρα, δαπανηρή και δεν παρέχει την εξασφάλιση της βέλτιστης δομής και τις βέλτιστες ιδιότητες του εξαρτήματος.

Ένας πόρος που πρέπει να αναπτυχθεί είναι ένα σύστημα digital twin ικανό να προβλέψει τις πιο σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν τη μεταλλουργική δομή και τις ιδιότητες των εξαρτημάτων με

βάση τις επιστημονικές αρχές. Ιδανικά, το πλαίσιο θα μπορεί να επιτρέπει στους χρήστες να καθορίζουν οποιονδήποτε συνδυασμό παραμέτρων διεργασίας AM και να αποκτούν άμεσα τις σημαντικές μεταλλουργικές μεταβλητές όπως τα μεταβατικά πεδία της θερμοκρασίας, τη γεωμετρία της τηγμένης δεξαμενής, τις χρονικές και χωρικές μεταβολές των ρυθμών ψύξης και τις παραμέτρους στερεοποίησης. Αυτό το σύστημα Digital Twin της AM διαδικασίας, όταν επικυρωθεί με τα κατάλληλα πειραματικά δεδομένα θα αντικαταστήσει ή θα μειώσει τα ακριβά και χρονοβόρα φυσικά πειράματα, με γρήγορα οικονομικά αριθμητικά πειράματα. Σε αρχική φάση ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορεί να εξετάζει όλες τις σημαντικές μεταβλητές της διαδικασίας AM ως εισροές και να παρέχει τα περιοδικά, τρισδιάστατα πεδία της θερμότητας και της ταχύτητας, τους ρυθμούς ψύξης, τις παραμέτρους στερεοποίησης και την γεωμετρία ως εξόδους. Αυτές οι έξοδοι θα χρησιμοποιούνται από την διαδικασία για περαιτέρω γνώση.

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υπάρχοντων μοντέλων AM (Additive Manufacturing)

Τα υπάρχοντα μοντέλα διεργασιών AM έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων με βάση τα μοντέλα αγωγιμότητας θερμότητας (heat conduction models) είναι σε θέση να υπολογίσουν τα γεωμετρικά σχέδια και τις κατανομές θερμοκρασίας, από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν η θέρμανση και οι ρυθμοί ψύξης. Ωστόσο αυτά τα μοντέλα παραμελούν τις επιδράσεις της ροής του λιωμένου μετάλλου στο εσωτερικό της δεξαμενής κατά την διάρκεια που υπολογίζονται οι κατανομές της θερμοκρασίας. Αυτό προκαλεί ανακριβείς προβλέψεις του σχήματος της δεξαμενής, γεγονός που οδηγεί σε ανακριβείς ρυθμούς ψύξης. Για παράδειγμα οι Manvatkar et al (2014) έδειξαν ότι αγνοώντας το αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας, οι ρυθμοί ψύξης στον AM διπλασιάζονται. Οι Svensson et al (1986) σημείωσαν επίσης ότι η χρήση μιας εξίσωσης θερμικής αγωγιμότητας δεν αντιπροσωπεύει επαρκώς τις καμπύλες ψύξης.

Η τρέχουσα μεταφορά θερμότητας και τα μοντέλα ροής υγρών (L.E. Svensson and B. Grefott, 1986) εξετάζουν τη μεταφορά Marangoni μέσα στην δεξαμενή χρησιμοποιώντας μια υπόθεση επίπεδης επιφάνειας, η οποία επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση της κατανομής θερμοκρασίας και της ταχύτητας, των ρυθμών ψύξης και των παραμέτρων στερεοποίησης. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση έχει ως αποτέλεσμα τα προβλεπόμενα ποσά γεωμετρίας να αποκλίνουν από τα πειραματικά δεδομένα.

Η μέθοδος ορισμού του επιπέδου (LSM- Level Set Method) (H. Qi and J. Mazumder, H. Ki 2006) και η μέθοδος όγκου του υγρού (VOF – Volume of FLuid) (Y. Lee et al, 2014) παρακολουθούν την εξέλιξη της επιφάνειας που παραμένει ελεύθερη και έτσι υπολογίζουν την γεωμετρία των σφαιριδίων. Αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι συχνά χρησιμοποιούνται μόνο για υπολογισμούς δύο διαστάσεων.

