

# Οπτική Μεταφορά για την Βιομηχανία 4.0

Δημοσθένης Στύλιος  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Τεχνολογίας  
Υπολογιστών

Πανεπιστήμιο Πατρών  
Πάτρα, Ελλάδα  
[up1059480@upnet.gr](mailto:up1059480@upnet.gr)

*Η εργασία αυτή βασίστηκε στο άρθρο **Optical Transport for Industry 4.0 [1]** και αποσκοπεί στο να ορίσει σε αυστηρά πλαίσια τις απαιτήσεις των οπτικών δικτύων για την Βιομηχανία 4.0, την δημιουργία ψηφιακού δίδυμου και να προτείνει σχετικές λύσεις. Πιο συγκεκριμένα επιδιώκει να περιγράψει τις προκλήσεις και το επιστημονικό ενδιαφέρον που προκύπτει από τις απαιτήσεις και τις προκλήσεις των δικτύων, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή στα δύο σενάρια της Βιομηχανίας 4.0, που θα περιγράψουν. Να εξηγηθεί η έννοια του ψηφιακού δίδυμου και να προταθούν δυο καινοτόμες λύσεις τόσο σε επίπεδο υλικού, με πλατφόρμες *silicon-photonics*, αλλά και *software* με χρήση αλγορίθμου μηχανικής μάθησης.*

*Λέξεις Κλειδιά* : *Factory Floor* : χώρος του εργοστασίου, όπου οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα. *OADM*: *optical add/drop multiplexers*, *CO*: *central office* κεντρικά γραφεία, *BBU* : *baseband unit*, *RRU*: *remote radio unit*, *C-RAN*: *centralized radio access network*.

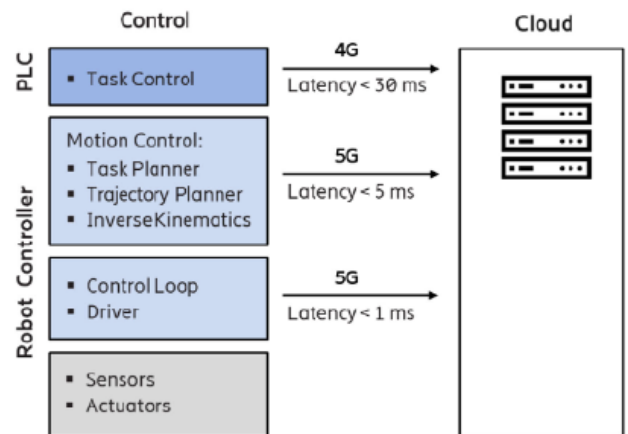
## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Βιομηχανία 4.0 ορίζεται ως η τέταρτη επανάσταση στο χώρο της παραγωγής και των μεταφορών. Όπως και οι προηγούμενες επαναστάσεις στην βιομηχανία, έτσι και αυτή οφείλει την ύπαρξη της στην σε συγκεκριμένες τεχνολογικές ανακαλύψεις. Πιο συγκεκριμένα η ανάπτυξη στον χώρο της μηχανικής μάθησης και των δικτύων πρόσβαση radio είναι αυτές που θα φέρουν την αλλαγή στο βιομηχανικό κλάδο, άλλα και σε αυτόν του logistics. Η συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθεί στο δεύτερο, δηλαδή στην διασύνδεση με 5G δίκτυα, το οποίο πρόκειται να διασφαλίσει διαφορετικά επίπεδα καινοτομίας σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας. Η έλευση του θα προσφέρει νέους τρόπους διασύνδεσης από ένα εργοστάσιο μέχρι κι ένα σύνθετο σύστημα φόρτωσης, εκφόρτωσης και αποθήκευσης κοντέινερ σε ένα σύγχρονο λιμάνι μεταφοράς αγαθών. Πρέπει να γίνει κατανοητό, ότι προσφέροντας σταθερή real-time επικοινωνία μεταξύ μηχανής ανθρώπου, αλλά και μηχανής με μηχανή είναι ο μόνος τρόπος να επιτευχθεί η βιομηχανία 4.0. Ένα δίκτυο που μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της μεγάλης απαίτησης σε χωρητικότητα, μικρή ως καθόλου latency, πυκνή διασύνδεση και διαφορετικές ανάγκες είναι αυτό που ονομάζεται 5G δίκτυο. Επιπροσθέτως, χρήσιμες ιδέες είναι αυτές του distributed edge cloud και network slicing, οι οποίες θα εξυπηρετήσουν τις διαφορετικές ανάγκες σε τηλεπικοινωνιακή κίνηση, εντός του ίδιου δικτύου. Επιπλέον οι οπτικές επικοινωνίες θα καθορίσουν τις προδιαγραφές σε bandwidth, latency και αξιοπιστία εντός του radio access network. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι αυτές οι εφαρμογές επεκτείνουν το πλαίσιο δράσης των οπτικών δικτύων πέρα από τα καθιερωμένα δίκτυα κορμού και passive optical networks.

