

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**Μελέτη και ανάπτυξη της διαδικασίας παραγωγής μίας ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας
με χρήση τεχνολογιών ψηφιακών διδύμων**



Εργασία που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων απόκτησης
διπλώματος

υπό τον

Βασίλειο Δ. Κατσίφα

Επιβλέπων: Νικόλαος Χρ. Τσουρβελούδης, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων: Πολυχρόνης Σπανουδάκης, ΕΔΙΠ

Αφιερώνεται στους γονείς μου
Δημήτριο και Σωτηρία

Περίληψη

Ελληνικά: Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη και ανάπτυξη εξαρτημάτων και διαδικασιών για την κατασκευή της πρωτότυπης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση εξειδικευμένων λογισμικών αλλά και τεχνολογιών ψηφιακών διδύμων (Digital Twins – DTs). Αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική έρευνα όσον αφορά τις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων σε διάφορους τύπους οχημάτων και αναλύονται οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Σε δεύτερο στάδιο μελετάται η εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών στη διαδικασία ανάπτυξης της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μελέτη συγκεκριμένων εξαρτημάτων, όσον αφορά τη σχεδίαση και τον τρόπο κατεργασίας τους, με στόχο τη βελτίωση του χρόνου παραγωγής τους. Στην κατεύθυνση αυτή γίνεται επανέλεγχος της σχεδίασης τους σε σχέση με την διαδικασία παραγωγής τους σε ηλεκτρονικά καθοδηγούμενη (CNC) φρέζα.

Abstract

Αγγλικά: This work is focused on the design and analysis of parts and procedures for the development of a prototype electric motorcycle, manufactured in the Technical University of Crete. Advanced software and Digital Twin (DT) technologies are applied for this purpose. An extensive survey is carried out, concerning Digital Twin applications on various vehicle types, in terms of methods and tools used. As a next step, the application of such technologies on the electric motorcycle development is studied. Finally, design and analysis of specific parts of the motorcycle is conducted, targeting lower development time. Towards this, an evaluation of the parts design is carried out in relation to their manufacturing in a CNC milling machine.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη για την καθοδήγηση και την ευκαιρία που μου έδωσε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου ερευνώντας ένα τόσο ενδιαφέρον για εμένα θέμα. Θερμές ευχαριστίες οφείλω να δώσω στον Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κ. Σπανουδάκη Πολυχρόνη. Η λεπτομερής καθοδήγηση και η υπομονή του ήταν οι σημαντικότεροι παράγοντες για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τα μέλη των ομάδων TUCer και Daedalus για τις υπέροχες στιγμές που ζήσαμε μαζί κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους δικούς μου ανθρώπους για την πολύπλευρη στήριξή καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract	2
Ευχαριστίες.....	3
1 Εισαγωγή.....	6
1.1 Ιστορία των ψηφιακών διδύμων-Digital Twin	6
1.2 Ο όρος ψηφιακό δίδυμο (Digital Twin)	7
1.3 Διαφορές μεταξύ απλής προσομοίωσης και ψηφιακών διδύμων	9
1.4 Ανάλυση και παρουσίαση των ψηφιακών μοντέλων πληροφοριών	10
1.5 Εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων.....	11
1.5.1 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση το είδος του οχήματος ...	13
1.5.2 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση τον τρόπο ελέγχου του οχήματος.....	14
1.5.3 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση τον “τύπο” του ψηφιακού διδύμου.....	15
1.5.4 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση τον “Στόχο-Ρόλο” του ψηφιακού διδύμου.....	17
1.5.5 Χρησιμοποιούμενα λογισμικά για την μοντελοποίηση και εφαρμογή της μεθόδου των ψηφιακών διδύμων	19
2 Εφαρμογή ψηφιακών διδύμων στην διαδικασία παραγωγής πρωτότυπης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας	21
2.1 Διαχείριση και προγραμματισμός έργων.....	21
2.2 Δίκτυα Petri	25
2.3 Ορισμός εργασιών και μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής (Φυσική οντότητα) ..	29
2.3.1 Ορισμός εργασιών	29
2.3.2 Προγραμματισμός εργασιών και διάγραμμα Gantt	30
2.4 Υλοποίηση ψηφιακού διδύμου με χρήση δικτύων Petri (Ψηφιακό μοντέλο)	36
2.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης	37
2.5.1 Ανάλυση παραγωγικής διαδικασίας στην περίπτωση καθυστέρησης μίας εργασίας εντός χρονικών περιθωρίων	38
2.5.2 Ανάλυση παραγωγικής διαδικασίας στην περίπτωση καθυστέρησης μίας εργασίας εκτός αρχικών χρονικών περιθωρίων.....	39

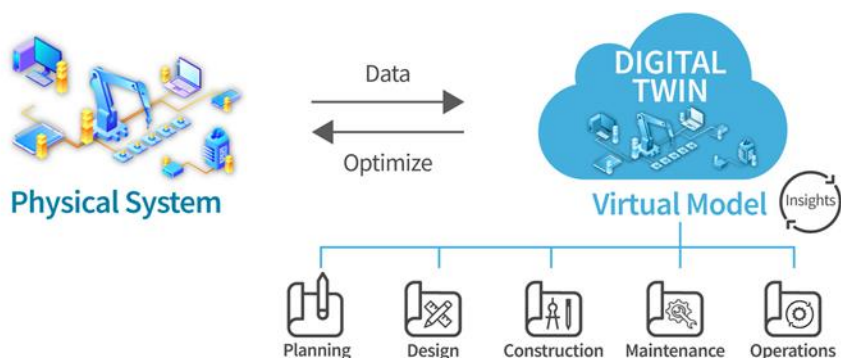
3	Μελέτη και κατασκευή συνδέσμου εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης της ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας με χρήση της μεθόδου ψηφιακών διδύμων.....	40
3.1	Ανάλυση και περιγραφή της διαδικασίας ψηφιακού διδύμου.....	40
3.2	Προεπισκόπηση και χρησιμότητα του συνδέσμου.....	42
3.3	Προσομοίωση CAM και κατεργασία CNC.....	43
3.3.1	Εισαγωγή στις εργαλειομηχανές CNC.....	43
3.3.2	Μεθοδολογία προσομοίωσης κατεργασίας.....	44
3.3.3	Κατασκευή του συνδέσμου και χρόνοι κατεργασίας.....	46
3.4	Μείωση του χρόνου κατεργασίας μέσω επανασχεδιασμού.....	55
3.4.1	Προτάσεις επανασχεδιασμού για συγκεκριμένες κατεργασίες.....	55
3.4.2	Σύνοψη προτάσεων επανασχεδιασμού.....	59
3.5	Διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας με την εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου.....	60
4	Συμπεράσματα.....	62
4.1	Τελικά συμπεράσματα.....	62
4.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	63
5	Βιβλιογραφία.....	63

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορία των ψηφιακών διδύμων-Digital Twin

Ο όρος “twin” χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τη NASA κατά την διεξαγωγή του προγράμματος Apollo (1966). Δημιουργήθηκε ένα πανομοιότυπο με το προς απογείωση όχημα. Το εν λόγω δίδυμο, στο έδαφος, χρησιμοποιούνταν για την εκπαίδευση του πληρώματος της αποστολής πριν την πτήση. Επίσης αποτέλεσε το βασικό εργαλείο λήψης κατάλληλων αποφάσεων κατά τη διάρκεια της αποστολής αφού με τα τρέχοντα δεδομένα πραγματοποιούνταν προσομοιώσεις διάφορων εναλλακτικών ενεργειών [1].

Η έννοια του ψηφιακού διδύμου “Digital Twin” παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2002 από τον Michael Grieves στο πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν. Σύμφωνα με την [2] ως Digital Twin, “DT”, ορίζεται ένα ψηφιακό δυναμικό εικονικό μοντέλο ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας υπηρεσίας. Δημιουργώντας το DT για οτιδήποτε από τα παραπάνω μπορούν να πραγματοποιηθούν κατάλληλες προσομοιώσεις με στόχο την βελτιστοποίηση ή και την παρακολούθηση της λειτουργίας ενός συστήματος, τον σχεδιασμό ενός προϊόντος ακόμη και την προστασία πληροφοριών ενός συστήματος.



Εικόνα 1: Σχεδιάγραμμα τρόπου λειτουργίας ψηφιακών διδύμων [5]

Ο όρος “Digital Twin” αναπτύχθηκε ευρύτερα από τη NASA (2012) 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 ιπτάμενου δίδυμου.



Εικόνα 2: Ιστορική αναδρομή και χρησιμότητα των ψηφιακών διδύμων [34]

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 [1]. Στην Εικόνα 2, παρουσιάζεται συνοπτικά η ιστορία των ψηφιακών διδύμων καθώς επίσης και μια εκτίμηση για την εξέλιξη αυτών. Όπως είναι προφανές, τα ψηφιακά δίδυμα ακολουθούν κάθε βήμα εξέλιξης της τεχνολογίας και έχουν μεγάλα περιθώρια ανάπτυξης. Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τους τομείς στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των DTs (μονάδες σχεδίασης και παραγωγής προϊόντων, συμβουλευτική επιχειρήσεων, παρακολούθηση και έλεγχος οχημάτων κλπ.) και αυτό φαίνεται και από την πληθώρα των παρακάτω ορισμών. Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο συνδυασμός πολλών DTs μπορεί να μας επιτρέψει τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση συστημάτων σε μακροσκοπικό επίπεδο.

1.2 Ο όρος ψηφιακό δίδυμο (Digital Twin)

Πολλοί είναι οι ορισμοί που έχουν διατυπωθεί από πολλές εταιρίες και οργανισμούς όσον αφορά την έννοια του ψηφιακού διδύμου. Ανάλογα με τον τομέα δραστηριοποίησης (αεροναυπηγική, προσομοιώσεις κυκλοφοριακών ζητημάτων και έλεγχος αυτών κλπ.), ο κάθε συντάκτης προσεγγίζει τον όρο του ψηφιακού διδύμου από διαφορετική σκοπιά [12]. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη παρουσίαση αυτών:

- **Cambridge Centre for Digital Built Britain (Academia):** Ως ψηφιακό δίδυμο ορίζεται μία ρεαλιστική ψηφιακή αναπαράσταση μιας φυσικής οντότητας.
- **Dassault Systemes (Software):** Ψηφιακό δίδυμο είναι ένα εικονικό δίδυμο μια εικονική αναπαράσταση του τι έχει παραχθεί. Γίνεται σύγκριση του εικονικού μοντέλου με το μηχανολογικό του σχέδιο ώστε να κατανοηθεί καλύτερα το τι παράγεται σε σχέση με αυτό που σχεδιάστηκε. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται ο βρόχος μεταξύ σχεδιασμού και εκτέλεσης.