4.3 Η ανάπτυξη του AM Digital Twin πρώτης γενιάς

Επιστημονική εξέλιξη αποτελεί η ανάπτυξη και ο πειραματικός έλεγχος των σημαντικών δομικών στοιχείων για ένα digital twin παραγωγής ανταλλακτικών εξαρτημάτων πρώτης γενιάς. Αυτό συνέβη με την ανάπτυξη ενός υπολογιστικά αποτελεσματικού και ολοκληρωμένου μοντέλου με δυνατότητες πρόβλεψης των γεωμετρικών δεδομένων, μετάβασης της θερμοκρασίας σε διάφορα επίπεδα, ταχύτητας των παραμέτρων διανομής και της στερεοποίησης σε τρεις διαστάσεις. Ένα μοντέλο 3D παροδικής μεταφοράς θερμότητας (transient heat transfer) και ροής ρευστών παρέχει ένα σημαντικό δομικό στοιχείο που απαιτείται για την πρόβλεψη όλων των σημαντικών μεταλλουργικών μεταβλητών, οι οποίες με την σειρά τους επηρεάζουν τη δομή και τις ιδιότητες των κατασκευαστικών στοιχείων. Αυτό το μοντέλο υπολογίζει τη θερμοκρασία και τις κατανομές ταχύτητας, καθώς και τους ρυθμούς ψύξης και στερεοποίησης για την ποσότητα μιας στρώσης.

4.4 Χαρακτηριστικά

Τα δομικά στοιχεία για την ανάπτυξη ενός digital twin στην AM διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιήσουν ένα τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο υπολογίζει τα πεδία θερμοκρασίας και ταχύτητας, τα ποσοστά ψύξης, τις παραμέτρους στερεοποίησης και την γεωμετρία καταθέσεων. Τα παρακάτω είναι τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας.

1. Οι προτεινόμενες δομικές μονάδες του digital twin πρώτης γενιάς μιας AM διαδικασίας χρησιμοποιούνται για την ακριβή εκτίμηση της 3D επιφάνειας της καμπύλης των μεταβατικών κατανομών της θερμοκρασίας και της ταχύτητας, τους ρυθμούς ψύξης, τις παραμέτρους στερεοποίησης, την απόσταση του δευτερεύοντα βραχίονα χειρισμού αντικειμένων σε δενδρική μορφή και την μικρο-σκληρότητα με έναν υπολογιστικά αποτελεσματικό τρόπο. Η χρήση του προτεινόμενου πλαισίου θα ελαχιστοποιήσει τις χρονοβόρες και δαπανηρές εμπειρικές δοκιμές για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μεταβλητών της διεργασίας στις ταχύτητες ψύξης, των ποσών γεωμετρίας και ορισμένων δομικών χαρακτηριστικών. Η περαιτέρω εργασία θα μπορούσε να επεκτείνει αυτά τα αποτελέσματα σε ένα πραγματικό digital twin ικανό να υπολογίσει παράγοντες μεγαλύτερης κλίμακας, όπως είναι η γεωμετρία ανταλλακτικών (part geometry).
2. Διαπιστώνεται ότι η απόδοση της λεκάνης απορροής της σκόνης αυξάνεται με την μεγαλύτερη εισαγωγή θερμότητας λόγω της αύξησης της λωρίδας πάνω στην επιφάνεια της δεξαμενής. Ένα απλό αναλυτικό μοντέλο προτείνει την αποτελεσματικότητα της λεκάνης απορροής με βάση αποκλειστικά τις παραμέτρους διεργασίας και τις ιδιότητες του υλικού, ενεργοποιώντας πρόχειρους υπολογισμούς που δεν υπήρχαν προηγουμένως.
3. Η μεταφερόμενη ροή του λιωμένου μετάλλου αλλάζει σημαντικά την κατανομή της θερμοκρασίας, τους ρυθμούς ψύξης και τις παραμέτρους στερεοποίησης. Οι μηχανικές ιδιότητες όπως η μικρο-σκληρότητα και η δευτερεύουσα απόσταση των δενδρωδών βραχιόνων μπορούν να προβλεφθούν από τις υπολογισμένες παραμέτρους στερεοποίησης.
4. Ο υπολογισμός της γεωμετρίας της δεξαμενής, των πεδίων της θερμοκρασίας και της ταχύτητας και οι παράμετροι στερεοποίησης επιτρέπουν τον υπολογισμό πολλών δεδομένων. Παρέχουν

την κατανόηση των σχετικών διαφορών στην δομή, στις ιδιότητες και στα ελαττώματα που αναμένονται κατά την διάρκεια παραγωγής των εξαρτημάτων από διαφορετικά υλικά.

4.5 Δομικά στοιχεία ενός Digital Twin AM

4.5.1 Μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας

Η μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας και της ροής υλικού μπορεί να παρέχει τα μεταβατικά πεδία θερμοκρασίας, τα ποσοστά θέρμανσης και ψύξης, τις παραμέτρους στερεοποίησης και τις κυρίαρχες κατευθύνσεις της ροής θερμότητας (V. Manvatkar et al, 2014). Αυτές οι ποσότητες είναι κρίσιμες για την πρόβλεψη της δομής, των ιδιοτήτων, της υφής και των υπολειμμάτων, των παραμορφώσεων και των πολλών τύπων ελαττωμάτων. Τόσο το πεδίο της θερμοκρασίας στο σύνολο του χώρου όσο και οι συνθήκες ροής στην υγρή μεταλλική δεξαμενή πρέπει να υπολογίζονται με την επίλυση των εξισώσεων συντήρησης μάζας, ορμής, ενέργειας σε παροδική τρισδιάστατη μορφή με τις κατάλληλες συνθήκες.