## II. ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ 4.0

### A. FACTORY FLOOR

Το σενάριο το οποίο βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος είναι τα εργοστάσια παραγωγής αγαθών. Το φυσικό επίπεδο του χώρου του εργοστασίου αποτελείται από ρομπότ, μη επανδρωμένα οχήματα και μηχανήματα που συντελούν την γραμμή παραγωγής. Αντίθετα από την παραδοσιακή προσέγγιση το φυσικό στρώμα ενισχύεται με ένα επιπλέον κυβερνοφυσικό επίπεδο, το οποίο ασχολείται με την προσομοίωση διαφόρων λειτουργιών. Στην συνήθη περίπτωση κάθε αυτοματοποιημένη μονάδα ρομπότ, λειτουργεί με ένα τοπικό υπολογιστικό σύστημα (programmable logic controller PLC), το οποίο κοστίζει, απαιτεί τρόπους ψύξης και καταλαμβάνει χώρο. Επιπλέον τέτοιου είδους ελεγκτές έχουν περιορισμούς συγχρονισμού. Η μετακύλιση από αυτό το μοντέλο σε ένα περιβάλλον cloud, όπου όλες οι διεργασίες ελέγχου υλοποιούνται συγκεντρωτικά, οδηγεί σε μειωμένο αποτύπωμα των ρομπότ με δυνατότητα αύξησης της παραγωγής, μείωση του κόστους κάθε μονάδας ρομπότ (εφόσον ο τοπικός PLC δεν είναι αναγκαίος) και απλουστευμένη επικοινωνία μεταξύ ρομπότ. Η μεταφορά λοιπόν του συστήματος ελέγχου των ρομπότ σε cloud, επιτρέπει την διενέργεια προσομοιώσεων των διαφόρων λειτουργιών του εργοστασίου και την δημιουργία εν τέλει ψηφιακού δίδυμου. Η *Εικόνα 1* επιδεικνύει ένα τέτοιο περιβάλλον, επικεντρώνεται κυρίως στο latency.



*Εικόνα 1* Μοντέλο Cloud, via "Optical transport for Industry 4.0", 2020, *Journal Optical Communications and Networking*

Πριν την διενέργεια οποιοδήποτε δοκιμής της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ ρομπότ και PLC καθορίζονται πρώτα οι τιμές latency. Στο μοντέλο αυτό, οι λειτουργίες ελέγχου μεταφέρονται σε μια πλατφόρμα cloud, εντός του χώρου του εργοστασίου, αργότερα θα οριστεί και το όνομά της, έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η εικονική αναπαράσταση των σχετικών λειτουργιών. Αυτές, μπορούν τρέξουν εικονικά σε εμπορικό και όχι εξειδικευμένο hardware. Το Task Control, Motion Control ή και τα χαμηλότερα επίπεδα ελέγχου μετακινούνται στο cloud. Την

μεγαλύτερη απαίτηση την εισαγάγει το control loop, ωστόσο αυτή και όλες οι προκλήσεις αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

### B. Maritime port-Logistics Business

Το δεύτερο σενάριο το οποίο κεντρίζει το ενδιαφέρον, είναι τα λιμάνια μεταφοράς εμπορευμάτων και ειδικότερα λιμάνια τα οποία είναι εξειδικευμένα στην μεταφορά κοντέινερ. Αυτό το περιβάλλον αποτελείται από αυτοματοποιημένα συστήματα φόρτωσης και εκφόρτωσης κοντέινερ, στοιβάξεις αυτών, μη επανδρωμένων οχημάτων και λοιπές αυτοματοποιημένες λειτουργίες. Εδώ ένα 5G έχει να προσφέρει προοπτικές ανάπτυξης και αύξησης της παραγωγικότητας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας των λιμανιών. Είναι υψίστης σημασίας για αυτούς τους σκοπούς να επιτευχθεί μεταφορά δεδομένων μεταξύ κόμβων οι οποίοι μπορεί να είναι τερματικοί σταθμοί, όπως το λιμάνι που περιγράφεται παραπάνω ή και ακόμη ενδιάμεσοι σταθμοί διασκορπισμένοι σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Ένα λιμάνι θα χρησιμοποιεί λοιπόν ένα δίκτυο 5G, το οποίο πρέπει να ανταπεξέρχεται σε ένα μεγάλο αριθμό διασκορπισμένων και διασυνδεδεμένων αντικειμένων (αισθητήρες χώρου και κάμερες). Τέλος, οι εργασίες σε ένα λιμάνι απαιτούν ντετερμινιστικό και δυναμικό χαρακτήρα.