- **Deloitte (Consulting):** Ως ψηφιακό δίδυμο ορίζεται η σχεδόν πραγματικού χρόνου ψηφιακή εικόνα ενός φυσικού αντικειμένου ή μιας διαδικασίας ή οποία βοηθά στη βελτιστοποίηση της απόδοσης της επιχείρησης.
- **Gartner (IT):** Ως ψηφιακό δίδυμο ορίζεται μια ψηφιακή αναπαράσταση μιας φυσικής οντότητας ή ενός συστήματος. Η υλοποίηση ενός ψηφιακού διδύμου είναι η ενσωμάτωση ενός αντικειμένου σε ένα λογισμικό ή κάποιο μοντέλο το οποίο αντικατοπτρίζει ένα μοναδικό φυσικό αντικείμενο, διαδικασία, οργανισμό, άνθρωπο ή κάποια άλλη αφηρημένη έννοια. Τα δεδομένα που προκύπτουν από διάφορα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να συγκεντρωθούν για μια σύνθετη προβολή διάφορων οντοτήτων του πραγματικού κόσμου, όπως για παράδειγμα μια μονάδα παραγωγής ενέργειας, μία πόλη και τις σχετικές τους λειτουργίες.
- **General Electric (Conglomerate):** Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα έμβιο μοντέλο το οποίο οδηγεί ένα επιχειρηματικό αποτέλεσμα.
- **IBM (Software):** Ένα ψηφιακό μοντέλο είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, χρησιμοποιώντας δεδομένα πραγματικού χρόνου ώστε να καταστεί δυνατή η κατανόηση ή μάθηση και η λογική.
- **MICHAEL BATTY (Academia):** Ψηφιακό δίδυμο είναι μια κατοπτρική εικόνα μιας φυσικής διαδικασίας που αρθρώνεται παράλληλα με την εν λόγω διαδικασία, συνήθως ταιριάζει ακριβώς με την λειτουργία της φυσικής διαδικασίας η οποία εξελίσσεται σε πραγματικό χρόνο.
- **Michael Grieves (Academia):** Ως ψηφιακό δίδυμο ορίζεται ένα σύνολο εικονικών κατασκευαστικών πληροφοριών οι οποίες περιγράφουν ένα πιθανό ή πραγματικό προϊόν είτε σε ατομικό είτε σε συνολικό επίπεδο. Κάθε πληροφορία που θα μπορούσε να ληφθεί από ένα κατασκευασμένο φυσικό μοντέλο, μπορεί να ληφθεί και από το εικονικό μοντέλο εξίσου αποτελεσματικά ώστε να κατασκευαστεί η βέλτιστη εκδοχή του.
- **Microsoft (Software):** Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα εικονικό μοντέλο μιας διαδικασίας, ενός προϊόντος, στοιχείου παραγωγής ή υπηρεσίας. Συσκευές που είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες και συνδεδεμένες με IoT συνδυάζονται με τεχνητή νοημοσύνη και προηγμένες μεθόδους ανάλυσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προβολή της τρέχουσας κατάστασης της συσκευής. Όταν τα παραπάνω συνδυάζονται με πληροφορία 2D ή 3D σχεδίασης, το ψηφιακό δίδυμο είναι σε θέση να απεικονίσει το φυσικό περιβάλλον και να παρέχει μια μέθοδο προσομοίωσης των αποτελεσμάτων του ηλεκτρονικού, μηχανικού και συνδυασμένου συστήματος.
- **NASA (Government / Research):** Ένα ψηφιακό δίδυμο ενσωματώνει εξαιρετικά υψηλής πιστότητας προσομοίωση με το σύστημα κατάστασης (VHMS) του οχήματος (spacecraft), το ιστορικό συντήρησης και όλα τα διαθέσιμα ιστορικά

δεδομένα ώστε οι συνέπειες να αντικατοπτριστούν στο ψηφιακό δίδυμο μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα ενεργοποίησης ζωνών ασφάλειας και αξιοπιστίας.

- **SIEMENS (Conglomerate):** Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού προϊόντος ή διαδικασίας. Χρησιμοποιείται για την κατανόηση και την πρόβλεψη της κατάστασης και της απόδοσης του αντίστοιχου φυσικού μοντέλου.

Όπως συμπεραίνεται η μέθοδος των ψηφιακών διδύμων δεν έχει όρια ως προς τους τομείς εφαρμογής. Η επιστημονική κοινότητα πέρασε από πολλά στάδια μέχρι να φτάσει στο σημερινό επίπεδο όσον αφορά τα DTs. Αυτό οφείλεται στα όρια που έθετε η εκάστοτε διαθέσιμη τεχνολογία καθώς επίσης και στον χρόνο αφομοίωσης της ιδέας από την κοινωνία.

1.3 Διαφορές μεταξύ απλής προσομοίωσης και ψηφιακών διδύμων

Ευρέως γνωστή είναι η έννοια της προσομοίωσης, όμως δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να συγχέεται με την έννοια του ψηφιακού διδύμου. Για αυτό τον λόγο, καθίσταται αναγκαίος ο διαχωρισμός των δύο παραπάνω εννοιών. Σύμφωνα με την [78], όπου παραθέτονται οι διαφορές μεταξύ προσομοίωσης και ψηφιακού διδύμου ισχύουν τα παρακάτω.

Αρχικά, η προσομοίωση εκτελείται κυρίως στα αρχικά στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, όπως για παράδειγμα η κατασκευή ή ο σχεδιασμός αυτού. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος του ψηφιακού διδύμου δεν αφορά μόνο το στάδιο σχεδιασμού και κατασκευής. Αλλά τις περισσότερες φορές προσφέρεται στον τελικό χρήστη του προϊόντος, με στόχο διάφορες λειτουργίες όπως η παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος μέσω αισθητήρων ή ακόμα και η πρόβλεψη δεδομένων που συνεπάγεται και πρόβλεψη αστοχιών συστήματος.

Μια ακόμη σημαντική διαφορά είναι ότι η προσομοίωση έχει ως στόχο την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός προϊόντος σε μελλοντικό χρόνο. Ένα ψηφιακό δίδυμο όμως, παρέχει πληροφορία για το τι θα συμβεί αλλά και για το πως το προϊόν συμπεριφέρεται στον πραγματικό κόσμο την εκάστοτε χρονική στιγμή.

Τέλος, η διαδικασία της προσομοίωσης αναλύει τα δεδομένα του μοντέλου μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον με δεδομένα του παρελθόντος, ενώ στη μέθοδο του ψηφιακού διδύμου συναντάμε αλληλεπίδραση μεταξύ πραγματικού και ψηφιακού κόσμου και γίνονται συνεχώς αλλαγές στο αρχικό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, ένα ψηφιακό δίδυμο

παρέχει τη δυνατότητα προσομοιώσεων πραγματικού χρόνου που ασφαλώς αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Σχετικά με την διαδικασία σχεδιασμού, σημαντικά παραδείγματα είναι αυτά των εταιρειών Boeing και Tesla. Η εταιρία Boeing δημιούργησε ψηφιακά δίδυμα για διάφορα μέρη των αεροσκαφών της ώστε να κατανοηθεί καλύτερα ο τρόπος συμπεριφοράς αυτών κατά τις πτήσεις. Με αυτό τον τρόπο κατάφερε να επιτύχει βελτίωση κατά 40% στο σχεδιασμό των προϊόντων της. Η εταιρία Tesla δημιουργεί ένα ψηφιακό δίδυμο για κάθε όχημα που παράγεται. Η συλλογή δεδομένων λειτουργίας των οχημάτων χρησιμοποιούνται εκ νέου για τη βελτίωση των αρχικών σχεδίων [79].

1.4 Ανάλυση και παρουσίαση των ψηφιακών μοντέλων πληροφοριών

Όπως προαναφέρθηκε, ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Κάτι ακόμη όμως που πρέπει να διευκρινιστεί είναι η έκταση του ψηφιακού δίδυμου. Με τον όρο έκταση εννοούμε το είδος της οντότητας που επιχειρείται να προσομοιωθεί. Πιο αναλυτικά σύμφωνα με την [72], ένα ψηφιακό δίδυμο ποικίλει όσον αφορά την πολυπλοκότητα, ξεκινώντας από το χαμηλότερο επίπεδο που είναι η ψηφιακή αναπαράσταση ενός μεμονωμένου κομματιού ενός προϊόντος, συνεχίζοντας με την αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου προϊόντος (π.χ. αυτοκίνητο) και φτάνουμε στο ανώτατο επίπεδο πολυπλοκότητας με την ψηφιοποίηση ενός συνόλου προϊόντων που εκτελούν μια διαδικασία αλληλοεπιδρώντας όλα μεταξύ τους. Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις το ψηφιακό μοντέλο, που συμμετέχει στην υψηλού επιπέδου προσομοίωση και παρέχει πληροφορίες, διαφέρει.

Στην πιο απλή περίπτωση που η διαδικασία προσομοίωσης DT έχει να κάνει με ένα μεμονωμένο κομμάτι ενός προϊόντος, το μοντέλο από το οποίο αντλούνται πληροφορίες είναι γεωμετρικό (geometrical model) και φυσικό (physical model). Ένα γεωμετρικό μοντέλο παρέχει τόσο γεωμετρικές (διαστάσεις, παραμορφώσεις κλπ.) όσο και τοπολογικές (εφαπτόμενα τμήματα, καθετότητα κλπ.) πληροφορίες, ωστόσο δεν περιγράφει τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς της οντότητας. Στη συνέχεια το φυσικό μοντέλο συμπληρώνει την απαιτούμενη πληροφορία, παρέχοντας δεδομένα σχετικά με την ακρίβεια (π.χ. διαστατική ακρίβεια, ανοχές σχήματος, ανοχή θέσης και τραχύτητα επιφάνειας), ιδιότητες υλικού (π.χ. τύπος και επιδόσεις υλικού, θερμική συμπεριφορά, σκληρότητα κλπ.) και τέλος περιέχει πληροφορίες συναρμολόγησης με το υπόλοιπο προϊόν [74].

Όταν η προσομοίωση γίνεται σε επίπεδο προϊόντος το ψηφιακό μοντέλο αναγκαστικά πρέπει να περιλαμβάνει κάποιες επιπλέον πληροφορίες. Σε αυτή την περίπτωση εκτός από

τα επιμέρους στοιχεία που καθορίζονται από το γεωμετρικό και φυσικό μοντέλο, είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι συμπεριφορά (behavioral model) και οι κανόνες λειτουργίας (rule model) του εκάστοτε μοντέλου. Αναπτύσσοντας ένα μοντέλο συμπεριφοράς (behavioral model) είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε και να μοντελοποιήσουμε τον τρόπο με τον οποίο τα επιμέρους τμήματα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με το περιβάλλον τους αλλά και την αλληλεπίδραση των χρηστών με το προϊόν. Προφανώς σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μοντελοποίηση του περιβάλλοντος δράσης και της συμπεριφοράς των χρηστών (εφόσον υπάρχουν). Υπάρχουν πολλές τεχνικές ανάπτυξης ενός μοντέλου συμπεριφοράς όπως για παράδειγμα η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEA modelling), οι αλυσίδες Markov (Markov chain method), ontology - based models κλπ. Σε ότι αφορά το μοντέλο κανόνων περιέχει τις απαιτήσεις μεταξύ μοντέλων (predefine logic), κανόνες που προέρχονται από ιστορικά δεδομένα ή από γνώση του δημιουργού του μοντέλου.

Η μοντελοποίηση κανόνων χωρίζεται σε τέσσερις κύριες διαδικασίες: (α)εξαγωγή κανόνων, (β)περιγραφή κανόνων, (γ)συσχέτιση κανόνων και (δ)εξέλιξη κανόνων [74]. Η εξαγωγή κανόνων περιλαμβάνει συμβολικές και συνδετικές μεθόδους όπως δέντρα αποφάσεων και νευρωνικά δίκτυα. Στην περιγραφή κανόνων χρησιμοποιούνται μέθοδοι λογικής συμβολής, αναπαράσταση πλαισίου, αναπαράσταση οντολογίας κλπ. Τέλος, μέσω της εξέλιξης των κανόνων, οι κανόνες ενημερώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα το μοντέλο να ανταποκρίνεται στη φυσική οντότητα. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα όλων των παραπάνω βρίσκεται στην [31], όπου με την προαναφερθείσα μεθοδολογία δημιουργείται ένα DT του πλαισίου ενός αυτοκινήτου από το οποίο λαμβάνονται δεδομένα παραμορφώσεων και καταπονήσεων.

Στις εφαρμογές που η έκταση του ψηφιακού διδύμου μεγιστοποιείται, δηλαδή προσομοιώνεται μια διαδικασία ή ένα σύστημα, το ψηφιακό μοντέλο από το οποίο αντλούνται πληροφορίες συνήθως διαφοροποιείται από τα παραπάνω σε κάποιο βαθμό. Αποτελείται από όλα τα παραπάνω όμως κρίνεται απαραίτητο να γίνει ο συνδυασμός αυτών με κάποιο αριθμητικό, μαθηματικό μοντέλο (γραμμικό, μη γραμμικό κλπ.). Τα εν λόγω μοντέλα συνήθως είναι βασισμένα σε θερμοδυναμικές εξισώσεις [3], ιστορικά δεδομένα ή εξισώσεις μοντελοποίησης δυνάμεων [30]. Τέλος, όπως αναφέρεται στην πηγή [43], μία διαδικασία για να μοντελοποιηθεί απαιτεί τη χρήση πολλών συναρτήσεων, η κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια φάση της εν λόγω διαδικασίας.

