

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την ποσοτικοποίηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων παραγωγής, σύμφωνα με την Θεωρία της Πληροφορίας και την εντροπία του Shannon, με γνώμονα την 4^η Βιομηχανική Επανάσταση

Νεφέλη Πετράκη, 1054532, Υπεύθυνος Καθηγητής Δημήτριος Μούρτζης

Στην εποχή της επανάστασης της βιομηχανίας 4.0, η πολυπλοκότητα των συστημάτων κατασκευής έχει αυξηθεί σημαντικά. Το παραδισακό σύστημα παραγωγής είναι πλέον ξεπερασμένο και έχει μεταβεί στο σύστημα παραγωγής Industry 4.0, που αποτελείται από μια ποικιλία βασικών παραγόντων που συμβάλλουν στην υψηλή πολυπλοκότητά της. Προσπαθώντας να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μαζικής προσαρμογής και εξατομίκευσης, αναγνωρίζει την ανάγκη και τη σημασία της εξυπηρέτησης της παραγωγής, μέσω των Συστημάτων Υπηρεσιών Προϊόντων (PSS). Τα έξυπνα εργοστάσια, που αποτελούνται από πολλές νέες τεχνολογίες όπως το Internet of Things, τα Big Data, το Cloud Computing, αντιμετωπίζονται ως Cyber Physical Systems, με υψηλή πολυπλοκότητα και πολλαπλές διασυνδέσεις μεταξύ τμημάτων και παραγόντων.

Λαμβάνοντας υπόψη το παράδειγμα Industry 4.0 και τις αυξημένες ανάγκες των πελατών, η ανταγωνιστικότητα και η βιωσιμότητα μιας επιχείρησης απαιτεί τη συνεχή παρακολούθηση της απόδοσης του PSS, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η μέτρηση της απόδοσης ενός Cyber Physical System είναι υψίστης σημασίας για την ανταγωνιστικότητα, την αποδοτικότητα κόστους και την επιχειρηματική απόδοση. Η αξιολόγηση της απόδοσης, ωστόσο, εξακολουθεί να είναι αρκετά δύσκολη και πρέπει να προχωρήσει προκειμένου να συμβάλει αποτελεσματικά στη διαδικασία παραγωγής. Αναμφίβολα, το Industrial Internet of Things και τα Big Data καθώς και άλλες καινοτόμες εφαρμογές όπως το Digital Twin συμβάλλουν σε πολύ μεγάλο βαθμό σε αυτή τη διαδικασία, καθώς τα Cyber Physical Systems (CPS) έχουν αναπτυχθεί με χαρακτηριστικά όπως εύκολη πρόσβαση στη γνώση, λάθος πρόληψη, ευελιξία και λήψη αποφάσεων. Το σύστημα παραγωγής Industry 4.0 και η αξιολόγηση της απόδοσής του είναι προφανώς υψηλής πολυπλοκότητας, καθώς υπάρχουν πολλοί Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPI) που πρέπει να ληφθούν υπόψη, αλλά σε συνδυασμό με το Lean Thinking μπορούν να εξαλείψουν τα απόβλητα, να βελτιστοποιήσουν τον έλεγχο του συνολικού συστήματος και επεξεργασία δεδομένων.

Η πολυδιάστατη ανταλλαγή γνώσεων σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα σε ένα βιομηχανικό PSS, υπογραμμίζει την αναγκαιότητα ποσοτικοποίησης όλων αυτών των

πληροφοριών που περιπλέκονται περαιτέρω από πολλούς παράγοντες και δείκτες που αυξάνονται μέρα με τη μέρα. Στην πρόκληση της αποτελεσματικής αντιμετώπισης όλης αυτής της ποσότητας πληροφοριών, η Θεωρία Πληροφορίας έχει βρεθεί αρκετά υποσχόμενη καθώς παρέχει μαθηματικά μοντέλα συστημάτων επικοινωνίας που μπορούν να εφαρμοστούν στο σύστημα παραγωγής Industry 4.0, με βάση πιθανότητες και κανάλια επικοινωνίας προκειμένου να χρησιμοποιήσετε τους διαθέσιμους πόρους και ελαχιστοποιήσετε τον χρόνο για τη μεταφορά δεδομένων. Το μοντέλο της θεωρίας πληροφορίας αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των πληροφοριών και των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των διαφόρων τμημάτων μιας γραμμής παραγωγής στο σύστημα παραγωγής Industry 4.0 καθώς και για μέτρα πολυπλοκότητας του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο των τμημάτων, των σταθμών και των μηχανών της γραμμής παραγωγής, αλλά επίσης εξωτερική ανατροφοδότηση και αλληλεπίδραση με τους πελάτες.