## III. ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ – DIGITAL TWIN

Το ψηφιακό δίδυμο είναι εικονικό μοντέλο, το οποίο αντικατοπτρίζει μια φυσική διεργασία, όπως τα παραπάνω σενάρια στο ψηφιακό κόσμο. Προσφέροντας σχεδόν real-time συσχέτιση ανάμεσα στον πραγματικό και τον ψηφιακό κόσμο, επιτρέποντας την εξ αποστάσεως παρακολούθηση και έλεγχο του συστήματος. Τελικώς, μπορεί να κάνει προσομοιώσεις για να δοκιμάσει και να ελέγξει το σύστημα, υπό διαφορετικές και αναπάντεχες συνθήκες. Οι βασικές εφαρμογές στην βιομηχανία 4.0 είναι:

### A. Πρόβλεψη και Συντήρηση εξοπλισμού.

Έχοντας πλήρη και ολιστική γνώση του εξοπλισμού και της κατάστασης λειτουργίας μπορούν να γίνουν προβλέψεις για την συντήρηση και την αντικατάσταση πριν την ύπαρξη βλάβης ή και να περιοριστούν αχρείαστες συντηρήσεις.

### B. Αύξηση Αποδοτικότητας

Με την ύπαρξη του ψηφιακού διδύμου μπορεί να μελετηθεί η παραγωγική διαδικασία ή και ακόμη να διενεργηθούν σενάρια και προβλέψεις για τα επόμενα λεπτά. Δίνεται έτσι η δυνατότητα αύξησης της αποδοτικότητας πέρα από τα συνηθισμένα στατιστικά μοντέλα προβλέψεων. Πλέον θα είναι εφικτό να προβλέπονται σενάρια βλαβών σε ένα εργοστάσιο ή ξαφνικής αύξησης των container που προσήλθαν σε ένα λιμάνι και να αντιμετωπίζονται άμεσα.

### C. Αποφυγή Ατυχημάτων

Σε ένα χώρο με πληθώρα αυτόνομων οχημάτων και βραχιόνων ρομπότ οι συγκρούσεις γίνονται ένα σημαντικό πρόβλημα. Η ύπαρξη ψηφιακού διδύμου εξασφαλίζει την αποφυγή αυτών.

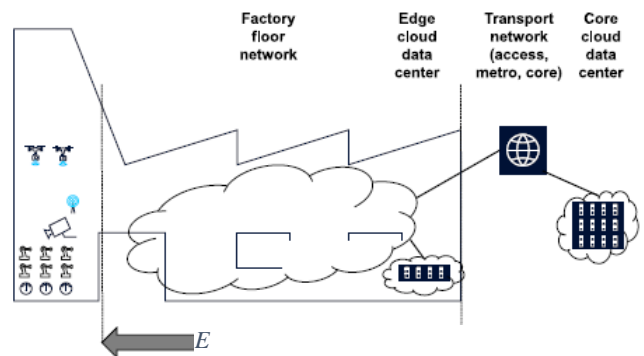
## IV. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ 4.0

Με καλώς ορισμένα δυο σπουδαία παραδείγματα της βιομηχανίας 4.0, είναι πλέον ευκολότερο να επισημανθούν οι προκλήσεις για τα οπτικά δίκτυα, τα οποία θα συντελέσουν στην διασύνδεση αισθητήρων, μην επανδρωμένα οχήματα

και λοιπούς συλλέκτες πληροφοριών, αλλά και την μεταφορά προς επεξεργασία αυτού του μεγάλου όγκου δεδομένων.

### A. Χωρητικότητα (Capacity)

Εφόσον ο χώρος του εργοστασίου μπορεί να υποστηρίξει μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών, οι ανάγκες σε χωρητικότητα πηγάζουν από τις πιο απαιτητικές από αυτές. Οι μεταδόσεις εξαρτώνται από την εκάστοτε περίπτωση και μπορεί να διαφέρουν από kilobits ανά δευτερόλεπτο μέχρι και χιλιάδες megabits ανά δευτερόλεπτο όταν πρόκειται για high-definition κάμερες. Επίσης, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, σε αυτή την περίπτωση το φορτίο upstream είναι πολύ μεγαλύτερο από του downstream, διότι η σχεδίαση περιλαμβάνει πληθώρα αισθητήρων και καμερών διασκορπισμένων στο χώρο του εργοστασίου, οι οποίοι διαρκώς συλλέγουν πληροφορίες.