1.5 Εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, συγκεντρώνονται και αναλύονται οι εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων σε οχήματα. Παρατίθενται τα χρησιμοποιούμενα λογισμικά

(Softwares) για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της μεθόδου των ψηφιακών διδύμων σε κάθε περίπτωση και τέλος αναλύονται κάποιες από τις λειτουργίες αυτών.

Τα οχήματα κατηγοριοποιούνται αρχικά σύμφωνα με το **είδος του οχήματος** στις εξής κατηγορίες:

- “Επίγεια” (αυτοκίνητα, τρένα, ποδήλατα)
- “Εναέρια” (αεροσκάφη, ελικόπτερα)
- “Θαλάσσια” (πλεούμενα και υποβρύχια)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση της βιβλιογραφίας με βάση τον **τρόπο ελέγχου των οχημάτων**, δηλαδή σε:

- “Επανδρωμένα”
- “Μη επανδρωμένα”
- “Επανδρωμένα και μη”

όπου, η τελευταία αναφέρεται σε εφαρμογές που αφορούν οχήματα ανεξάρτητα τον τρόπο ελέγχου αυτών.

Σε τρίτο στάδιο, κατηγοριοποιούνται οι εφαρμογές με βάση τον **τύπο του ψηφιακού διδύμου**. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται οι εξής τύποι των Digital Twins:

- “Αυτόνομα” DTs
- DTs “Βελτιστοποίησης”
- DTs “Σχεδιασμού”
- DTs “Προστασίας πληροφοριών και δεδομένων”
- DTs “Παρακολούθησης” συστημάτων

Η τέταρτη κατηγοριοποίηση που επιλέγεται να εφαρμοστεί είναι αυτή του **“Στόχου-Ρόλου” του ψηφιακού διδύμου**. Είναι ένα διαφορετικό είδος κατηγοριοποίησης καθώς δίνει περισσότερη σημασία στο αποτέλεσμα της εκάστοτε εφαρμογής και όχι στο είδος του οχήματος. Οι κατηγορίες από τις οποίες αποτελείται, είναι οι εξής:

- “Προηγμένο σύστημα βοήθειας οδηγού-ADAS” (Advance Driver-Assistance System)
- “Βελτιστοποίηση παραγωγής”
- “Χρόνος Ζωής”
- “Ενεργειακή βελτιστοποίηση”
- “Κυκλοφοριακός έλεγχος”

1.5.1 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση το είδος του οχήματος

Επίγεια οχήματα: Στα επίγεια οχήματα η πλειοψηφία της έρευνας ασχολείται με εφαρμογές ψηφιακών διδύμων σε αυτοκίνητα [2, 6, 7, 9, 11, 14, 15, 16, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 38, 39, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 60, 67]. Ωστόσο, υπάρχουν επιστημονικά άρθρα σχετικά με τρένα [30] και ποδήλατα [71,73]. Στην κατηγορία επανδρωμένων επίγειων οχημάτων κατατάσσονται οι [2, 15, 23, 24, 25, 27, 28, 32, 44, 50, 52, 71, 73], σε μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα αναφέρονται οι [6, 9, 11, 16, 45, 60] και οι [7, 14, 29, 30, 31, 33, 38, 39, 46, 47, 49, 53, 67] πραγματεύονται εφαρμογές σε επίγεια οχήματα ανεξαρτήτου τον τρόπο ελέγχου του οχήματος (“Επανδρωμένα και μη”). Γενικότερα, συναντώνται δύο κύριες κατηγορίες στα επίγεια οχήματα. Η πρώτη αφορά το όχημα αυτό καθ’ αυτό ως μηχανικό σύστημα (προσομοίωση σε επίπεδο προϊόντος, παράγραφος 1.4). Η δεύτερη στοχεύει στη βελτιστοποίηση ή την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των συστημάτων του οχήματος ή του οχήματος με τον περιβάλλον του. Τέτοιου είδους παραδείγματα είναι η περίπτωση του κυκλοφοριακού σε μια πόλη, το πρόβλημα διαχείρισης των σημείων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η γραμμή παραγωγής οχημάτων.

Εναέρια οχήματα: Όσον αφορά τα εναέρια οχήματα, οι αντίστοιχες επιστημονικές δημοσιεύσεις αφορούν αεροσκάφη. Οι περισσότερες από αυτές [8, 19, 21, 22, 36, 42, 43, 54, 63, 65, 69, 70,77], αφορούν εναέρια οχήματα ανεξαρτήτως τον τρόπο ελέγχου αυτού, δηλαδή βρίσκονται στην τρίτη κατηγορία (“Επανδρωμένα και μη”) με βάση **τον τρόπο ελέγχου του οχήματος** όπως ορίστηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Επανδρωμένα εναέρια οχήματα αφορούν οι δημοσιεύσεις [20, 55, 56, 59]. Στην κατηγορία των εναέριων οχημάτων οι μέθοδοι των ψηφιακών διδύμων στοχεύουν στον εκσυγχρονισμό των συστημάτων διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας και τη βελτιστοποίησή τους (NextGen) [2]. Όσον αφορά τα αεροσκάφη ως μονάδες (χωρίς να λαμβάνουμε υπόψιν την αλληλεπίδραση τους με άλλες οντότητες), υπάρχουν επιστημονικά άρθρα που μεγιστοποιούν τον χρόνο ζωής του οχήματος [19, 20, 22, 36, 42, 54, 56, 59, 63, 69, 70,77], ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας [43] και την ακρίβεια του χρόνου πτήσης [59].

Θαλάσσια οχήματα: Η κατηγορία των θαλάσσιων οχημάτων αποτελείται από δύο υποκατηγορίες. Αυτή των πλεούμενων οχημάτων [3, 4, 57, 58, 62, 66, 76] και αυτή των υποβρυχίων [68]. Στην κατηγορία των επανδρωμένων πλεούμενων οχημάτων αναφέρονται οι [57, 62, 66, 76]. Στα άρθρα [4] και [58] περιγράφονται εφαρμογές που αφορούν μη επανδρωμένα πλεούμενα οχήματα, ενώ η ανάλυση του άρθρου [3] αφορά οχήματα ανεξάρτητα τον τρόπο ελέγχου αυτών, δηλαδή ανήκει στην κατηγορία “Επανδρωμένα και μη”. Γενικά, στα θαλάσσια οχήματα συναντώνται εφαρμογές ψηφιακών διδύμων σχετικές με παρακολούθηση της λειτουργίας συστημάτων [57, 58, 76] και βελτιστοποίηση αυτών [3, 4, 57, 66]. Πιο αναλυτικά, τα άρθρα [4, 57, 58, 62] πραγματεύονται εφαρμογές σχετικά με τη διαχείριση του στόλου, λαμβάνοντας υπόψιν

θαλάσσιους χάρτες, την πρόγνωση του καιρού και άλλους παράγοντες. Στο άρθρο [3] παρουσιάζεται μια εφαρμογή ψηφιακών διδύμων για την μείωση των εκπομπών υδρογονανθράκων και συνεπώς την ενεργειακή κατανάλωση. Τέλος, όσον αφορά τα υποβρύχια οχήματα στη δημοσίευση [68], παρατίθεται μια πιθανή εφαρμογή ψηφιακών διδύμων που αφορά την παρακολούθηση και διαχείριση ενός υποβρύχιου αυτόνομου στόλου.



Εικόνα 3: Στατιστικά επιστημονικών δημοσιεύσεων (Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον τύπο οχήματος)

1.5.2 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση τον τρόπο ελέγχου του οχήματος

“Επανδρωμένα” οχήματα: Η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων αφορά εφαρμογές ψηφιακών διδύμων πάνω σε επίγεια οχήματα [2, 15, 23, 24, 25, 27, 28, 32, 44, 50, 52, 71, 73]. Στα επανδρωμένα οχήματα θαλάσσης αναφέρονται τα εξής επιστημονικά άρθρα [57, 62, 66, 76] και στα εναέρια επανδρωμένα οχήματα τα [20, 55, 56, 59]. Όλες οι παραπάνω εφαρμογές στοχεύουν στη παρακολούθηση και βελτιστοποίηση διαδικασιών και λειτουργιών των εν λόγω οχημάτων. Πιο αναλυτικά αφορούν συστήματα κατανάλωσης ενέργειας των οχημάτων, προηγμένα συστήματα βοήθειας οδηγού (ADAS), μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του οχήματος και προστασία πληροφοριών και δεδομένων ημιαυτόνομων οχημάτων.

“Μη επανδρωμένα” οχήματα: Σε αυτή την κατηγορία τοποθετούνται εφαρμογές σχετικές με βελτίωση της αυτόνομης οδήγησης, την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα

και την απόδοση αυτόνομων συστημάτων σε οχήματα. Σε μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα αναφέρονται οι δημοσιεύσεις [6, 9, 11, 16, 45, 60], ενώ σε μη επανδρωμένα θαλάσσια οχήματα οι [4, 58, 68].

“Επανδρωμένα και μη” οχήματα: Η κατηγορία αυτή αποτελείται από δημοσιεύσεις οι οποίες αφορούν εφαρμογές ψηφιακών διδύμων σε οχήματα ανεξάρτητα από τον τρόπο ελέγχου τους (αυτόνομα ή μη). Τα περισσότερα επιστημονικά άρθρα αφορούν επίγεια οχήματα [7, 14, 29, 30, 31, 33, 38, 39, 46, 47, 49, 53, 67] και εναέρια οχήματα [8, 19, 21, 22, 36, 42, 43, 54, 63, 65, 69, 70, 77]. Οι δημοσιεύσεις αυτής της κατηγορίας ασχολούνται κυρίως με τον σχεδιασμό και την παραγωγή οχημάτων μέσω προηγμένων αναλύσεων και προσομοιώσεων.



Εικόνα 4: Στατιστικά επιστημονικών δημοσιεύσεων (Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου του οχήματος)

1.5.3 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση τον “τύπο” του ψηφιακού διδύμου

“Αυτόνομα” DTs: Τα αυτόνομα ψηφιακά δίδυμα συναντώνται σε μη επανδρωμένα οχήματα και στοχεύουν στην ασφάλεια της αυτόνομης οδήγησης, στην αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας των αυτόνομων οχημάτων, την αύξηση του χρόνου ζωής αυτών. Στα ψηφιακά δίδυμα που αφορούν αυτόνομα επίγεια οχήματα, κατατάσσονται τα εξής επιστημονικά άρθρα [7, 16, 32, 45], ενώ η πηγή [68] αφορά θαλάσσια αυτόνομα οχήματα. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις γίνεται χρήση IoT δίκτυα προκειμένου να

υπάρχει η απαραίτητη επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και σταθερών σημείων (V2X communication).

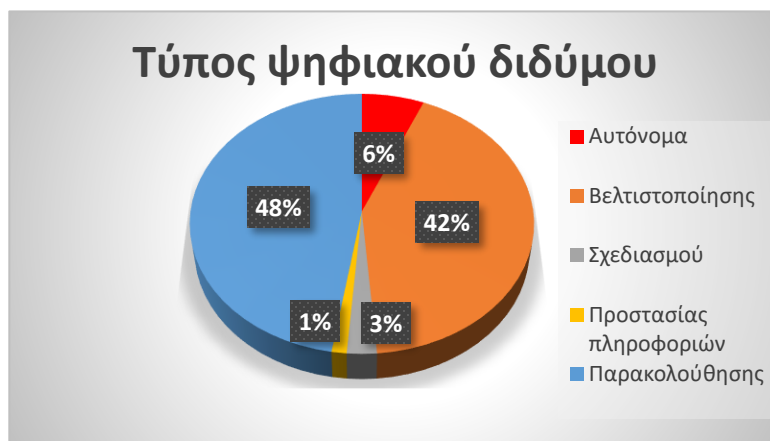
DTs “Βελτιστοποίησης”: Τα ψηφιακά δίδυμα βελτιστοποίησης, έχουν ως στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των προϊόντων και των συστημάτων στα οποία εφαρμόζονται. Οι περισσότερες πηγές που κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία εστιάζουν σε εφαρμογές σε επίγεια οχήματα [2, 6, 7, 9, 11, 15, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 44, 46, 47, 50, 52, 53, 60]. Όμως υπάρχει αντίστοιχη επιστημονική έρευνα για εναέρια οχήματα [21, 43, 55, 63, 65, 69, 77] και οχήματα θαλάσσης [3, 4, 57, 66]. Όσον αφορά το έργο αυτών, στοχεύουν στην αύξηση της παραγωγικότητας, την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων και των διαδικασιών. Πιο συγκεκριμένα βρίσκουμε εφαρμογές πάνω σε διαδικασίες παραγωγής, κατανάλωση ενέργειας, χρόνος ζωής συστημάτων και προϊόντων καθώς επίσης και προηγμένα συστήματα βοήθειας οδηγού (ADAS).