Ο υπολογιστικός τομέας χωρίζεται σε μικρές κυψέλες ελέγχου και αλλάζει με τον χρόνο όσο το κομμάτι χιτίζεται στρώμα με στρώμα. Σε κάθε δεδομένη στιγμή, σε όλες τις κυψέλες αποδίδονται θερμικά εξαρτώμενες θερμοχημικές ιδιότητες είτε στερεών, είτε σκόνης, είτε υγρών, είτε αερίων. Σε κάθε βήμα οι ιδιότητες που αφορούν τις κυψέλες αλλάζουν λόγω των αλλαγών στο υλικό της κυψέλης και λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας του. Οι κατευθυντήριες εξισώσεις διακρίνονται σε αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες επιλύονται με ορισμένη τεχνική για να ληφθούν οι απαιτούμενες θερμοκρασίες και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού κράματος .

Διάφορες απλουστεύσεις χρησιμοποιούνται για να καταστήσουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της ροής ρευστού πιο εύκολα διαχειρίσιμα. Περιλαμβάνουν δισδιάστατες προσεγγίσεις (S. Morville et al, 2008) και τρισδιάστατους υπολογισμούς που αγνοούν τις μεταφορές θερμότητας (P. Michaleris, 2014) και θεωρώντας μια επίπεδη επιφάνεια (V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, 2015). Έχουν καταβληθεί προσπάθειες να καταρτιστεί το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας είτε με την μέθοδο της οριζοντίωσης (X. He, J. Mazumder, 2007) είτε με την μέθοδο του όγκου του υγρού (VOF) (J.Y. Lee, S.H. Ko, D.F. Farson, C.D. Yoo, 2015) .

Επιπλέον τα συστήματα πούδρας (powder bed systems) είναι ευαίσθητα τόσο στις ιδιότητες των πρώτων υλών όσο και στην αλληλεπίδραση μεταξύ της εισροής ενέργειας (είτε με λέιζερ είτε με δέσμη ηλεκτρονίων) και των σωματιδίων πούδρας. Εκτεταμένες προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη για την πρόβλεψη των μεταβατικών περιπτώσεων που περιλαμβάνουν την ανακατανομή της σκόνης λόγω των πιέσεων της ανάκρουσης και του σχηματισμού των ελαττωμάτων (S.A. Khairallah et al, 2016). Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί η ομοιότητα αυτών των διαδικασιών με τον σχηματισμό της κλειδαρότρυπας κατά την παραδοσιακή συγκόλληση με λέιζερ (J.Y. Lee et al , 2002).

4.5.2 Μοντελοποίηση της στερεοποίησης

Η μοντελοποίηση της μεταφερόμενης θερμότητας δεν βοηθά μόνο στην καλή κατανόηση της μορφολογίας της στερεοποίησης και την κλίμακα της μικρο-δομής ,αλλά επίσης χρησιμεύει και ως

βάση για την προσαρμογή της στερεοποιημένης υφής, η οποία είναι σημαντική για τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες και τις επιδόσεις των εξαρτημάτων (Z.Q. Wang et al, 2016). Πολλές από τις φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των διαδικασιών παρασκευής των πρόσθετων μετάλλων (W.J. Sames et al, 2016) είναι παρόμοιες με αυτές της συγκόλλησης (V. Manvatkar and A. De, T. DeRoy, 2014), οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τήξη και στερεοποίηση κάτω από θερμοκρασιακές κλίσεις και περιστροφές (S.S. Babu, 2009).

Ως εκ τούτου, μπορούμε να αξιοποιήσουμε την γνώση σχετικά με την πρόβλεψη της στερεοποίησης του μετάλλου (S.A. David, J.M. Vitek, 1989) και των μετασχηματισμών της στερεάς κατάστασης (J.S. Kirkaldy, 1991) κάτω από συνθήκες μονής ή πολλαπλής διέλευσης, καθώς και τις στατιστικές και μηχανικές ιδιότητες. Μεγάλες διαφορές στις υφές της στερεοποίησης λόγω της επιρροής των πεδίων της τοπικής θερμοκρασίας προκύπτουν από διαφορετικά πεδία σάρωσης τα οποία είναι αποδεδειγμένα. Ιδιαίτερα η στερεοποιημένη υφή εξαρτάται από τις τοπικές κατεύθυνσης της ροής της θερμότητας και του ανταγωνισμού ανάπτυξης κόκκων σε μία από τις προτιμώμενες κατευθύνσεις ανάλογα με την κρυσταλλική δομή του κράματος. Οι υπολογισμοί μεταφοράς θερμότητας λαμβάνοντας υπόψη τη ροή ρευστού στην λιωμένη δεξαμενή βοήθησε στην κατανόηση του μηχανισμού σχηματισμού της στερεοποιημένης υφής κατά την διάρκεια του AM. Με αυτά τα εργαλεία, οι ερευνητές έχουν αποδείξει την ικανότητα να προκαλούν ειδικές δομικές μικροδομές μέσα σε μια δεδομένη γεωμετρία που παράγεται από τη μέθοδο EBM (electron beam melting). Αυτό παρέχει την κατεύθυνση της AM να επιτυγχάνει στοχευμένες ιδιότητες μέσα σε μια δεδομένη γεωμετρία χωρίς να βασίζεται σε σύνθετες δευτερεύουσες διαδικασίες.