Εικόνα 2. Edge Data Center via "Optical transport for Industry 4.0", 2020, Journal Optical Communications and Networking

Edge data center: Όπως φαίνεται στην εικόνα εντός του χώρου του εργοστασίου υπάρχει ένα data center, στο οποίο έχει γίνει ήδη αναφορά και από εδώ και στο εξής θα καλείται edge data center. Το data center θα πρέπει να είναι σε θέση να επεξεργαστεί όλη την πληροφορία που είναι ευάλωτη σε latency και φυσικά πρέπει να έχει την ίδια χωρητικότητα με τον χώρο του εργοστασίου. Άλλα και να έχει γίνει πρόβλεψη για την κίνηση που προκαλείται λόγω εργασιών γραφείου. Δηλαδή απαιτείται εγγυημένος διαχωρισμός τηλεπικοινωνιακής κίνησης, ποιότητα υπηρεσιών και ακρίβεια ανά συσκευή.

### B. Jitter Control

Ο έλεγχος του Jitter είναι τεράστιας σημασίας για εφαρμογές αυτοματισμού. Το jitter υπολογίζεται από end-to-end. «Είναι βέβαιο ότι τα πρωτόκολλα βιομηχανικού Ethernet θα συνεχίσουν να εξελίσσονται, έτσι ώστε να επιτευχθούν ντετερμινιστικές συνδέσεις με περισσότερη αξιοπιστία και αυξημένη ασφάλεια», σύμφωνα με το [2]. Ο ντετερμινισμός ορίζεται με τιμές, οι οποίες βρίσκονται στο εύρος 30ns μέχρι μερικά ms.

### C. Latency

Τα περιθώρια latency είναι καλά ορισμένα κι μάλιστα πολύ μικρά. Το latency υπολογίζεται από end-to-end. Το μικρό latency είναι ζωτικής σημασίας σε ένα δίκτυο εργοστασίου, καθώς εκπρόθεσμα μηνύματα μπορεί να οδηγήσουν σε διακοπή λειτουργίας ή ακόμα και να εγείρουν θέματα ασφάλεια για τα μηχανήματα/robot ή την παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα για συστήματα παρακολούθησης κίνησης latency requirement είναι  $100 \mu s$  [3]. Ενώ για αισθητήρες αυτοματισμού υψηλών ταχυτήτων το latency κυμαίνονται από δεκάδες microseconds σε δεκάδες milliseconds.

### D. Dynamics και Ευελιξία

Ο επαναπρογραμματισμός και η μετακίνηση των PLC διαφοροποιεί το πως η χωρητικότητα δεσμεύεται στο factory floor, θα πρέπει ωστόσο το δίκτυό μας να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει σε αλλαγές του εξοπλισμού, λόγω αλλαγών στην παραγωγική διαδικασία χωρίς να απαιτείται επαναπρογραμματισμός όλων του εξοπλισμού μεταγωγής.

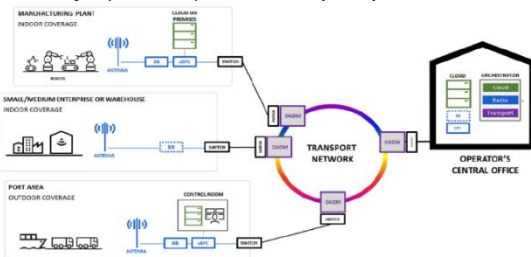
### E. Guaranteed Delivery

Για λόγους ασφάλειας και διατήρησής της παραγωγικής διαδικασίας πρέπει η αποστολή μηνυμάτων να είναι πάντα εγγυημένη. Θεωρώντας ότι ένα εργοστάσιό έχει 1000 μηχανές και κάθε ένα παράγει ένα μήνυμα κάθε millisecond τότε παράγονται  $10^{11}$ . Υποθέτοντας πιθανότητα απώλειες  $10^{-10}$ , αυτό οδηγεί σε  $10^{11} * 10^{-10} = 10$  παύσεις της παραγωγικής διαδικασίας, γεγονός που καθιστά ακόμη και αυτή την μικρή πιθανότητα λάθους απαγορευτική.