DTs “Σχεδιασμού”: Τα ψηφιακά δίδυμα σχεδιασμού αναφέρονται σε ένα στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας, το στάδιο σχεδιασμού ενός προϊόντος. Μέσω του επανασχεδιασμού το προϊόν που βρίσκεται σε παραγωγή βελτιστοποιείται. Ο επανασχεδιασμός προκειμένου να έχει αποτέλεσμα, απαιτεί πληροφορίες σχετικές με τη χρήση του προϊόντος, οι οποίες μέσω των διαύλων των ψηφιακών διδύμων αποτελούν τους νέους περιορισμούς για τη νέα σχεδίαση. Στις πηγές [38] και [45] παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές σχετικές με την ηλεκτρονική σχεδίαση και καλωδίωση στην αυτοκίνηση.

DTs “Προστασίας πληροφοριών και δεδομένων”: Οι συγκεκριμένες εφαρμογές ψηφιακών διδύμων στοχεύουν στην προστασία αυτόνομων κυρίως συστημάτων από επιθέσεις κακόβουλων λογισμικών. Στην πηγή [28] αναλύεται η πιθανότητα ανάλογης επίθεσης και η αντιμετώπισή της.

DTs “Παρακολούθησης” συστημάτων: Με τα συγκεκριμένα ψηφιακά δίδυμα εφαρμόζεται ένα είδος στενής παρακολούθησης των διαδικασιών ενός συστήματος. Ο χρήστης μπορεί να ενημερώνεται έγκαιρα και έγκυρα για την τωρινή και την πιθανή μελλοντική λειτουργία ενός συστήματος με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να προβεί στις κατάλληλες ενέργειες. Οι περισσότερες δημοσιεύσεις πραγματεύονται εφαρμογές σχετικές με επίγεια οχήματα [7, 11, 14, 15, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 39, 44, 45, 49, 50, 52, 53, 60, 71] και εναέρια οχήματα [19, 20, 22, 42, 54, 55, 56, 59, 63, 69, 70]. Στα θαλάσσια οχήματα αναφέρονται οι ακόλουθες πηγές [57, 58, 68, 76]. Οι πηγές [14, 19, 20, 22, 30, 31, 33, 39, 42, 49, 54, 56, 59, 63, 69, 70] ασχολούνται με την παρακολούθηση της λειτουργίας των οχημάτων (αυτοκίνητα, τρένα, αεροσκάφη κλπ.) ή μεμονωμένα κάποιων υπο-συστημάτων αυτών (σύστημα πέδησης κλπ.). Στις πηγές [15, 44, 55, 71] συναντώνται εφαρμογές σχετικές με προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγών (ADAS). Στις παραπάνω εφαρμογές, παρατηρείται συνδυασμός ψηφιακών διδύμων παρακολούθησης και βελτιστοποίησης συστημάτων. Τα ψηφιακά δίδυμα παρακολούθησης συναντώνται

συχνά στη διαχείριση του κυκλοφοριακού και την ασφάλεια στην αυτόνομη οδήγηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συγκέντρωση πληροφοριών από όλα τα κινούμενα οχήματα και τη σωστή και έγκαιρη μεταχείριση αυτών [7, 11, 60]. Τέλος, εφαρμογές σχετικές με την ενεργειακή βελτιστοποίηση αναλύονται στις πηγές [27, 30, 50, 52, 59] και σχετικές με την διαδικασία παραγωγής στις [23, 24, 25, 29, 53].



Εικόνα 5: Στατιστικά επιστημονικών δημοσιεύσεων (Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον τύπο ψηφιακού διδύμου)

1.5.4 Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ψηφιακών διδύμων με βάση τον “Στόχο-Ρόλο” του ψηφιακού διδύμου

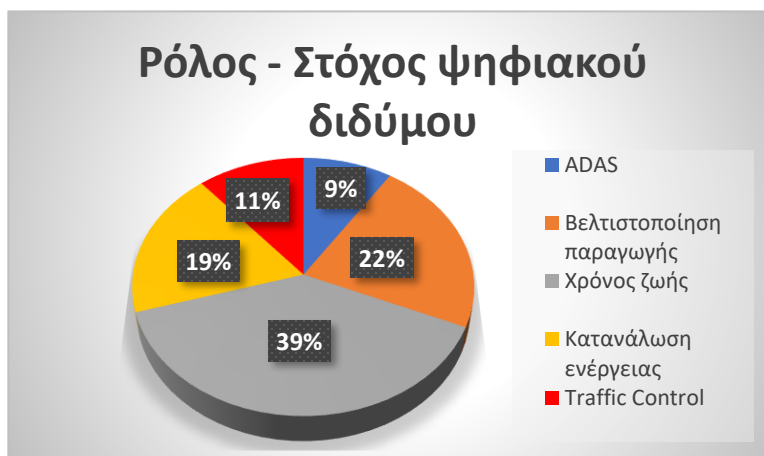
“Προηγμένα συστήματα βοήθειας οδηγού-ADAS” (Advance Driver-Assistance Systems): Τα συστήματα ADAS, είναι ευφυή συστήματα εγκατεστημένα σε οχήματα, που έχουν ως στόχο την βελτίωση της οδήγησης ως προς την ασφάλεια μέσω ενδείξεων και συμβουλών που ενημερώνουν τον οδηγό. Σε αυτά ανήκουν τα συστήματα βοήθειας στάθμευσης, συστήματα αποφυγής ατυχημάτων, συστήματα μείωσης σοβαρότητας ατυχημάτων κλπ. Παραδείγματα ADAS αποτελούν, η αυτόματη προσαρμογή ταχύτητας, η αυτόματη πέδηση κλπ. Οι περισσότερες εφαρμογές των πηγών αφορούν επίγεια οχήματα [2, 15, 44, 71], ωστόσο υπάρχουν εφαρμογές που αναφέρονται σε εναέρια οχήματα [55]. Σε αυτές τις εφαρμογές ψηφιακών διδύμων περιλαμβάνονται συστήματα πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς των υπόλοιπων οχημάτων [2, 71]. Συνήθως χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης και νευρωνικά δίκτυα ώστε να εξελίσσονται και να προσαρμόζονται σε κάθε περιβάλλον [15, 44, 55].

“Χρόνος Ζωής”: Ως χρόνος ζωής ενός προϊόντος ορίζεται το χρονικό διάστημα που το προϊόν είναι άξιο χρήσης, με άλλα λόγια ο χρόνος κατά τον οποίο το προϊόν παραμένει ακέραιο και χρησιμοποιήσιμο για την κύρια λειτουργία του για την οποία σχεδιάστηκε και δημιουργήθηκε. Στην αεροναυπηγική βιομηχανία, η διάρκεια ζωής των εναέριων οχημάτων είναι ζήτημα μείζονος σημασίας, οπότε είναι επόμενο να υπάρχουν πολλές σχετικές δημοσιεύσεις [19, 20, 22, 36, 42, 54, 56, 59, 63, 69, 70]. Όσον αφορά τα επίγεια οχήματα υπάρχουν τα ακόλουθα άρθρα [14, 30, 31, 32, 33, 39, 49], ενώ για τα θαλάσσια οχήματα είναι τα εξής [57, 76]. Η διάρκεια ζωής των προϊόντων ή των συστημάτων μπορεί να μεγιστοποιηθεί και να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω ψηφιακών διδύμων παρακολούθησης και βελτιστοποίησης. Η πρώτη κατηγορία ψηφιακών διδύμων συνήθως εμφανίζεται να ενημερώνει τον χρήστη για την κατάσταση του συστήματος [14, 20, 22, 31, 33, 54, 69] ενώ η δεύτερη κατηγορία στοχεύει στην σωστή λειτουργία του [32].

Βελτιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας: Η ενεργειακή βελτιστοποίηση και η ενεργειακή απόδοση μπορούν να διακριθούν σε κάθε τομέα εφαρμογής. Σε οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης συνήθως στόχος είναι η μείωση εκπομπής υδρογονανθράκων [3], ενώ σε ηλεκτροκίνητα οχήματα εξετάζεται η βελτιστοποίηση του συστήματος πρόωσης και η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας [6] ή ακόμη και η βέλτιστη κατανομή φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων σε μια περιοχή [52]. Όσον αφορά τους τύπους των οχημάτων στους οποίους αναφέρονται οι εν λόγω εφαρμογές, στα επίγεια οχήματα αναφέρονται οι πηγές [6, 9, 27, 30, 50, 52], στα εναέρια οχήματα η [43] και στα θαλάσσια οχήματα η [3].

“Κυκλοφοριακός έλεγχος”: Μέθοδοι ψηφιακών διδύμων μπορούν να έχουν ως στόχο την διαχείριση της κυκλοφορίας οχημάτων στο έδαφος, στον αέρα και στη θάλασσα. Στα επίγεια οχήματα υπάρχουν οι εξής δημοσιεύσεις [7, 11, 47, 60], στα εναέρια οχήματα η [77], ενώ στα θαλάσσια οχήματα η [57]. Πιο συχνά συναντάται η V2X επικοινωνία μέσω τεχνολογιών IoT και Cloud [7, 11, 60, 77].

“Βελτιστοποίηση Παραγωγής”: Όσον αφορά τα ψηφιακά δίδυμα που ο ρόλος τους είναι η βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, υπάρχουν εφαρμογές που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής και εφαρμογές που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των ελαττωματικών προϊόντων και την αύξηση της ολικής ποιότητας. Εφαρμογές που αφορούν τα επίγεια οχήματα παρουσιάζονται στις πηγές [23, 24, 25, 29, 38, 53, 67, 73], τα εναέρια οχήματα στις [21, 65] και τα θαλάσσια οχήματα στην [66].



Εικόνα 6: Στατιστικά επιστημονικών δημοσιεύσεων (Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον Ρόλο - Στόχο του ψηφιακού διδύμου)

1.5.5 Χρησιμοποιούμενα λογισμικά για την μοντελοποίηση και εφαρμογή της μεθόδου των ψηφιακών διδύμων

Η υλοποίηση της διαδικασίας ψηφιακών διδύμων απαιτεί συστήματα μοντελοποίησης- προσομοίωσης, μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, τεχνολογίες μεταφοράς δεδομένων κλπ. Για την κάλυψη των παραπάνω αναγκών, κρίνεται απαραίτητη η χρήση κατάλληλων λογισμικών. Τα χρησιμοποιούμενα λογισμικά σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι τα εξής:

MATLAB: Είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς. Αποθηκεύει και κάνει πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που συναντάται σε προγραμματιστικές εφαρμογές καθώς περιέχει εντολές της C++. Όσον αφορά τη σχέση μεταξύ του MATLAB και των ψηφιακών διδύμων, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός ψηφιακού μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα από την φυσική οντότητα. Ακόμη μέσω εργαλείων του MATLAB (π.χ. Simulink) καθίσταται δυνατή η κατασκευή ψηφιακού φυσικού μοντέλου (physics-based model) με τη χρήση υπό-εργαλείων μοντελοποίησης πολλαπλών τομέων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τόσο τα μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα όσο και τα μοντέλα που βασίζονται στη φυσική, συντονίζονται με δεδομένα πραγματικού χρόνου της φυσικής οντότητας, υλοποιώντας με αυτόν τον τρόπο ένα ψηφιακό δίδυμο [MathWorks]. Στη [49] αναπτύσσεται ένα ευφυές ψηφιακό δίδυμο κάνοντας χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων και την ασαφή λογική του MATLAB/Simulink για τη παρακολούθηση της