Έτσι, για να μετρηθεί αυτή η πολυπλοκότητα σε ένα σύστημα παραγωγής χρειάζεται μια ποσοτική προσέγγιση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή του μοντέλου της Θεωρίας της Πληροφορίας, με τον καθορισμό μετρήσεων για την πολυπλοκότητα και την ικανότητα. Ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε ένα σύστημα παραγωγής και να παρακολουθείται, είναι η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των παραγόντων της διαδικασίας ανάπτυξης και συντήρησης του προϊόντος μεταξύ των διαφόρων τμημάτων καθώς και η ποσοτικοποίηση αυτών των πληροφοριών.

Η εξέταση των παραγόντων πολυπλοκότητας σε ένα σύστημα παραγωγής Industry 4.0 είναι ένα δύσκολο ζήτημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία. Παρέχεται μια ιστορική ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ Θεωρίας Πληροφορίας και των συστημάτων παραγωγής. Για την ανάλυση, εφαρμόζεται αλγόριθμος βιβλιογραφικής ανασκόπησης, με τεχνική βασισμένη σε λέξεις-κλειδιά.

Πριν από 60 χρόνια αρχικά αναφέρθηκε η εντροπία πληροφοριών και πρόσφατα, η θεωρητική έρευνα σχετικά με την εφαρμογή της εντροπίας πληροφοριών των συστημάτων παραγωγής έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο. Για παράδειγμα, αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι εφόσον ήταν γνωστές διαφορετικές πιθανότητες προϊόντων στη γραμμή συναρμολόγησης, η ποσότητα των πληροφοριών που απαιτούνται για αυτήν την παρτίδα προϊόντων μπορούσε να υπολογιστεί και η εντροπία στα συστήματα θεωρήθηκε ότι είναι η συνάρτηση της κλίμακας παραγωγής. Ο Frizelle πρότεινε το DEM (μοντέλο δυναμικής εντροπίας) και το διαίρεσε σε δομική πολυπλοκότητα και λειτουργική πολυπλοκότητα. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι η έννοια της εντροπίας πληροφοριών που υπολογίζεται στα συστήματα παραγωγής ήταν

διαφορετική από την κοινή της. Η εντροπία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την πολυπλοκότητα των συστημάτων παραγωγής και διαπίστωσε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η ποσότητα των καταστάσεων στις εγκαταστάσεις, τόσο μεγαλύτερη ήταν η εντροπική αξία. Ευσταθίου κ.ά. απέδειξε ότι η συστηματική εντροπία ισούται με την πολυπλοκότητα και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει και να ελέγξει τη συνολική ποσότητα πληροφοριών των συστημάτων παραγωγής.

Με βάση τις μελέτες που προαναφέρθηκαν, ορίζεται η συγκεκριμένη έννοια της εντροπίας πληροφοριών και τα μοντέλα εντροπίας αναπτύσσονται επίσης αναλύοντας τις σχέσεις των εγκαταστάσεων, των εξαρτημάτων και των εργασιών στα συστήματα, έτσι ώστε τα συστήματα παραγωγής να μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας ποιοτικούς και ποσοτικούς τρόπους. .

Όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου στατικής εντροπίας είναι διαθέσιμες από την παραγγελία παραγωγής και τα σχέδια διαδικασίας για μεμονωμένα εξαρτήματα. Πρέπει να καθοριστεί ένας δείκτης πολυπλοκότητας για το σχεδιασμό του συστήματος παραγωγής. Ο δείκτης παίρνει τη μορφή εντροπίας για την αξιολόγηση της συναρμολόγησης ενός προϊόντος. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι η συστηματική εντροπία ισούται με την πολυπλοκότητα και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή και τον έλεγχο του συνολικού όγκου πληροφοριών των συστημάτων παραγωγής. Υπάρχουν μεθοδολογίες που πρότειναν ένα μέτρο πολυπλοκότητας βασισμένο στην εντροπία πληροφοριών για τον προγραμματισμό συναρμολόγησης. Πιο πρόσφατα, εφαρμόστηκε η συνάρτηση εντροπίας για να ποσοτικοποιήσει την πολυπλοκότητα των συστημάτων κατασκευής και τις διαμορφώσεις τους με παραδείγματα σε διαδικασίες μηχανικής καταργασίας.

Με την διεξαχθείσα έρευνα, όχι μόνο ορίζεται η έννοια της θεωρητικής εντροπίας πληροφοριών στα συστήματα παραγωγής, αλλά επίσης τα μοντέλα ή η λειτουργία εντροπίας αναπτύσσονται με την ανάλυση των σχέσεων μεταξύ εγκαταστάσεων, εξαρτημάτων και εργασιών στα συστήματα και τα συστήματα παραγωγής. περιγράφεται ποιοτικά και ποσοτικά. Αλλά οι ερευνητές έχουν δώσει έμφαση στη θεωρητική ανάλυση, ενώ έχουν παραμελήσει την εφαρμογή της θεωρητικής πληροφορίας εντροπίας στα συστήματα παραγωγής. Επιπλέον, το μοντέλο που αναπτύσσεται συνήθως περιορίζεται στην ιδανική κατάσταση. Έτσι, η ανάπτυξη λειτουργικών μοντέλων εντροπίας των συστημάτων παραγωγής και η μέτρησή τους με τον προγραμματισμό των πραγματικών συστημάτων κατασκευής έχει θεμελιώδεις αρχές που θα οδηγήσουν στη μέτρηση της πολυπλοκότητας προς το Industry 4.0.