## V. ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ 4.0

Τόσο το σενάριο της έξυπνης βιομηχανικής μονάδας όσο και του λιμανιού βασίζονται σε non-public network. Ένα NPN είναι ένα καθαρά για ιδιωτική χρήση, η οποία δύναται να εξασφάλιση όσες απαιτήσεις περιεγραφήκαν παραπάνω, αλλά και ασφάλεια στην μεταφορά ευαίσθητων δεδομένων, τα οποία σε ένα δημόσιο δίκτυο δεν θα ήταν τόσο ασφαλή. Το πιο διαδομένο standard τέτοιου τύπου δικτύου είναι το 5G-Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA). Το στάνταρ μπορεί να υλοποιήσει τέσσερα σενάρια, το ένα εκ των οποίων είναι αυτό του πλήρως ανεξάρτητου δικτύου, ενώ τα άλλα τέσσερα εμπεριέχουν την έννοια του διαμοιρασμού. Με τον διαμοιρασμό των πόρων επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους, διακινδυνεύονται τα όρια εμπιστοσύνης και guarantee delivery.

Ένα τέτοιο δίκτυο, το οποίο εξυπηρετεί τις διαφορετικές κατενοποιημένες διεργασίες εργοστασίου, μιας αποθήκης και ενός λιμανιού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3. Παράδειγμα τοπολογίας στο πεδίο των συχνοτήτων για "Optical transport for Industry 4.0", 2020, Journal Optical Communications and Networking

Οι τρεις διαφορετικές εργασίες αξιοποιούν το ίδιο δίκτυο μεταφοράς το οποίο απεικονίζεται με τους add/drop multiplexers OADM, οι οποίοι βασίζονται σε μια τοπολογία οπτικού δακτυλίου. Σε αυτή την τοπολογία η διασύνδεση σε επίπεδο ρομπότ γίνεται με ένα NPN, επιπλέον τόσο το baseband όσο και το virtual evolved packet core (vEPC) γίνονται εντός της μονάδας του εργοστασίου. Η Εικόνα 3 επιδεικνύει ακόμη και το κεντρικό κτίριο, από που οργανώνονται οι υπηρεσίες cloud, radio και transport. Χρησιμοποιώντας αυτά επιτυγχάνεται η λειτουργία των τριών διαφορετικών εργασιών, αλλά και αναλαμβάνει το network slicing, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αξιοποίηση διαφορετικού όγκου δεδομένων. Η ετερογένεια των εργασιών τονίζει την αναγκαιότητα το δίκτυο να μπορεί να ανταπεξέλθει σε όλες τις απαιτήσεις οι οποίες έχουν περιγράψει αναλυτικά στην ενότητα 2. Όσο αφορά την χωρητικότητα, είναι προφανές ότι ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να ανταπεξέλθει σε κάθε τέτοια απαίτηση, η κύρια απαίτηση για αυτή την περίπτωση είναι η εξυπηρέτηση των αναγκών σε χωρητικότητα, ενώ ταυτόχρονα γίνεται μείωση του κόστους ανά μεταδιδόμενο bit. Στην απαίτηση για latency, απάντηση είναι η αποφυγή πολλών επιπέδων μεταγωγής, παρά την χρησιμότητα της ηλεκτρονικής μεταγωγής πακέτου, το κάθε στάδιο εισαγάγει επιπλέον latency. Επιπροσθέτως το latency αυτό εξαρτάται από το φορτίο, το οποίο οδηγεί σε αλλαγές στις καθυστερήσεις. Προς αποφυγή λοιπόν της επεξεργασίας πακέτων, επιλέγεται η απευθείας λειτουργία στο οπτικό επίπεδο με την τεχνική wavelength division multiplexing. Το WDM επιτρέπει τον συνδυασμό πολλών μικρών καναλιών πάνω στην ίδια οπτική ίνα, δίνοντας τη δυνατότητα μεταφοράς και δρομολόγησης δεδομένων χωρίς την επεξεργασία πακέτων, η οποία αναμφίβολα εισαγάγει latency. Συνεπώς, η μεταφορά είναι ισοδύναμη με μια σύνδεση point-to-point η οποία έχει ντετερμινιστική καθυστέρηση διάδοσης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 τα μήκη κύματος ταξιδεύουν εντός του οπτικού δακτυλίου, κάθε κανάλι εισάγεται από τους add/drop OADMS στους τερματικούς κόμβους. Έχοντας εξασφαλίσει αποδοτικούς OADMS, τα οπτικά κανάλια, δηλαδή τα μήκη κύματος δεσμεύονται και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλα ζευγάρια πηγής-προορισμού είναι λοιπόν τετριμμένος ο αριθμός τους ανά οπτικό δακτύλιο. Ωστόσο, ένα κρίνεται αναγκαίο μπορεί να γίνει χρήση περισσότερων δακτυλίων. Αυτή η τοπολογία εξυπηρετεί άμεσα το σενάριο C-RAN, όπου πολλαπλά RRU είναι συνδεδεμένα απευθείας στο BBU που βρίσκεται στο central office. Οπτική σύνδεση με το ίδιο μήκος καναλιού τόσο για downstream όσο και upstream, θα οδηγήσει σε συμμετρική καθυστέρηση και προς τις δυο κατευθύνσεις.