λειτουργίας του κινητήρα ενός ηλεκτρικού οχήματος (Permanent Magnet Synchronous Motor). Στην [55] το μαγνητόμετρο ενός αεροσκάφους μοντελοποιήθηκε με τη χρήση των ίδιων εργαλείων. Στη δημοσίευση [68] ένας μη γραμμικός προσομοιωτής ανιχνεύει λεπτομερή κίνηση υποβρύχιων αντικειμένων (AUV). Τέλος, μέσω Python scripts στην [69] επιτυγχάνεται σύνδεση του MATLAB με προγράμματα CAE (π.χ. Abacus) τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Λογισμικά CAD/CAE: Με τη χρήση αυτών των προγραμμάτων καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη γεωμετρικών μοντέλων και μοντέλων συμπεριφοράς (behavioral models). Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια γίνεται και συνδυασμός των δυνατοτήτων διάφορων λογισμικών ώστε να επιτευχθεί το ζητούμενο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, στις [14] και [33] σχεδιάζεται αρχικά το τρισδιάστατο μοντέλο ενός φρένου και πραγματοποιείται δυναμική δομική ανάλυση μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (CREO simulation and ANSYS mechanical). Οι παράμετροι των παραπάνω προσομοιώσεων εισάγονται στο σύστημα αυτόματα μέσω τεχνολογιών IoT από αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένη η φυσική οντότητα. Στη δημοσίευση [31] γίνεται ψηφιακή προσομοίωση ενός οχήματος στο λογισμικό CarSim και τα παραγόμενα δεδομένα (επιταχύνσεις, ταχύτητα κλπ.) εισάγονται σε λογισμικά CAD και CAE (Solidworks). Στην περίπτωση της δημοσίευσης [33], μοντελοποιείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα πέδησης το οποίο αποτελείται από τα εξής μοντέλα υπό-συστημάτων: μοντέλο ηλεκτρονικών, ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο (ANSYS Maxwell2D 2016), μοντέλο φρένου (ANSYS Mechanical 2016), ολοκληρωμένο μοντέλο πέδησης (ANSYS simplorer modelling με χρήση Modelica), δυναμικό μοντέλο του οχήματος (ANSYS simplorer modelling με χρήση Modelica) και μοντέλο του ελεγκτή ABS (ANSYS SCADE Suite).

Λογισμικά CAM (DELMIA (Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application) από τη Dassault Systèmes, Line Designer από τη SIEMENS): Τα παραπάνω λογισμικά χρησιμοποιούνται κυρίως στην μοντελοποίηση γραμμών παραγωγής και συστημάτων εφοδιασμού των εταιριών. Όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφική έρευνα [29], τα δύο παραπάνω εργαλεία είναι αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την ψηφιακή μοντελοποίηση στους εν λόγω τομείς.

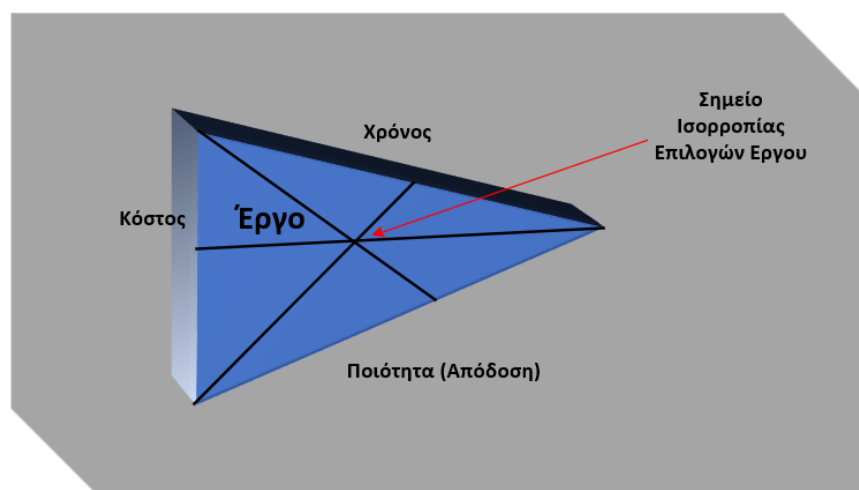
GAZEBO simulator, CarSim: Το λογισμικό GAZEBO είναι ένας δυναμικός προσομοιωτής με δυνατότητα ακριβούς προσομοίωσης ενός πληθυσμού ρομπότ σε περίπλοκα εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα. Το λογισμικό CarSim χρησιμοποιείται για την προσομοίωση οχημάτων με στόχο την πρόβλεψη της απόδοσης σε ένα δεδομένο περιβάλλον [31]. Στη δημοσίευση [68], με τη χρήση του GAZEBO μοντελοποιείται και προσομοιώνεται η κίνηση οχημάτων AUV (Autonomous Underwater Vehicles).

SAMCEF MECANO, Simcenter 3D (Siemens): Στην [22] παρουσιάζεται ένας συνδυασμός μη γραμμικού μηχανικού επιλυτή SAMCEF MECANO και του λογισμικού Simcenter 3D.

2 Εφαρμογή ψηφιακών διδύμων στην διαδικασία παραγωγής πρωτότυπης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας

2.1 Διαχείριση και προγραμματισμός έργων

Η διαχείριση και ο προγραμματισμός έργων (project management) διερευνήθηκε ως ξεχωριστό γνωστικό πεδίο από αυτό των αρχών διοίκησης και της επιχειρησιακής έρευνας. Το εύρος εφαρμογής του πεδίου αυτού είναι μεγάλο καθώς περιλαμβάνει τους κλάδους των κατασκευών, της μηχανολογίας, της πληροφορικής ακόμα και των μεγάλων δημόσιων προγραμμάτων. Γενικότερα ο αποτελεσματικός προγραμματισμός έργων αποσκοπεί στον βέλτιστο συνδυασμό τριών μεγεθών, όπως περιγράφεται και στο βασικό τρίγωνο που φαίνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Βασικό τρίγωνο προγραμματισμού έργων [87]

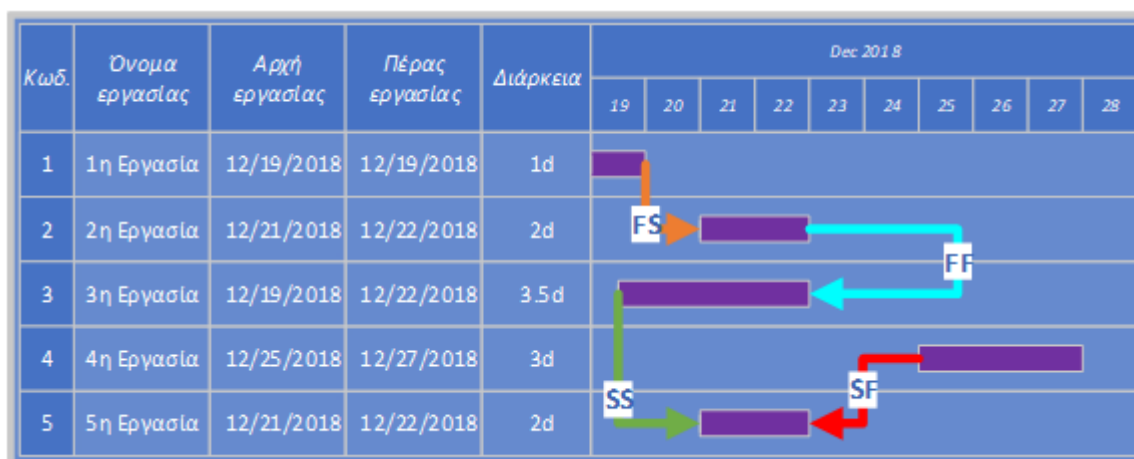
Τα τρία εικονιζόμενα μεγέθη αποτελούν τους κύριους δείκτες του έργου και τις περισσότερες φορές είναι ανταγωνιστικοί. Για αυτό τον λόγο, ισχύουν τα εξής:

- Η απαρέγκλιτη τήρηση των χρονοδιαγραμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε κοστολογική υπέρβαση ή (και) σε μειωμένη απόδοση.
- Η απόλυτη τήρηση του προϋπολογισμού μπορεί να λειτουργήσει εις βάρος των άλλων δύο δεικτών.

- Η απαρέγκλιτη τήρηση των ποιοτικών προδιαγραφών αντίστοιχα ενέχει κίνδυνο να μην λάβουν ικανοποιητικές τιμές οι δείκτες του χρόνου και του κόστους.

Στα παραπάνω τρία χαρακτηριστικά (χρόνος, κόστος, ποιότητα) συνήθως προστίθεται ως τέταρτο χαρακτηριστικό και το αντικείμενο (scope) του έργου. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζεται από τους εμπλεκόμενους εξ αρχής, μια γενική στρατηγική που αφορά αυτούς τους δείκτες.

Πολλοί είναι οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τη γνωστική περιοχή της διαχείρισης έργων με κυρίαρχο στόχο την αποτελεσματικότερη διαχείριση των επιμέρους εργασιών. Κάποιοι από αυτούς είναι οι: Henry Gantt (1917), De Wit A. (1988), οι Weiss J. & Wysocki R. (1992), Baccarini D. (1996), Bechtold R. (1999) κλπ. Ο Henry Gantt επινόησε κατά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο (δεκαετία 1900) το διάγραμμα Gantt που αποτελεί διαγραμματική απεικόνιση ενός χρονοδιαγράμματος. Η συμβολή του στη διαχείριση έργου έχει αναγνωριστεί διεθνώς. Με το διάγραμμα αυτό ο Gantt αξιοποίησε τον τρόπο της γραφικής παρουσίασης των εργασιών πάνω σε ένα ημερολόγιο. Το διάγραμμα Gantt μας δίνει μια γρήγορη εκτίμηση της κατάστασης των διαφόρων εργασιών σε σχέση με το χρόνο σε ένα έργο. Το διάγραμμα αποτελείται από ράβδους των οποίων το μήκος είναι ανάλογο της διάρκειας τις κάθε εργασίας. Οι εν λόγω ράβδοι, τοποθετούνται κατά μήκος στον άξονα του χρόνου κάνοντας πιο προσιτή τη διαδικασία κατανόησης του έργου. Ένα παράδειγμα διαγράμματος Gantt φαίνεται στην Εικόνα 8. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα Gantt και οι μεθοδολογίες PERT, CPM αποτελούν κάποια από τα βασικότερα εργαλεία στον τομέα διαχείρισης έργων.



Εικόνα 8: Παράδειγμα διαγράμματος Gantt

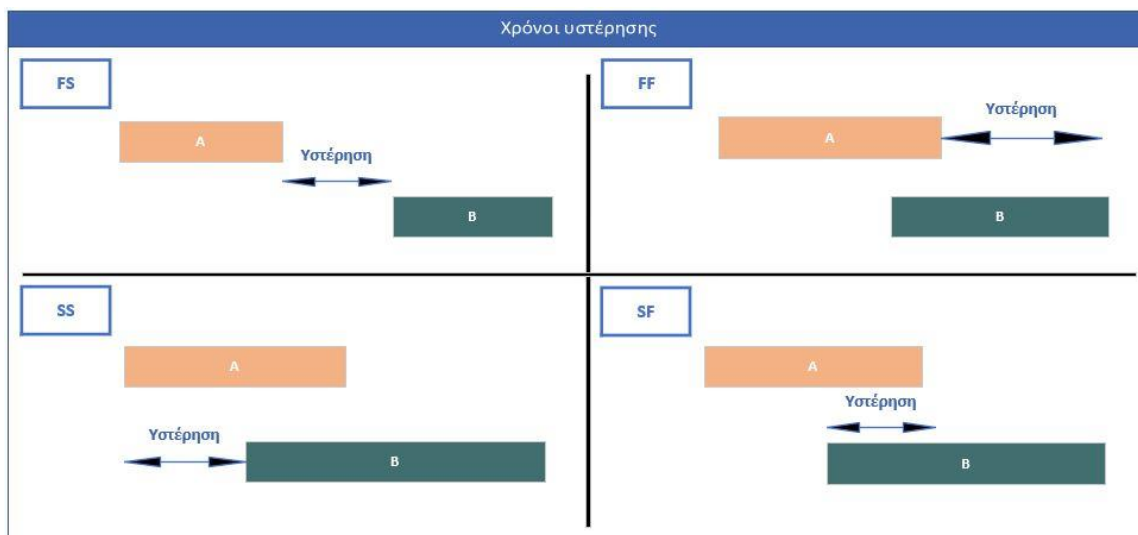
Σύμφωνα με την παραπάνω Εικόνα 8 το συγκεκριμένο έργο αποτελείται από πέντε επιμέρους εργασίες. Για κάθε μία από αυτές παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία: (α) Κωδικό εργασίας, (β) Όνομα εργασίας, (γ) Αρχή εργασίας, (δ) Πέρασ εργασίας, (ε) Διάρκεια και (στ) σχέσεις προτεραιότητας μεταξύ των εργασιών. Οι σχέσεις προτεραιότητας των εργασιών είναι τεσσάρων ειδών (FS, FF, SS και SF), εφαρμόζονται μεταξύ δύο εργασιών κάθε φορά και χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητες που περιγράφονται στα ονόματά τους.