4.5.3 Πρόβλεψη της μικροδομής και των ιδιοτήτων

Η πρόβλεψη των μετασχηματισμών της στερεάς κατάστασης που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια εκατοντάδων θερμικών κύκλων ενώ γίνεται η διαδικασία οικοδόμησης στρώμα-στρώμα είναι ένα σημαντικό στοιχείο ενός digital twin. Σχετικά με την πρόβλεψη ιδιοτήτων (π.χ. σκληρότητα, απόδοση αντοχής, αντοχή σε εντάσεις, δημιουργία ρωγμής λόγω φορτίου κόπωσης ή πρόσκρουσης) συγκόλλησης βασισμένες στη μικροδομή, μέσω ημι-εμπειρικών λεπτομερειών φυσικής μοντελοποίησης, υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία (π.χ. A. Simar et al 2002-2010). Είναι απαραίτητο να εξετάσει την ύπαρξη φυσικών ελαττωμάτων στην πρόβλεψη της απόδοσης πρόσθετων κατασκευαστικών στοιχείων. Πρόσφατα, οι Prabhu et al (2015) έδειξαν ότι ακόμη και με ομοιόμορφη μικροδομή οι κατασκευές που γίνονται με εναπόθεση ενέργειας κατευθυνόμενη με λέιζερ εξαρτώνται από ελαττώματα όπως η αραιότητα της ύλης και έλλειψη συγχώνευσης. Έτσι, υπάρχει η ανάγκη να συνδέσουν τα μοντέλα μικροδομής και ιδιοκτησίας με τα μοντέλα για τον σχηματισμό ελαττωμάτων (P.S. Wei, 2011).

4.5.4 Μοντελοποίηση των υπολειπόμενων τάσεων (residual stresses) και παραμόρφωση

Οι υπολειπόμενες τάσεις και παραμορφώσεις προέρχονται από χωρικά μη ομοιόμορφους κύκλους θέρμανσης και ψύξης. Τα βασικά φυσικά φαινόμενα περιλαμβάνουν τη μεταφορά θερμότητας και την ισορροπία των τάσεων (T. Mukherjee, V. Manvatkar, 2017). Έχει σημειωθεί ότι η κατανομή της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά με μεταφορά της εντός της λιωμένης δεξαμενής.

Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας του, το φαινόμενο ροής λειωμένου μετάλλου αγνοείται συχνά κατά την επίλυση του προβλήματος θερμικής πίεσης. Η αριθμητική μοντελοποίηση υπολειπόμενων τάσεων και παραμορφώσεων στον AM είναι τυπικά βασισμένη στη διαδοχικά-συζευγμένη(sequentially-coupled) ανάλυση(P. Farahmand, R. Kavacevic, 2015), όπου το πεδίο θερμοκρασίας λύνεται πρώτο.

Το πεδίο θερμοκρασίας ως συνάρτηση του χρόνου εισάγεται στη συνέχεια στο μοντέλο τάσεων ως "θερμικά φορτία" για τον υπολογισμό της αντίδρασης των τάσεων . Πλήρως-ενωμένα μοντέλα επιλύουν την αγωγιμότητα της θερμότητας και τις εξισώσεις ισορροπίας τάσης ταυτόχρονα(J.Chao, M.A. Gharghour, 2016) και απαιτούν σημαντικά περισσότερους υπολογιστικούς πόρους. Τα περισσότερα μοντέλα διαμορφώνονται ως ένα σχεδόν στατικό πρόβλημα, καθώς η ταχύτητα του κύματος τάσης στα μέταλλα είναι μερικές τάξεις μεγέθους γρηγορότερη από εκείνη της αγωγής θερμότητας. Με άλλα λόγια, κάθε φορά που δημιουργείται ένα νέο πεδίο θερμοκρασίας, τα πεδία τάσης και παραμόρφωσης αναδιαμορφώνονται "στιγμιαία" για να φθάσουν σε μια νέα κατάσταση στατικής ισορροπίας. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM – finite element method) με ένα Lagrangian πλέγμα που παραμορφώνεται με το υλικό χρησιμοποιείται συνήθως, αλλά επίσης είναι δυνατές και άλλες προσεγγίσεις (π.χ. μέθοδοι σωματιδίων).