Ο επόμενος σημαντικός παράγοντας για ένα μοντέλο της βιομηχανίας 4.0 είναι η δημιουργία ενός εικονικού δικτύου, το οποίο επιτρέπει ένα πιο αποτελεσματικό χειρισμό radio, transport και cloud υπηρεσιών. Οι υπηρεσίες αυτές γίνονται από το central office (CO), όπως φαίνεται στην εικόνα 3, δηλαδή ίδιο το central office φιλοξενεί κόμβους για διαφορετικές λειτουργίες, όπως κεντρικό BB processing, λειτουργίες cloud για συγκεκριμένες εφαρμογές και δρομολόγηση. Ένα οπτικό δίκτυο αρχιτεκτονικής 5G από την κεραία έως το CO, είναι κατάλληλο και αφοσιωμένο στην μεταφορά time-sensitive πληροφοριών, με εγγυημένο low-latency, symmetric propagation delay και υποστήριξη για

συγχρονισμό συχνότητας και φάσης. Η μέγιστη χωρητικότητα ενός eCPRI καναλιού είναι 25gbps, συνεπώς είναι συμβατό με οπτικά δίκτυα για μικρά εργοστάσια, τα οποία χρησιμοποιούν τα πιο αποτελεσματικά είδη διαμόρφωσης NRZ ή OOK.

## VI. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ HARWARE ΚΑΙ SOFTWARE ΠΟΥ ΘΑ ΕΠΙΤΡΕΨΟΥΝ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

Συνοψίζοντας, η χρήση dense wavelength division multiplexing (DWDM) επιτρέπει τον καθαρό διαχωρισμό των πόρων του δικτύου. Επιπλέον, ο συνδυασμός με τεχνικές μεταγωγής επιτρέπει τον διαμερισμό των πόρων σε επίπεδο subwavelength, καθιστώντας το low-latency ντετερμινιστικό. Ωστόσο, τα κύρια προβλήματα για οπτικά δίκτυα πρόσβασης είναι το μεγάλο κόστος και τα προβλήματα διαχείρισης (manageability). Η ενότητα είναι αφιερωμένη σε τεχνολογίες που θα επιτρέψουν την οπτική επικοινωνία της επομένης γενιάς

### A. Photonic based equipment

Ο σημερινός εξοπλισμός οπτικών δικτύων δεν επαρκεί και ούτε η βελτίωση του μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις που περιγράψαμε, διότι είναι επικεντρωμένος σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων και PON δίκτυα πρόσβασης. Τα ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα πυριτίου γνωστά και ως silicon photonics είναι αυτά που θα επιτύχουν την μείωση του κόστους και θα εκπληρώσουν τις απαιτήσεις που έχουν τονιστεί. Silicon photonic transceivers είναι ήδη ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε data centers, λόγω των αναγκών για μεγαλύτερο bandwidth, μικρότερο κόστος και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο ο χώρος ενός data center διακατέχεται από ειδικές συνθήκες δηλαδή το κόστος δεν είναι τόσο περιοριστικό και ούτε η θερμοκρασία αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Σε αντίθετη περίπτωση μια μονάδα radio(5G mm Wave antenna), η οποία βρίσκεται εντός ενός εργοστασίου καλείται να αντιμετωπίσει πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η μελλοντική σχεδίαση απαιτεί μια τέτοια μονάδα να ενσωματώνει RF, radiating στοιχεία και διασυνδέσεις με φωτονικά στοιχεία. Επίσης θα πρέπει να είναι μικρή σε μέγεθος και όλη σχεδίαση να λαμβάνει υπόψη ότι πρέπει να λειτουργεί για διαφορετικές μηχανές. Συνεπώς η ανάγκη για ενσωματωμένα συστήματα photonic transceiver, μέσα σε ένα multi-chip με ολοκληρωμένα κυκλώματα ψηφιακών εφαρμογών ASICs είναι μεγάλη.