Πιο συγκεκριμένα, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις προτεραιότητας:

- Σχέσεις **Τέλους – Έναρξης (Finish to Start - FS)**, πρέπει να τελειώσει η πρώτη εργασία για να ξεκινήσει η δεύτερη
- Σχέσεις **Τέλους – Τέλους (Finish to Finish - FF)**, πρέπει να τελειώσει η πρώτη εργασία για να τελειώσει και η δεύτερη
- Σχέσεις **Έναρξης – Έναρξης (Start to Start - SS)**, πρέπει να ξεκινήσει η πρώτη εργασία για να ξεκινήσει η δεύτερη
- Σχέσεις **Έναρξης – Τέλους (Start to Finish - SF)**, πρέπει να ξεκινήσει η πρώτη εργασία για να τελειώσει η δεύτερη

Σε κάθε εργασία μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές σχέσεις προτεραιότητας με πάνω από μια εργασίες. Για παράδειγμα, για τις εργασίες Α, Β και Γ, μπορούν να εφαρμοστούν οι σχέσεις Α FS Β και Γ FS Β. Σε περίπτωση που κάποιες σχέσεις επηρεάζουν κοινά διαστήματα χρόνου, τότε γίνεται ταυτόχρονη εφαρμογή αυτών.

Χρόνος υστέρησης (lag): Ως χρόνος υστέρησης σε ένα ζεύγος εργασιών, που συνδέονται με μία από τις παραπάνω σχέσεις προτεραιότητας, ονομάζεται η χρονική καθυστέρηση της δεύτερης από την πρώτη εργασία. Προφανώς, ο χρόνος υστέρησης συναντάται σε όλους τους τύπους σχέσεων προτεραιότητας και σε κάθε μία εκφράζει ένα διαφορετικό διάστημα χρόνου. Στην Εικόνα 9, παρουσιάζεται ακριβώς το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται η χρονική υστέρηση (lag) σε κάθε περίπτωση.

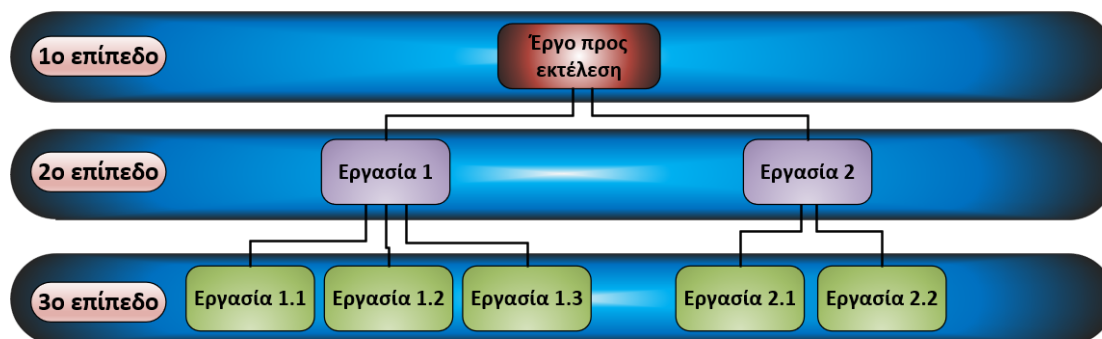


Εικόνα 9: Βασικοί τύποι σχέσεων προτεραιότητας εργασιών [82]

Η παραγωγική διαδικασία της πρωτότυπης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας αποτελείται από εργασίες και υπό-εργασίες. Οι εν λόγω εργασίες πρέπει να συντονιστούν και να οριστούν οι σχέσεις προτεραιότητας τους. Για τον σωστό υπολογισμό της διάρκειας και τον ορθό προγραμματισμό των εργασιών εφαρμόζονται διαφορετικές προσεγγίσεις και μέθοδοι της κάθε διαδικασίας όπως CPM (μέθοδος κρίσιμου μονοπατιού) και PERT η κάθε μία από τις οποίες εστιάζει σε διαφορετικές παραμέτρους με αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού ρίσκου. Για παράδειγμα στην μεθοδολογία PERT, θεωρούνται τρεις διαφορετικοί χρόνοι εκτέλεσης για κάθε εργασία (αισιόδοξος χρόνος, πιο συνήθης και απαισιόδοξος). Αυτοί οι χρόνοι στηρίζονται είτε στη βάση υπάρχουσας εμπειρίας από την επαναληπτική υλοποίηση παρόμοιων εργασιών (στατιστικά στοιχεία), είτε από καθαρά στοχαστικά μοντέλα [87]

Μια ακόμη διαδικασία η οποία εφαρμόζεται για την οργάνωση και καλύτερη κατανόηση του εκτελούμενου έργου είναι η δομική ανάλυση έργου. Η δομική ανάλυση έργου – WBS (Work Breakdown Structure) είναι η διαδικασία κατά την οποία το κύριο έργο αναλύεται σε επιμέρους εργασίες. Η συγκεκριμένη διαδικασία καθιστά το έργο πιο προσιτό. Το έργο χωρίζεται σε συνιστώσες οι οποίες ομαδοποιούνται σε επίπεδα ανάλογα με την πολυπλοκότητα τους. Οι εργασίες ενός επιπέδου, αποτελούνται από απλούστερες εργασίες του αμέσως χαμηλότερου επιπέδου και με τη σειρά τους απαρτίζουν τις εργασίες του αμέσως υψηλότερου. Προφανώς, τα χαμηλότερα επίπεδα συγκροτούνται από πολλές, απλές εργασίες ενώ τα υψηλότερα από λιγότερες αλλά πιο σύνθετες συνιστώσες (στο υψηλότερο επίπεδο βρίσκεται μόνο το έργο προς ανάλυση). Ιστορικά η WBS αναπτύχθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 στην Αμερική. Η συνεισφορά του στην κατανόηση του έργου προς εκτέλεση, την καθιστά βασικό εργαλείο προγραμματισμού και ελέγχου

μέσω των πακέτων εργασίας. Εφαρμόζεται σε όλα τα είδη έργων. Υπάρχουν δύο τρόποι προσδιορισμού της δομικής ανάλυσης έργου, διαγραμματικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10 και ως κείμενο ιεραρχικής στοίχισης [88].



Εικόνα 10: Δομική ανάλυση έργου (WBS) διαγραμματικά.

Το αντίστοιχο παράδειγμα της Εικόνας 10 με τη μορφή κειμένου ιεραρχικής στοίχισης μεταφράζεται ως εξής:

- **1.0.0 Έργο προς εκτέλεση**
 - **1.1.0 Εργασία 1**
 - 1.1.1 Εργασία 1.1
 - 1.1.2 Εργασία 1.2
 - **1.2.0 Εργασία 2**
 - 1.2.1 Εργασία 2.1
 - 1.2.2 Εργασία 2.2

2.2 Δίκτυα Petri

Η θεωρία των Δικτύων Petri (Petri Nets) επινοήθηκε το 1962 από τον Carl Adam Petri στη διδακτορική του διατριβή με τίτλο «Επικοινωνία με Αυτόματα» [90]. Στην παραπάνω διατριβή, τα δίκτυα Petri χρησιμοποιήθηκαν ως μαθηματικό εργαλείο αποτελώντας τη βάση μιας θεωρίας επικοινωνίας (συσχετίσεων και γεγονότων) μεταξύ των συστατικών μερών ενός υπολογιστικού συστήματος. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στην εργασία του Petri, ήταν πως η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την τυποποιημένη ανάλυση ενός συνόλου από επικοινωνούντα αυτόματα, ήταν να δηλωθούν με τον ίδιο τρόπο οι αλλαγές

κατάστασης στα αυτόματα και η επικοινωνία μεταξύ τους [89]. Τα δίκτυα Petri χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή διασυνδεδεμένων συστημάτων, χωρίς τη λεπτομερή θεώρηση χρόνου. Η εργασία αυτή ήταν η αφετηρία της ανάπτυξης της θεωρίας των βασικών αρχών λειτουργίας των δικτύων Petri.

Τα δίκτυα Petri συνδυάζουν γραφικά και μαθηματικά εργαλεία για τη μοντελοποίηση συστημάτων που χαρακτηρίζονται ως παράλληλα, κατανεμημένα, ασύγχρονα, μη αιτιοκρατικά ή στοχαστικά. Οι δυνατότητες γραφικής αναπαράστασης τους αποκτούν επιπλέον αξία από το γεγονός ότι τα μοντέλα που κατασκευάζονται συντίθενται από μικρό αριθμό τύπων στοιχείων, με αποτέλεσμα να αποτελούν μια γλώσσα μοντελοποίησης, η χρήση της οποίας μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητή [93]. Ως γραφικό εργαλείο τα δίκτυα Petri μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο απεικόνισης κι επικοινωνίας παρόμοιο με τα διαγράμματα ροής, τα λογικά δέντρα και τα δομικά διαγράμματα. Σε σχέση με άλλες τεχνικές γραφικής αναπαράστασης είναι κατάλληλα για αναπαράσταση με φυσικό τρόπο λογικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστατικών μερών ή των δραστηριοτήτων σε ένα σύστημα. Τα δίκτυα Petri συνδυάζοντας την έννοια της κατανεμημένης κατάστασης με ένα κανόνα αλλαγής κατάστασης, υλοποιούν τα στατικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά πραγματικών συστημάτων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη υπολογιστικών εργαλείων που επιτρέπουν την προσομοίωση τους, τα καθιστούν ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο ανάπτυξης πολύπλοκων συστημάτων. Ως μαθηματικό εργαλείο χρησιμοποιούνται για την κατάστρωση εξισώσεων κατάστασης, αλγεβρικών εξισώσεων κι άλλων μαθηματικών μοντέλων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των συστημάτων. Επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν από θεωρητικούς αλλά και από εφαρμοσμένους επιστήμονες, αποτελούν ισχυρό μέσο επικοινωνίας και συνεννόησης μεταξύ μελών των δύο αυτών ομάδων [94].

Κάποιες από τις πλέον κοινές καταστάσεις συστημάτων διακριτών γεγονότων για την αναπαράσταση των οποίων χρησιμοποιούνται δίκτυα Petri περιλαμβάνουν αμοιβαία αποκλειόμενα γεγονότα, κατανομή κοινών πόρων σε ένα σύστημα, περιορισμούς προ απαιτούμενων κι ακολουθίες γεγονότων. Τα βασικότερα αντικείμενα για τα οποία χρησιμοποιούνται τα δίκτυα Petri είναι η μοντελοποίηση, ανάλυση συμπεριφοράς, αξιολόγηση αποδοτικότητας, επιβεβαίωση δομικών ιδιοτήτων, προσομοίωση, παρακολούθηση, χρονοπρογραμματισμός, εποπτικός έλεγχος κι έλεγχος σε πραγματικό χρόνο συστημάτων [94]. Τα δίκτυα Petri μπορούν να εντοπίσουν παράγοντες που δρουν περιοριστικά στην απόδοση ενός συστήματος, προτείνοντας παράλληλα αλλαγές και βελτιώσεις που θα βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς του [95]. Επιπλέον, μπορούν να προσομοιώσουν τις δυναμικά εξελισσόμενες και παράλληλες δραστηριότητες των συστημάτων, επιτρέπουν την ιεραρχική μοντελοποίηση και τη μοντελοποίηση συστημάτων με διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας.