Η προσομοίωση ολόκληρου του τμήματος είναι απαραίτητη για τον ακριβή υπολογισμό των υπολειπόμενων τάσεων και της παραμόρφωσης. Ο μεγάλος αριθμός στρώσεων και τα περάσματα μέσα σε μία στρώση καθιστούν μερικές φορές ανέφικτη την προσομοίωση της κάθε στρώσης για την κατασκευή ενός τμήματος πλήρους μεγέθους. Η επιλογή της αθροιστικής ή της ατομικής προσέγγισης επηρεάζουν δύο σημαντικές πτυχές της μοντελοποίησης των συστημάτων AM : εναπόθεση υλικού και εισαγωγή θερμότητας από την δέσμη ενέργειας.

Πρώτον, για να ληφθεί υπόψη η εναπόθεση υλικών, ένα σφαιρίδιο για ολόκληρο το μέρος έχει δημιουργηθεί. Το σφαιρίδιο συχνά απλοποιείται ώστε να έχει ορθογώνια διατομή. Με ένα Lagrangian πλέγμα, η λεγόμενη (1) μέθοδος γέννησης στοιχείου (element birth) και (2) μέθοδος ήσυχου στοιχείου (quiet element) είναι οι δύο κοινώς χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τον χειρισμό της εναπόθεσης υλικού(R. Martukanitz, P. Michaleriset, 2014). Για τη πρώτη μέθοδο, τα στοιχεία για την κατάθεση του υλικού απενεργοποιούνται στην αρχή και στη συνέχεια ενεργοποιούνται σταδιακά (ή γεννιούνται) κατά μήκος της διαδρομής της κατασκευής. Για τη δεύτερη μέθοδο, όλα τα στοιχεία είναι παρόντα στην αρχή και τους αποδίδονται αυθαίρετες ιδιότητες έτσι ώστε η παρουσία τους να μην επηρεάζει τη θερμοκρασία και τις πιέσεις του ήδη κατατεθειμένου υλικού. Οι ιδιότητες για αυτά τα ήσυχα στοιχεία στη συνέχεια μεταβάλλονται σταδιακά με βάση τις φυσικές ιδιότητες και την διαδρομή υπό κατασκευή. Η προσέγγιση μεμονωμένης διέλευσης μπορεί να είναι υπολογιστικά προσιτή για την κατευθυνόμενη ενεργειακή απόθεση AM με σχετικά μικρό αριθμό περασμάτων.

Δεύτερον, για να περιγράψουμε την εισροή θερμότητας μία επιφάνεια θερμότητας ή μία ογκομετρική ροή θερμότητας συγκεντρωμένη στη δέσμη ενέργειας χρησιμοποιείται στην προσέγγιση μεμονωμένης διέλευσης (R. Martukanitz, P. Michaleriset, 2014). Η θέση του κέντρου ροής θερμότητας αναβαθμίζεται με βάση την διαδρομή εναπόθεσης, αντιπροσωπεύοντας έτσι μια κινούμενη πηγή θερμότητας. Για τη συγκεντρωτική διαδρομή, μια στατική ροή θερμότητας αντιστοιχεί στην συγκεντρωτική περιοχή σε μια χρονική περίοδο που καθορίζεται από το χρήστη.

4.6 Τρέχουσα κατάσταση και ανάγκες έρευνας

Τα συστατικά που απαιτούνται για την κατασκευή ενός ψηφιακού διδύμου AM εξακολουθούν να αναπτύσσονται και απαιτούνται ακόμη πολλές εργασίες για την ολοκλήρωσή τους. Ωστόσο παραδείγματα πρόσφατης προόδου από την ερευνητική κοινότητα των AM παρουσιάζουν ότι η κατασκευή ενός digital twin πρώτης γενιάς είναι εφικτή. Απαιτούνται σημαντικές προσπάθειες για την σύνθεση των διαφόρων μελών του μοντέλου για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου digital twin, με πειράματα δοκιμής-λάθους. Το digital twin δεν προορίζεται να αντικαταστήσει τα πειράματα. Ωστόσο θα βοηθήσει να μειωθεί ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων που απαιτούνται για την τροποποίηση των μερών.

Επίσης θα συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων και στην παροχή δομικά ορθών και αξιόπιστων τμημάτων-εξαρτημάτων. Αρκετές ερευνητικές ανάγκες θα πρέπει να αντιμετωπιστούν την επίτευξη αυτού του στόχου. Μια σημαντική απαίτηση είναι μία βάση δεδομένων της θερμοκρασίας που εξαρτάται από τις θερμο-φυσικές ιδιότητες για κράματα μηχανικής που χρησιμοποιούνται συχνά. Ο έλεγχος της υφής των συστατικών είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του AM. Η ανάπτυξη της στερεοποιημένης υφής πρέπει να μελετηθεί ποσοτικά με βάση τις αρχές της στερεοποίησης και των φάσεων μετασχηματισμού. Τα μοντέλα πολλαπλής κλίμακας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ογκομετρική αλλαγή κατά την διάρκεια της φάσης μετασχηματισμού της στερεάς κατάστασης. Δεδομένου του αυξανόμενου αριθμού των εμπορικών και ερευνητικών κωδικών για την μοντελοποίηση της θερμικής καταπόνησης του AM, ένα σύνολο προβλημάτων συγκριτικής αξιολόγησης θα είναι πολύτιμο για την εκτίμηση της ακρίβειας και τις ταχύτητας από διάφορους κωδικούς.