### B. Federated Learning

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια επέκταση σχετικά με τις λύσεις που θα κάνουν την οπτική επικοινωνία στην βιομηχανία 4.0 εφικτή. Πέρα από την τεχνολογική βελτίωση υπάρχει και δυνατότητα χρήσης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, οι οποίοι μπορούν να συμβάλουν στην εκπλήρωση των απαιτήσεων του δικτύου. Ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης αποτελεί ένα «έξυπνο» μοντέλο το οποίο καλείται να επίλυση ένα πρόβλημα, έχοντας το ίδιο την δυνατότητα να εξελίσσεται. Έχει την δυνατότητα βελτίωσης διότι αποτελείται από δυο φάσεις αυτή της εκπαίδευσης και αξιολόγησης. Σε κλασσικές περιπτώσεις τα δεδομένα που θέλουν να ταξινομηθούν χωρίζονται σε αυτά με τα οποία το

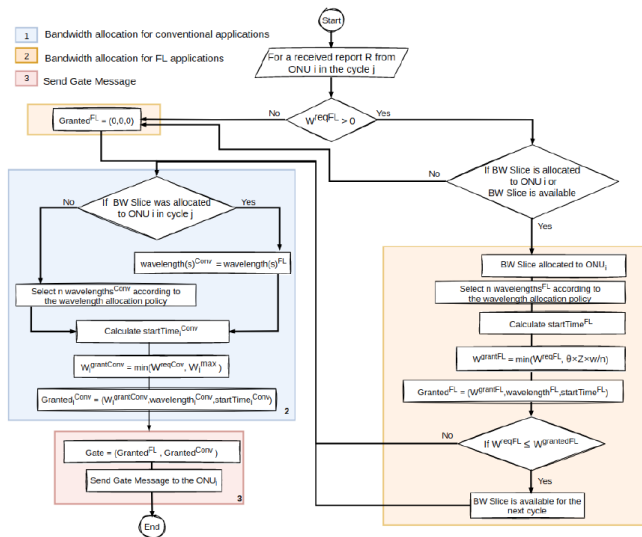
μοντέλο θα εκπαιδευτεί και σε αυτά που είναι γνωστά και χρησιμεύουν στην αξιολόγηση. Αυτό πολλές φορές απαιτεί χρόνο(latency), αλλά και το κυριότερο την διαχείριση συνόλου πληροφοριών τρίτων, αλλά και έλλειψη δυναμικού χαρακτήρα. Χαρακτηριστικά που για ένα σύστημα της βιομηχανίας 4.0 δεν καθίστανται δελεαστικά, καθώς τα εργοστάσια είναι απρόθυμα να δώσουν όλο το συνολικό όγκο των δεδομένων τους, αλλά και εάν γίνουν μικρές αλλαγές στο χώρο του εργοστασίου ή του λιμανιού το μοντέλο θα πρέπει να εκπαιδευτεί από την αρχή. Σε αυτό το σημείο εισαγάγετε η έννοια του federated learning[4], όπου τα δεδομένα και η αξιολόγηση προσφέρονται από τον client εδώ κάθε μονάδα που ζητά bandwidth, την ώρα που το χρειάζεται. Κάθε edge data center κάνει training, μετά από αυτό το βήμα οι νέοι παράμετροι στέλνονται στο CO, ενώ τα training data παραμένουν στο edge data center. Στο τέλος ο CO κάνει combine τις παραμέτρους για να παραχθεί το νέο master model. Εξαιρετικό παράδειγμα τέτοιας λογικής εκμάθησης είναι η διόρθωση κειμένων στο κινητό, όπου σταδιακά το κινητό εκπαιδεύεται να διορθώνει τα λάθη και να συμπληρώνει τις λέξεις που εκάστοτε χρήστης κάνει λάθος.

### Multi-wavelength BS algorithm for TWDM

Ο αλγόριθμος BS χρησιμοποιείται για συστήματα πολλαπλών μηκών καναλιών και χρησιμοποιεί ένα μεταβαλλόμενο κύκλο δυναμικής δέσμευσης πόρων. Ο MW-BS κρατά το συνολικό FL traffic για όσο διάστημα υπάρχει απαίτηση bandwidth από FL client. Η χρήση δυναμικού polling cycle μειώνει την καθυστέρηση από FL traffic και αδιαφορεί για πληροφορίες σχετικά με την διάρκεια επόμενων κύκλων. Το διάγραμμα της Εικόνας 5, συνοψίζει την διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος.