Οι επιστημονικοί τομείς στους οποίους έχουν μέχρι σήμερα χρησιμοποιηθεί τα δίκτυα Petri προέρχονται από χώρους με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ένας από τους

τομείς στον οποίο παρατηρείται μεγάλος αριθμός και ποικιλία εφαρμογών των Δικτύων Petri είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τα συστήματα επεξεργασίας πληροφορίας. Προβλήματα σχετικά με ηλεκτρονικούς υπολογιστές στα οποία χρησιμοποιούνται δίκτυα Petri αναφέρονται σε πρωτοκόλλα επικοινωνίας και κατανεμημένα συστήματα, συστήματα πολυμέσων, επεξεργασία δεδομένων, μεταγλωττιστές, τοπικά δίκτυα, ψηφιακά κυκλώματα, υπολογιστικά συστήματα ροής δεδομένων, πληροφοριακά συστήματα γραφείου, ηλεκτρονικές υπηρεσίες και κατανεμημένες ηλεκτρονικές επιχειρήσεις, μοντελοποίηση υλικού (hardware), ψηφιακά φίλτρα, συστήματα μνήμης πολλαπλών επεξεργαστών, αναζήτηση κι επαλήθευση γνώσης, συστήματα πολλαπλών πρακτόρων, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και κέντρα, VLSI, αλγοριθμικά συστατικά, παράλληλα προγράμματα και βάσεις δεδομένων. Τα δίκτυα Petri έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς ακόμα τομείς, συμπεριλαμβανομένης της μοντελοποίησης κι αξιολόγησης αποδοτικότητας συστημάτων πολλών εξυπηρετητών - πολλαπλών ουρών, μοντελοποίησης και μελέτης συστημάτων παραγωγής, εφοδιαστικών αλυσίδων, χημικών εργοστασίων, ενεργειακών συστημάτων, αυτοματοποίησης εργοστασίων, συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας (εναέριας ή επίγειας), προβλήματα χρονοπρογραμματισμού κι ελέγχου σιδηροδρομικών δικτύων, συστήματα στρατιωτικών εντολών κι ελέγχου, επιλογή συμπεριφοράς πλοήγησης, εφαρμογές ρομποτικού ελέγχου, προσομοίωση πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών και διαχείριση έργων. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επέκταση στη χρήση των δικτύων Petri σε εφαρμογές που απέχουν σημαντικά από τις παραδοσιακές εφαρμογές μηχανικών. Τέτοια παραδείγματα περιλαμβάνουν τη μελέτη συμπεριφοράς κι αντίδρασης ομάδων ή ατόμων κάτω από δεδομένες συνθήκες, μοντέλα αποφάσεων, διαδικασιών εξέλιξης και νευρωνικών δικτύων, εφαρμογές προερχόμενες από την εργονομία (π.χ. διάγνωση σφαλμάτων [96]), εφαρμογές στην ιατρική και τη βιοτεχνολογία [96], μοντελοποίηση βιολογικών διαδικασιών (μεταβολικών διαδικασιών) και βιοχημεία, μοντελοποίηση οικολογικών διαδικασιών και περιβαλλοντικών θεμάτων [97].

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές δικτύων Petri. Τη βάση όλων των παραλλαγών αποτελούν τα συνήθη δίκτυα Petri. Τα συνήθη δίκτυα Petri (Ordinary Petri Nets – OPNs), εστιάζουν περισσότερο στις ακολουθίες εκτέλεσης διακριτών γεγονότων καθώς επίσης στις λογικές συνδέσεις και αλληλεπιδράσεις των συστατικών μερών του υπό μελέτη συστήματος.

Μαθηματικός ορισμός: Σύμφωνα με τη [89], ένα σύννηθες δίκτυο Petri (Ordinary Petri Net - OPN) είναι μία δομή $PN = \{P, T, I, O, m_0\}$ όπου ισχύουν τα παρακάτω:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από θέσεις (places)
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από μεταβάσεις (transitions)
- $P \cup T = V$, όπου V είναι το σύνολο κορυφών
- I : αναπαριστά μια συνάρτηση εισόδου

- O: αναπαριστά μια συνάρτηση εξόδου
- m_0 : είναι το αρχικό μαρκάρισμα (marking)

προφανώς, $P \cap T = \emptyset$ και $P \cup T \neq \emptyset$ (\Leftrightarrow ή $P \neq \emptyset$ ή $T \neq \emptyset$ ή $P \cap T \neq \emptyset \Rightarrow P \neq \emptyset$ ή $T \neq \emptyset$).

Όλα τα υπόλοιπα είδη δικτύων Petri αποτελούν παραλλαγές της παραπάνω μορφής αφού στα ήδη υπάρχοντα στοιχεία προσθέτονται επιπλέον χαρακτηριστικά. Οι παραλλαγές και επεκτάσεις αυξάνουν τις δυνατότητες μοντελοποίησης του αρχικού εργαλείου με στόχο να καλυφθούν διαφορετικές ανάγκες. Για τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση και την παρακολούθηση της διαδικασίας παραγωγής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας θα χρησιμοποιηθούν χρονικά δίκτυα Petri (Timed Petri Nets -TPN) με επεκτάσεις τόξων. Αυτό συμβαίνει καθώς καθίσταται απαραίτητη η εισαγωγή των συσχετίσεων μεταξύ μεταβάσεων και χρονικών καθυστερήσεων.

Στα χρονικά δίκτυα Petri εισάγεται στη λειτουργία του δικτύου η έννοια του χρόνου, η οποία παραλείφθηκε εσκεμμένα από τον Petri [90], αφού κάποιες συνέπειες της θεωρούνταν ανεπιθύμητες. Η εισαγωγή της έννοιας του χρόνου επιτυγχάνεται με τη σύνδεση χρονικών καθυστερήσεων με τους κόμβους του δικτύου. Οι χρονικές καθυστερήσεις μπορούν να συνδέονται και με τους δύο τύπους κόμβων, όμως για λόγους ευκολίας ανάλυσης προτιμάται όλες οι καθυστερήσεις να συνδέονται είτε με θέσεις είτε με μεταβάσεις [92].

Μαθηματικός ορισμός: Τα TPN με επεκτάσεις τόξων σύμφωνα με την πηγή [89], ορίζονται ως $TPN = \{P, T, I, O, m_0, D\}$, όπου:

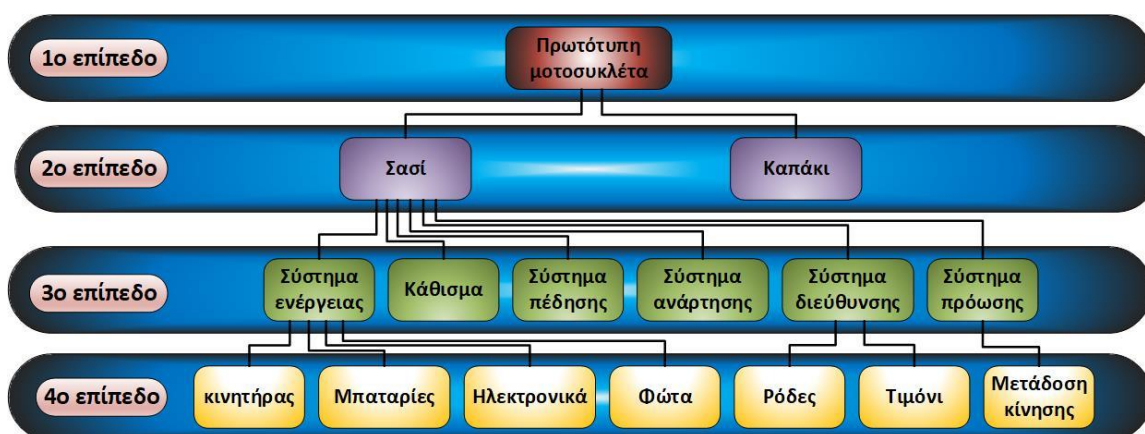
- P, T, I, O, m_0 ισχύει ότι ακριβώς για τα OPN (αναλύονται παραπάνω)
- D , το διάνυσμα m στοιχείων που αναπαριστά τις χρονικές καθυστερήσεις των μεταβάσεων και είναι συνάρτηση από το σύνολο των μη-αρνητικών πραγματικών αριθμών $(0, \infty)$.
- Η χρήση επεκτάσεων τόξων είναι απαραίτητη για πιο αποτελεσματικό έλεγχο της διαδικασίας. Με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται οι εκτελέσεις τμημάτων του συνολικού PN υπό κάποιες προϋποθέσεις.

Η συμπεριφορά των TPN είναι παρόμοια με αυτή των OPN, όμως το γεγονός ότι μέσω αυτών επιτρέπεται ο υπολογισμός της συνολικής διάρκειας μιας σειράς υπό-εργασιών, τα καθιστά πιο κατάλληλα στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Στις πηγές [83], [84] και [85], γίνεται χρήση τριών ειδών τόξου. Τα συνήθη τόξα (\rightarrow), τα τόξα παρεμπόδισης που αντιπροσωπεύονται από τόξα που στη μία άκρη τους σημειώνεται ένας μικρός κύκλος ($\rightarrow O$) και τα τόξα ενεργοποίησης που συμβολίζονται με διακεκομμένα διανύσματα (\dashrightarrow). Η χρήση επεκτάσεων τόξου αυξάνει σημαντικά την ισχύ μοντελοποίησης του αρχικού μοντέλου, καθώς πιο εξελιγμένες ιδέες μπορούν να εφαρμοστούν με απλούστερες και πιο ξεκάθαρες δομές.

2.3 Ορισμός εργασιών και μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής (Φυσική οντότητα)

2.3.1 Ορισμός εργασιών

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται ο προγραμματισμός της παραγωγικής διαδικασίας της πρωτότυπης τρίτροχης μοτοσυκλέτας “Daedalus”. Όπως σε κάθε άλλη παραγωγική διαδικασία, έτσι και εδώ, έχουν οριστεί επιμέρους εργασίες των οποίων γίνεται ο κατάλληλος προγραμματισμός. Στην Εικόνα 11 παρατηρείται ότι η διαδικασία κατασκευής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας αναλύεται στην κατασκευή υποσυστημάτων αυτής.



Εικόνα 11: Σχεδιάγραμμα συστημάτων - μερών της μοτοσυκλέτας

Πιο συγκεκριμένα, το χαμηλότερο επίπεδο (**4ο επίπεδο**) αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα: α) τον κινητήρα, β) τις μπαταρίες, γ) τα ηλεκτρονικά του οχήματος, δ) τα φώτα, ε) τους τροχούς, στ') το τιμόνι και τέλος ζ) τη μετάδοση κίνησης. Στο αμέσως επόμενο επίπεδο (**3ο επίπεδο**) περιέχονται πιο σύνθετες διατάξεις, που σύμφωνα με την Εικόνα 10, αποτελούνται από τα υποσυστήματα του τέταρτου επιπέδου, δηλαδή το “σύστημα ενέργειας” το “σύστημα διεύθυνσης” και το “σύστημα πρόωσης”. Ακόμη, περιέχονται διατάξεις ανεξάρτητες του τέταρτου επιπέδου δηλαδή, η “Κατασκευή καθίσματος”, το “Σύστημα πέδησης” και το “Σύστημα ανάρτησης”. Τέλος, στο **2ο επίπεδο** παρουσιάζονται τα δύο βασικά συστήματα από τα οποία αποτελείται η πρωτότυπη μοτοσυκλέτα, το “Σασί” και το “Καπάκι”.

2.3.2 Προγραμματισμός εργασιών και διάγραμμα Gantt

Έχοντας ως οδηγό το σχεδιάγραμμα της Εικόνας 11, θέτονται οι απαραίτητες εργασίες για κάθε σύστημα και υποσύστημα. Για λόγους ευελιξίας, υιοθετείται η κωδικοποίηση **XY**, όπου **X** και **Y** αναλύονται παρακάτω.