5 Συμπεράσματα

Προκειμένου οι επιχειρήσεις να προσαρμοστούν στις έννοιες του βιομηχανικού διαδικτύου, πρέπει να αξιολογήσουν την τρέχουσα θέση της εταιρείας όσον αφορά τις διεργασίες, διαδικασίες, εταιρική τους κουλτούρα και στρατηγική καθώς και τις τρέχουσες τεχνολογίες σε σχέση με το επίπεδο προσαρμογής που επιθυμούν να επιτύχουν. Για τις εταιρείες που επιδιώκουν να υιοθετήσουν και να επωφεληθούν από τις τεράστιες ευκαιρίες του Βιομηχανικού Διαδικτύου (Industry 4.0, Digital Twin), θα πρέπει να κάνουν αρκετές ριζοσπαστικές αλλαγές σε κάθε τομέα της επιχείρησής τους. Ορισμένους από αυτούς τους τομείς αλλαγών παρουσιάσαμε στα κεφάλαια 2 και 3.

Η πρώτη και πρωταρχική προϋπόθεση είναι η υιοθέτηση μιας στρατηγικής Industry 4.0, ή αλλιώς της μεταμόρφωσης της επιχείρησης ώστε να λειτουργεί άψογα σε έναν ψηφιακό κόσμο. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για τον ψηφιακό μετασχηματισμό των επιχειρήσεων, αλλά κοινός παρονομαστής είναι ο μετασχηματισμός σε τρεις βασικούς τομείς: εμπειρία του πελάτη, εταιρική λειτουργία και το επιχειρησιακό τους μοντέλο. Επίσης, απαιτείται η δημιουργία και η ενίσχυση της ανάπτυξης των απαραίτητων υποδομών ώστε να καταστεί δυνατή η διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων και πληροφοριών από τα συστήματα CPS (Cyber-Physical Systems) χωρίς να αμεληθεί η εξασφάλιση της ακεραιότητας και της ασφάλειας των δεδομένων.

Πράγματι ο ψηφιακός μετασχηματισμός των επιχειρήσεων έγινε εφικτός μέσω του Διαδικτύου. Το Digital Twin αποτελούν μέρος του ψηφιακού μετασχηματισμού, ο οποίος ενδέχεται να επηρεάσει τις περισσότερες επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο εφόσον είναι πρόθυμοι να αντιγράψουν το φυσικό τους λειτουργικό μοντέλο σε ψηφιακό προκειμένου να είναι εφικτή η ψηφιακή απομακρυσμένη παρακολούθηση, προβολή και έλεγχος των λειτουργιών με βάση το ψηφιακό σχήμα. Με άλλα λόγια, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε το διαδίκτυο ως ένα γιγαντιαίο φωτοτυπικό μηχάνημα το οποίο μπορεί να «αντιγράψει» φυσικά αντικείμενα (άτομα) για να δημιουργήσει τα αντίστοιχα ψηφιακά δίδυμα, επομένως χρησιμοποιεί μια αναπαράσταση των πληροφοριών για τα άτομα σε όρους bit. Ως εκ τούτου, δεν έχουμε να κάνουμε με εντελώς νέες ιδέες, αλλά μόνο με νέους τρόπους έκφρασης παλιών ιδεών.

Το DT μπορεί να εξελιχθεί ως εργαλείο χωρίς περιορισμούς από επιμέρους τομείς και πέρα από τα γεωγραφικά όρια οικονομιών με υψηλούς δείκτες ανάπτυξης. Μπορούν να συμβάλλουν σε υψηλές αποδόσεις και την οικονομική ανάπτυξη μέσω πλατφόρμων ανοιχτού κώδικα που υποστηρίζουν το ψηφιακό μετασχηματισμό των επιχειρήσεων. Εφόσον η βιομηχανία αγκαλιάσει την αλλαγή που επιφέρει το Βιομηχανικό Διαδίκτυο, θα έχει στη διάθεση της εργαλεία για να μειώσει το κόστος παραγωγής και το κόστος των από άκρο-σε-άκρο συναλλαγών, και μπορεί να ισορροπήσει την αβεβαιότητα η οποία ενδεχομένως μπορεί να συνοδεύει τη δυναμική της ψηφιακής οικονομίας. Οι διοικήσεις έχουν το κίνητρο να υποστηρίξουν ενεργά την αναδιάρθρωση των οργανωτικών δομών και να δημιουργήσουν νέες που επιδιώκουν τις πρωτοβουλίες για συνεργασία σε κοινότητες, επενδύσεις στη μαζική ανάπτυξη του εργατικού δυναμικού, κατάρτιση νέων δεξιοτήτων, ψηφιακή μάθηση, εκπαίδευση, και έρευνα (βλέπε §3.6)