Σύμφωνα με το σύστημα επικοινωνίας του Shannon, τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος επικοινωνίας είναι η πηγή πληροφοριών, το μήνυμα, ο πομπός, το σήμα, η πηγή θορύβου, ο δέκτης και ο προορισμός. Πιο συγκεκριμένα, η πηγή πληροφοριών επιλέγει ένα επιθυμητό μήνυμα από ένα σύνολο πιθανών μηνυμάτων. Ο πομπός μετατρέπει αυτό το μήνυμα σε σήμα, το οποίο αποστέλλεται μέσω του καναλιού επικοινωνίας στον δέκτη. Ο δέκτης αλλάζει το μεταδιδόμενο σήμα σε μήνυμα, παραδίδοντας αυτό το μήνυμα στον προορισμό. Κατά τη μετάδοση, παραμορφώσεις που δεν προορίζονταν από την πηγή πληροφοριών, προστίθενται στο σήμα. Αυτές οι ανεπιθύμητες προσθήκες περιλαμβάνουν τον θόρυβο του καναλιού.

Η εντροπία είναι ένα μέτρο της μη προβλεψιμότητας της κατάστασης ή του μέσου περιεχομένου πληροφοριών της. Η σημασία των γεγονότων που παρατηρούνται δεν έχει σημασία στον ορισμό της εντροπίας. Η εντροπία εξετάζει μόνο την πιθανότητα παρατήρησης ενός συγκεκριμένου γεγονότος, επομένως οι πληροφορίες που ενσωματώνει είναι οι πληροφορίες σχετικά με την υποκείμενη κατανομή πιθανοτήτων, όχι το νόημα των ίδιων των γεγονότων.

Η εντροπία ορίζει τη μέση αβεβαιότητα σχετικά με το λαμβανόμενο σήμα όταν το απεσταλμένο μήνυμα είναι γνωστό. Η αβεβαιότητα είναι μηδενική όταν δεν υπάρχει θόρυβος. Εάν εισαχθεί θόρυβος στο σήμα, τότε το ληφθέν μήνυμα περιέχει ορισμένες παραμορφώσεις, ορισμένα σφάλματα και πρόσθετο υλικό που θα μειώσει την ποιότητα του περιεχομένου πληροφοριών του λαμβανόμενου σήματος.

Η πολυπλοκότητα που σχετίζεται με την εντροπία είναι η αναμενόμενη ποσότητα πληροφοριών που απαιτείται για την περιγραφή της κατάστασης του συστήματος. Η χρήση της εντροπίας του Shannon προσαρμόστηκε για να εφαρμοστεί στα συστήματα παραγωγής από τους Frizelle και Woodcock.

Με βάση ακαδημαϊκές δημοσιεύσεις, η ανάπτυξη της Θεωρίας της Πληροφορίας και των μεθοδολογιών Εντροπίας του Shannon καλύπτει μια περίοδο άνω των 30 ετών. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων συστημάτων παραγωγής απαιτεί πιο προηγμένες και περιεκτικές εφαρμογές της Θεωρίας της Πληροφορίας. Η έρευνα στη βάση δεδομένων Scopus παραμένει για να δείξει εάν οι εργασίες σχετικά με την εφαρμογή της Θεωρίας Πληροφοριών στην κατασκευή κυμαίνονται ανάλογα με την υψηλή πολυπλοκότητα.

Αρχικά, πραγματοποιείται αναζήτηση στη βάση δεδομένων Scopus με τις λέξεις-κλειδιά «Θεωρία και πολυπλοκότητα της πληροφορίας» και «πολυπλοκότητα στην κατασκευή», για

να ληφθεί μια μεγαλύτερη εικόνα των δημοσιεύσεων συνολικά. Η αναζήτηση οδήγησε σε περισσότερες από 19000 και 5700 δημοσιεύσεις αντίστοιχα για κάθε φράση λέξης-κλειδιού.