Η μονάδα οπτικού δικτύου στέλνει μήνυμα, με το οποίο ζητά bandwidth τόσο για Federated Learning , όσο και για συμβατικές εφαρμογές . Όταν το μήνυμα φτάσει στο τερματικό (CO), αν υπάρχει ,πρώτα αποστέλλεται το bandwidth για FL (reserved slice) block1, ειδάλως δεσμεύεται bandwidth συμβατικής κίνησης. Το τερματικό διαλέγει το μήκος κύματος, βάσει της πολιτικής δέσμευση του TWDM. Υπάρχουν δύο είδη πολιτικής το MSD και το SSD, για το πρώτο το τερματικό προσφέρει ένα προκαθορισμένο μήκος κύματος, ενώ για το δεύτερο όλα τα μήκη καναλιού. Ενώ για την FF πολιτική, το CO προσφέρει το πρώτο διαθέσιμο μήκος καναλιού και μετά υπολογίζει το παράθυρο μετάδοσης για κάθε μήκος καναλιού, βάσει του αριθμού των wavelength και της χωρητικότητας του δικτύου που είναι δεσμευμένη για FL. Το CO υπολογίζει και το bandwidth για της συμβατικές εφαρμογές.





Εικόνα 4 Federated Learning via Federated Learning over Next-Generation Ethernet Passive Optical Networks

### Αλγόριθμος προτεραιότητας(Classification)

Η παραπάνω λύση επιλύει προβλήματα ελαστικότητας του δικτύου και σίγουρα μειώνει το κόστος, αλλά όπως έχει ήδη οριστεί σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον τα εγγυημένα όρια παραλάβης μηνυμάτων δεν αποτελούν μόνο quality of service αλλά είναι ζωτικής σημασίας. Για το λόγο αυτό, τα προβλήματα εξυπηρέτησης που εγείρονται από ένα δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί federated learning καλούνται να επιλυθούν με μια πολιτική προτεραιοτήτων. Αρχικά η τηλεπικοινωνιακή κίνηση πρέπει να κατηγοριοποιηθεί ως federated learning, delay -critical, delay-sensitive και best - effort, κάθε είδος κίνησης κατηγοριοποιείται βάση προτεραιότητας. Επειδή η καθυστέρηση θεωρείται ότι

μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή της παραγωγικής διεργασία ταξινομούνται ως εξής: delay-critical (highest) federated learning ( high ), delay -sensitive ( medium) και best-effort (low). Προφανώς δίνοντας μικρότερη προτεραιότητα στο federated learning μειώνει την δυναμική και αποδοτική δέσμευση πόρων, θεωρείται ωστόσο ότι η ασφάλεια ενός εργοστασίου προέχει.

### VII. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για να επιτευχθεί η βιομηχανία 4.0 πρέπει να υπάρχει αυτοματοποιημένος και έξυπνος συγχρονισμός ανάμεσα σε radio και transport network. Το μεγάλο εύρος απαιτητικών βιομηχανικών εφαρμογών, υποδεικνύει ότι το δίκτυο θα πρέπει να ανταπεξέρχεται σε πληθώρα απαιτήσεων με κυριότερες την χωρητικότητα, το latency και το jitter control. Σχετικές προτάσεις για λειτουργία απευθείας στο οπτικό επίπεδο(DWDM), μείωση των αριθμών μεταγωγών και χρήση τοπολογίας δακτυλίου αναπτυχθήκαν στην παρούσα εργασία. Για την υλοποίηση όμως απαιτείται η εξέλιξη της τεχνολογίας των silicon photonics ή χρήση αλγορίθμων έξυπνης δέσμευσης πόρων του δικτύου

### REFERENCES

- [1] R.Sabella, P.Ioavanna, G.Bottari, F.Cavaliere, "Optical transport for Industry 4.0", 2020, Journal Optical Communications and Networking
- [2] Z. Lin and S. Pearson, "An inside look at industrial Ethernet communication protocols," White Paper, 2018. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/wp/spry254b/spry254b.pdf>
- [3] 5G-PPP, "5G and the factories of the future," White Paper, 2015. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White-Paper-on-Factories-of-the-Future-Vertical-Sector.pdf>
- [4] Oscar J. Ciceri, Carlos A. Astudillo, Zuqing Zhu, and Nelson L. S. da Fonseca, "Federated Learning over Next-Generation Ethernet Passive Optical Networks"