Ένας βιομηχανικός τομέας στον οποίο θα εξυπηρετούσε η δημιουργία και η χρήση ενός ψηφιακού δίδυμου είναι η παραγωγή ανταλλακτικών εξαρτημάτων(AM). Η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες των AM εξαρτημάτων επηρεάζονται από πολλές μεταβλητές όπως είναι η ισχύς της πηγής θερμότητας,

η κατανομή της ισχύος, η ταχύτητα σάρωσης , η ταχύτητα τροφοδοσίας powder/wire, η απόσταση των θυρών και η προθέρμανση του υποστρωμάτων (D.D. Gu, W. Meinerset, 2012). Η κατασκευή δομικά ορθών στοιχείων με καλές μηχανικές ιδιότητες οι οποίες βασίζονται αποκλειστικά σε πειράματα (trial and error), είναι χρονοβόρα και δαπανηρή διότι είναι απαραίτητο να γίνουν διάφοροι συνδυασμοί μεταβλητών και διεργασιών (V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, 2014). Επομένως με την δημιουργία του AM DT θα ελαχιστοποιηθεί αυτή η τεχνική με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος. Τέλος ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορέσει να κάνει συντομότερη την πορεία πιστοποίησης ενός προϊόντος ενώ παράλληλα θα είναι εφικτή η μείωση ή εξάλειψη των ελαττωμάτων των τελικών προϊόντων.

Βιβλιογραφία

A. Gilchrist. (2016). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Bangken, Nonthaburi, Thailand: Alasdair Gilchrist.

A. Lyer. (2017). *Digital Twin: Possibilities of the new Digital twin technology*. Amazon Asia-Pacific Holdings Private Limited .

ACATTECH. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. *German National Academy of Science and Engineering* .

B. Brenner, V. Hummel. (2017). Digital twin as enabler for an innovative digital shopfloor management system in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University . *7th Conference on Learning Factories, CLF 2017* . Procedia Manufacturing 9 (2017) 198 – 205.

B. Talkhestani et al. A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method. *11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '17* (σσ. Procedia CIRP 67 (2018) 13 – 17). ScienceDirect.

BMWi. (2013). In focus: Germany as a competitive industrial nation. *Ministry of Economics and Technology* .

Broy M, Kargermann H, Achatz R. (2010). *Agenda cyberphysical systems: outlines of a new research domain*. Berlin: Acatech.

Consortium, The Industrial Internet. (2018, 05 02). *A global nonprofit partnership of industry, government and academia*. Ανάκτηση από <http://www.iiconsortium.org>: <http://www.iiconsortium.org>

Dmitry Ivanov et al. (2016). A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. *International Journal of Production Research, vol. 54* , 386-402.

H.L. Wei, J. E. (2017). Three-dimensional modeling of grain structure evolution during welding of an aluminum alloy.

H.L. Wei, J. E. (2017). Three-dimensional modeling of grain structure evolution during welding of an aluminum alloy. *Acta Mater.* 126 , σ. 413e425.

H.L. Wei, J.W. Elmer, T. DebRoy. (2017). Three-dimensional modeling of grain structure evolution during welding of an aluminum alloy.

Hermann M, Pentek T, Otto B. (2015). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review*. http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf.

Kargermann H, Helbig J . (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*.

http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf: Acatech.