Από τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, αν και υπήρχαν σημαντικές δημοσιεύσεις πριν από το 1990, σημειώθηκε σημαντική αύξηση μετά το 2002 έως το 2023, υπογραμμίζοντας την ανάγκη μέτρησης της πολυπλοκότητας στην κατασκευή, χρησιμοποιώντας και τα μοντέλα Entropy του Shannon. Πιο συγκεκριμένα, η πολυπλοκότητα αυξάνεται συνεχώς και η ανάγκη ποσοτικοποίησης και μοντελοποίησης είναι υψηλή, όπως δείχνουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ειδικά τις τελευταίες 2 δεκαετίες.

Στη συνέχεια η ανάλυση συνεχίζεται σε 3 επίπεδα: (α) αναζήτηση σε επιστημονικές βάσεις δεδομένων (Scopus, Science Direct, και Google Scholar) με σχετικές λέξεις-κλειδιά για τους εξεταζόμενους τομείς που αναφέρθηκαν προηγουμένως (Searching for Search Field Type Τίτλος άρθρου, Περίληψη, Λέξεις-κλειδιά), (β) αναγνώριση σχετικών εργασιών με αφηρημένη ανάγνωση και (γ) ανάγνωση πλήρους κειμένου και ομαδοποίηση σε ερευνητικά θέματα. Η ανασκόπηση Μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία γίνεται σύμφωνα με τους Μούρτζη, Δ., Μ. Δούκα και Δ. Μπερνιδάκη. 2014.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται, προκύπτει το συμπέρασμα ότι παρόλο που το θέμα της Θεωρίας της Πληροφορίας και η Εντροπία του Shannon εισήχθησαν πολλές δεκαετίες πριν. Είναι πολύ σύγχρονα και οι εφαρμογές τους μπορούν να βρεθούν σε πολλά πεδία αιχμής. Η αυξημένη πολυπλοκότητα των συστημάτων παραγωγής σύμφωνα με το παράδειγμα Industry 4.0 μπορεί να μοντελοποιηθεί και να ποσοτικοποιηθεί και έτσι να υπολογιστεί πολύ αποτελεσματικά από την Εντροπία του Shannon, σύμφωνα με τη μελετημένη βιβλιογραφία.

Σε αυτή την εργασία, εξετάζεται η προσέγγιση στην οποία η Θεωρία της Πληροφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της πολυπλοκότητας ενός συστήματος κατασκευής Industry 4.0. Η ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με τα συστήματα κατασκευής Industry 4.0 με νέες τεχνολογίες και χαρακτηριστικά και τα συστήματα εξυπηρέτησης προϊόντων συζητείται καθώς και η υψηλή πολυπλοκότητα που συνοδεύουν. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την πολυπλοκότητα ενός PSS μπορούν να οριστούν ως η ποσότητα των στοιχείων του προϊόντος και της υπηρεσίας, οι παραλλαγές των στοιχείων και η ανατροφοδότηση που λαμβάνεται τόσο για τα στοιχεία όσο και για τις παραλλαγές τους. Ο ποσοτικός προσδιορισμός ενός τόσο περίπλοκου συστήματος παραγωγής δεν μπορεί να μετρηθεί εύκολα και εξακολουθεί να είναι πολύ δύσκολος. Η προσέγγιση της Θεωρίας Πληροφοριών για τη μέτρηση της πολυπλοκότητας του συστήματος κατασκευής Industry 4.0 είναι αρκετά υποσχόμενη. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου οι βασικές λέξεις είναι

η Εντροπία του Shannon, η Θεωρία της Πληροφορίας και η Πολυπλοκότητα και εξετάζονται στους τομείς των συστημάτων παραγωγής και του Industry 4.0. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική εμπλοκή των παραπάνω θεμάτων και πολλές εφαρμογές μέτρησης πολυπλοκότητας μέσω εντροπίας σε περιπτώσεις Industry 4.0. Έτσι, μελλοντικές προκλήσεις θα ήταν η διαμόρφωση ενός ολόκληρου ολοκληρωμένου μοντέλου για τη σύνδεση της απόδοσης των συστημάτων παραγωγής και των μετρήσεων πολυπλοκότητας, χρησιμοποιώντας τη Θεωρία Πληροφοριών, για την αντιμετώπιση των αναγκών της βιομηχανίας και για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού διαμόρφωσης του συστήματος παραγωγής Industry 4.0.

Πίνακας Ορολογίας

Industry 4.0	4 ^η Βιομηχανική Επανάσταση
Information Theory	Θεωρία της Πληροφορίας
Shannon's Entropy	Εντροπία του Shannon
Complexity	Πολυπλοκότητα
Information Content	Περιεχόμενο της Πληροφορίας
Channel Capacity	Κανάλι Χωρητικότητας
Manufacturing System	Συστήματα Παραγωγής
Cyber Physical Systems	Κυβερνοφυσικά Συστήματα
Product Service Systems	Συστήματα Προϊόντων Υπηρεσιών
Internet of Things	Διαδίκτυο Πραγμάτων
Key Performance Indicators	Βασικοί Δείκτες Απόδοσης