- Kagermann H, L. W. (2011). *Industry 4.0: with the Internet of Things towards 4th industrial revolution*. <http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Industrie-4-0-Mit-dem-Internet-der-4-Industriellen-Revolution/52570/1>: VDI Nachrichte.
- Kempf. (2018, 05 02). *Introduction to Industrie 4.0*. Ανάκτηση από bitkom: http://www.bitkom.org/files/documents/Studie_Industrie_4.0.pdf
- Loskyll M et al. (2012). Context-based orchestration for control of resource-efficient manufacturing processes. *Future Internet* , vol: 4(3):737–761.
- M. Rüßmann et al. (2018, 05 08). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries* .Ανάκτηση από inovasyon: http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_Industry.4.0_2015.pdf
- Pereira AC, Romero F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Manufacturing Engineering Society International Conference 2017* (σσ. 1206–1214). MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain: Procedia Manufacturing 13.
- Rad CR et al. (2015). Smart monitoring of potato crop: a cyber-physical system architecture model in the field of precision agriculture. *Life for Agriculture* , vol. 6, pp:73-79.
- Ray Y. Zhong et al. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering (Elsevier)* , Research Intelligent Manufacturing—Review.
- S. Palit, A. Datta . (2017). Emergence of Digital Twins. *Journal of Innovation Management* , vol. 5, 14-34.
- Santos K., et al. (2017). Opportunities Assessment of Product Development Process in Industry 4.0 . *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, (σσ. 1358 – 1365). FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy .
- Schmitt M et al. (2013). Mobile interaction technologies in the factory of the future. *Analysis, Design, and Evaluation of Human – Machine Systems* , 12(1):536–542.
- Shiyong Wang et al. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Elsevier, Computer Networks, Volume 101* , 158-168.
- SMLC. (2011). Implementing 21st Century Smart Manufacturing. *SMLC* .
- T. Uhlemann et al. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering , Procedia CIRP 61 (2017) 335 – 340* . ScienceDirect.
- Tjahjono B. et al. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017* (σσ. 1175–1182). Vigo (Pontevedra), Spain: ScienceDirect, Procedia Manufacturing 13 (2017).
- Wagner T. et al. (2017). Industry 4.0 impacts on lean production systems. *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems* (σσ. 125-131). ScienceDirect, Procedia CIRP 63.
- Westkämper, E. . (2006). Digital manufacturing in the global Era. 1-11.

Zamfirescu CB et al. (2014). Do not cancel my race with cyber-physical systems. *IFAC proceedings*, (σσ. 4346-4351).

H.L. Wei, J.W. Elmer, T. DebRoy, Three-dimensional modeling of grain structure evolution during welding of an aluminum alloy, *Acta Mater.* 126 (2017)413e425

H.L. Wei, J.W. Elmer, T. DebRoy, Origin of grain orientation during solidification of an aluminum alloy, *Acta Mater.* 115 (2016) 123e131

V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing, *J. Appl. Phys.* 116 (12) (2014)124905

L.E. Svensson, B. Greftoft, H.K.D.H. Bhadeshia, An analysis of cooling curves from the fusion zone of steel weld deposits, *Scand. J. Metall.* 15 (1986)97e103

V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process, *Mater. Sci. Technol.* 31 (8) (2015) 924e930

H. Qi, J. Mazumder, H. Ki, Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition, *J. Appl. Phys.* 100(2) (2006) 024903

W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu, *Int. Mater. Rev.* 61 (2016)315–360.

V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, *J. Appl. Phys.* 116 (2014) 124905.

V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, *Mater. Sci. Technol.* 31 (2015) 924–930.

S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King, *Acta Mater.* 108 (2016)36–45.

M. Matthews, G. Guss, S.A. Khairallah, A.M. Rubenchik, P.J. Depond, W.E. King, *Acta Mater.* 114 (2016) 33–42.

H.L. Wei, J. Mazumder, T. DebRoy, *Sci. Rep.* 5 (2015) 16446.

S. Morville, M. Carin, P. Peyre, M. Gharbi, D. Carron, P. Le Masson, et al., *J. Laser Appl.* 24 (2012) 032008.

P. Michaleris, *Finite Elem. Anal. Des.* 86 (2014) 51–60.

X. He, J. Mazumder, *J. Appl. Phys.* 101 (2007) 053113.

J.Y. Lee, S.H. Ko, D.F. Farson, C.D. Yoo, *Phys. D. Appl. Phys.* 35 (2002) 1570–1576.

W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu, *Int. Mater. Rev.* 61 (2016)315–360.

V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, *J. Appl. Phys.* 116 (2014) 124905.

S.S. Babu, *Int. Mater. Rev.* 54 (2009) 333–367.

S.A. David, J.M. Vitek, *Int. Mater. Rev.* 34 (1989) 213–245.

D. Dye, O. Hunziker, R.C. Reed, *Acta Mater.* 49 (2001) 683–697.

J.S. Kirkaldy, *Scand. J. Metall.* 20 (1991) 50–61.

A.Simar, Y. Brechet, D. de Meester, A. Denquin, C. Gallais, T. Oardoen, *Prog. Mater. Sci.* 57 (2012) 95-183.

O Grong, H.R. Shercliff, *Prog. Mater. Sci.* 47(2002) 163-282

S.S. Babu “introduction to intergrated weld moneling” *ASM Handbook*, Vol 22B, Edited D.U. Furrer and S.L. Semiatin, ASM International, 2010

P.S. Wei, *J. Heat Transf.-Trans. ASME* 133 (2011) 031005

W. King, A.T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, C. Kamath, S.A. Khairallah, *Mater. Sci. Technol.* 31 (2015) 957–968.

R. Martukanitz, P. Michaleris, T. Palmer, T. DebRoy, Z.-K. Liu, R. Otis, et al., *Addit. Manuf.* 1-4 (2014) 52–63.

T. Mukherjee, W. Zhang, T. DebRoy, *Comput. Mater. Sci.* 126 (2017) 360–372.

Mukherjee, V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy, *Scr. Mater.* 127 (2017) 79-83.