Όπου **X**, ισχύουν τα εξής:

- **X=D**, όταν πρόκειται για εργασία σχεδιασμού
- **X=O**, για παραγγελία υλικών
- **X=M**, για εργασία κατασκευής
- **X=A**, για εργασία συναρμολόγησης

Όπου **Y**, ισχύουν τα εξής:

- **Y=1**, για εργασία σχετικά με το Σασί της μοτοσυκλέτας
- **Y=2**, για εργασία σχετικά με το καπάκι της μοτοσυκλέτας
- **Y=3**, για το σύστημα ενέργειας
- **Y=4**, για το κάθισμα
- **Y=5**, για το σύστημα πέδησης
- **Y=6**, για το σύστημα ανάρτησης
- **Y=7**, για το σύστημα διεύθυνσης
- **Y=8**, για το σύστημα μετάδοσης κίνησης

Για παράδειγμα, για τον συμβολισμό της εργασίας **Σχεδίασης του Συστήματος Ανάρτησης** χρησιμοποιείται ο συμβολισμός **D6**.

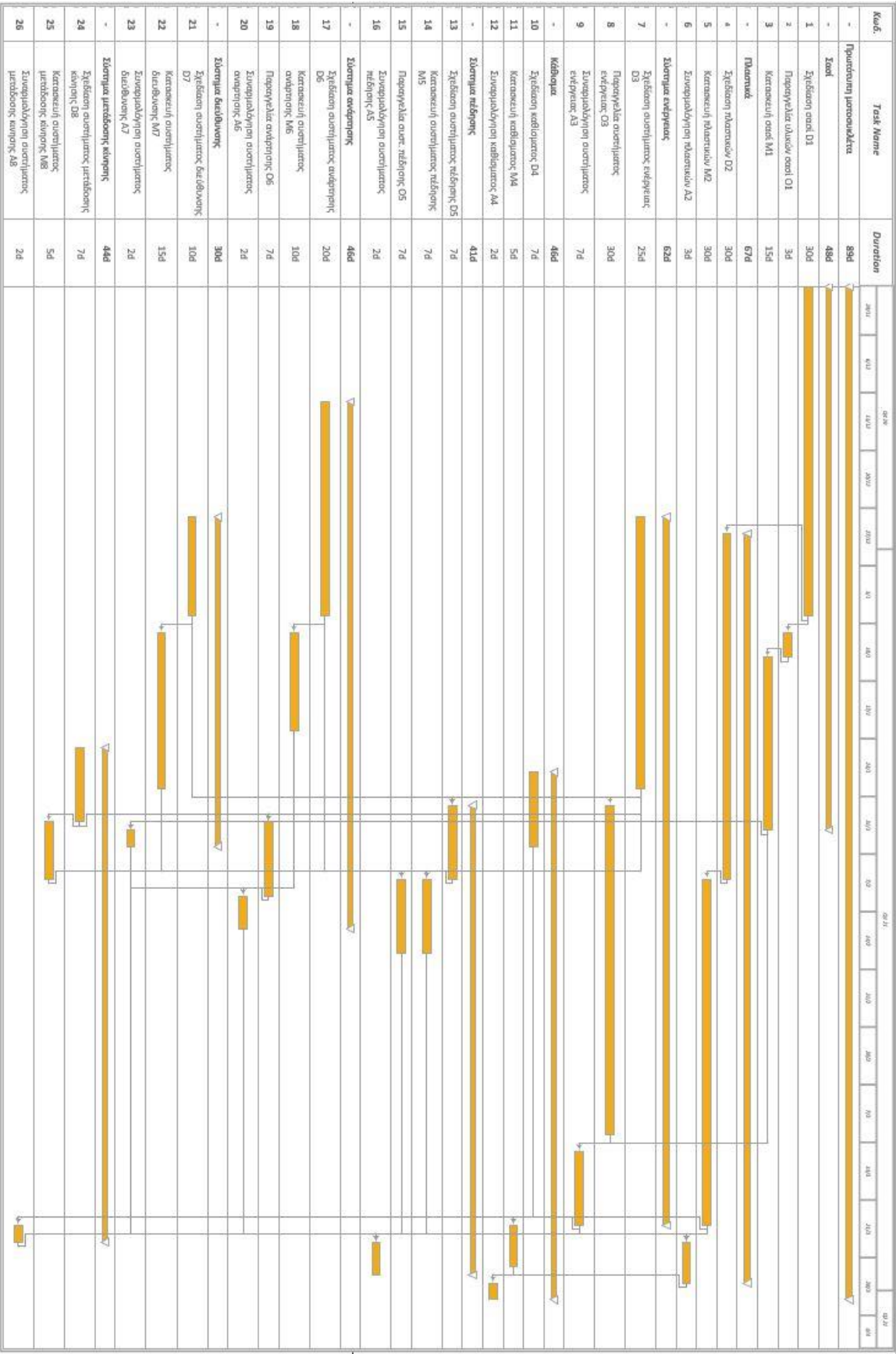
Προκειμένου να μειωθεί το συνολικό ρίσκο αποκλίσεων, για τον υπολογισμό της διάρκειας κάθε **εργασίας** θεωρούνται τρεις πιθανοί χρόνοι εκτέλεσης (αισιόδοξος, πιο πιθανός και απαισιόδοξος) όπως στη μεθοδολογία PERT. Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι 26 εργασίες που πρέπει να ολοκληρωθούν καθώς και τα απαραίτητα στοιχεία για κάθε εργασία (σχέσεις προτεραιότητας, κωδικός εργασίας και τρεις πιθανές διάρκειες).

Πίνακας 1: Εργασίες παραγωγικής διαδικασίας πρωτότυπης μοτοσυκλέτας και σχετικά δεδομένα

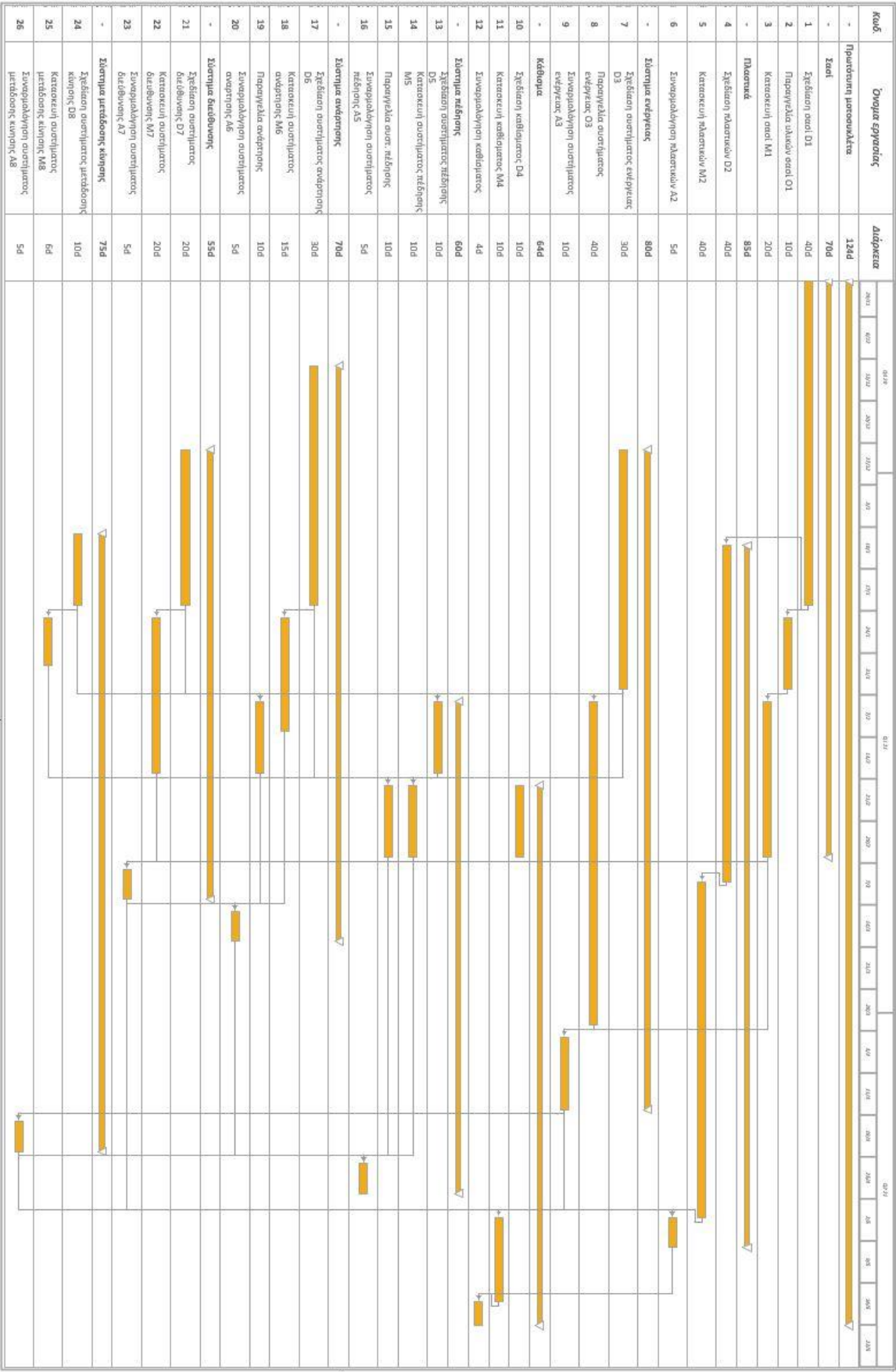
Πρωτότυπη μοτοσυκλέτα						
Αρ.	Συστήματα μοτοσυκλέτας και εργασίες	Κωδ. εργασιών	Σχ. Προτερ.	Διάρκεια (ημέρες)		
				Αισιόδοξα	Πιο πιθανά	Απαισιόδοξα
-	Σασί	1	-	-	-	-
1	Σχεδίαση σασί	D1	-	30	40	60
2	Παραγγελία υλικών σασί	O1	1FS	3	10	20
3	Κατασκευή σασί	M1	2FS	15	20	25
-	Καπάκι	2	-	-	-	-
4	Σχεδίαση καπακιού	D2	1FS - 10 ημ.	30	40	55
5	Κατασκευή καπακιού	M2	4FS	30	40	50
6	Συναρμολόγηση καπακιού	A2	5FS, 9FS, 23FS, 26FS	3	5	8
-	Σύστημα ενέργειας	3	-	-	-	-
7	Σχεδίαση συστήματος ενέργειας	D3	1SS + 30 ημ.	25	30	40
8	Παραγγελία συστήματος ενέργειας	O3	7FS	30	40	90
9	Συναρμολόγηση συστήματος ενέργειας	A3	3FS, 8FS	7	10	20
-	Κάθισμα	4	-	-	-	-
10	Σχεδίαση καθίσματος	D4	4FF	7	10	15
11	Κατασκευή καθίσματος	M4	5FS, 10FS	5	10	15
12	Συναρμολόγηση καθίσματος	A4	6FS, 11FS	2	4	6
-	Σύστημα πέδησης	5	-	-	-	-
13	Σχεδίαση συστήματος πέδησης	D5	7FS, 17FS, 21FS	7	10	14
14	Κατασκευή συστήματος πέδησης	M5	13FS, 17FS, 22FS, 25FS	7	10	14
15	Παραγγελία συστ. πέδησης	O5	7FS, 13FS	7	10	30
16	Συναρμολόγηση συστήματος πέδησης	A5	14FS, 15FS, 20FS, 26FS	2	5	7
-	Σύστημα ανάρτησης	6	-	-	-	-
17	Σχεδίαση συστήματος ανάρτησης	D6	1SS + 15 ημ.	20	30	50
18	Κατασκευή συστήματος ανάρτησης	M6	17FS	10	15	20

19	Παραγγελία ανάρτησης	O6	7FS, 17FS, 24FS	7	10	30
20	Συναρμολόγηση συστήματος ανάρτησης	A6	18FS, 19FS, 23FS	2	5	7
-	Σύστημα διεύθυνσης	7	-	-	-	-
21	Σχεδίαση συστήματος διεύθυνσης	D7	1SS + 20 ημ.	10	20	30
22	Κατασκευή συστήματος διεύθυνσης	M7	21FS	15	20	30
23	Συναρμολόγηση συστήματος διεύθυνσης	A7	3FS, 22FS	2	5	10
-	Σύστημα μετάδοσης κίνησης	8	-	-	-	-
24	Σχεδίαση συστήματος μετάδοσης κίνησης	D8	7SS+20	7	10	20
25	Κατασκευή συστήματος μετάδοσης κίνησης	M8	24FS	5	6	15
26	Συναρμολόγηση συστήματος μετάδοσης κίνησης	A8	9FS, 20FS, 23FS	2	5	7

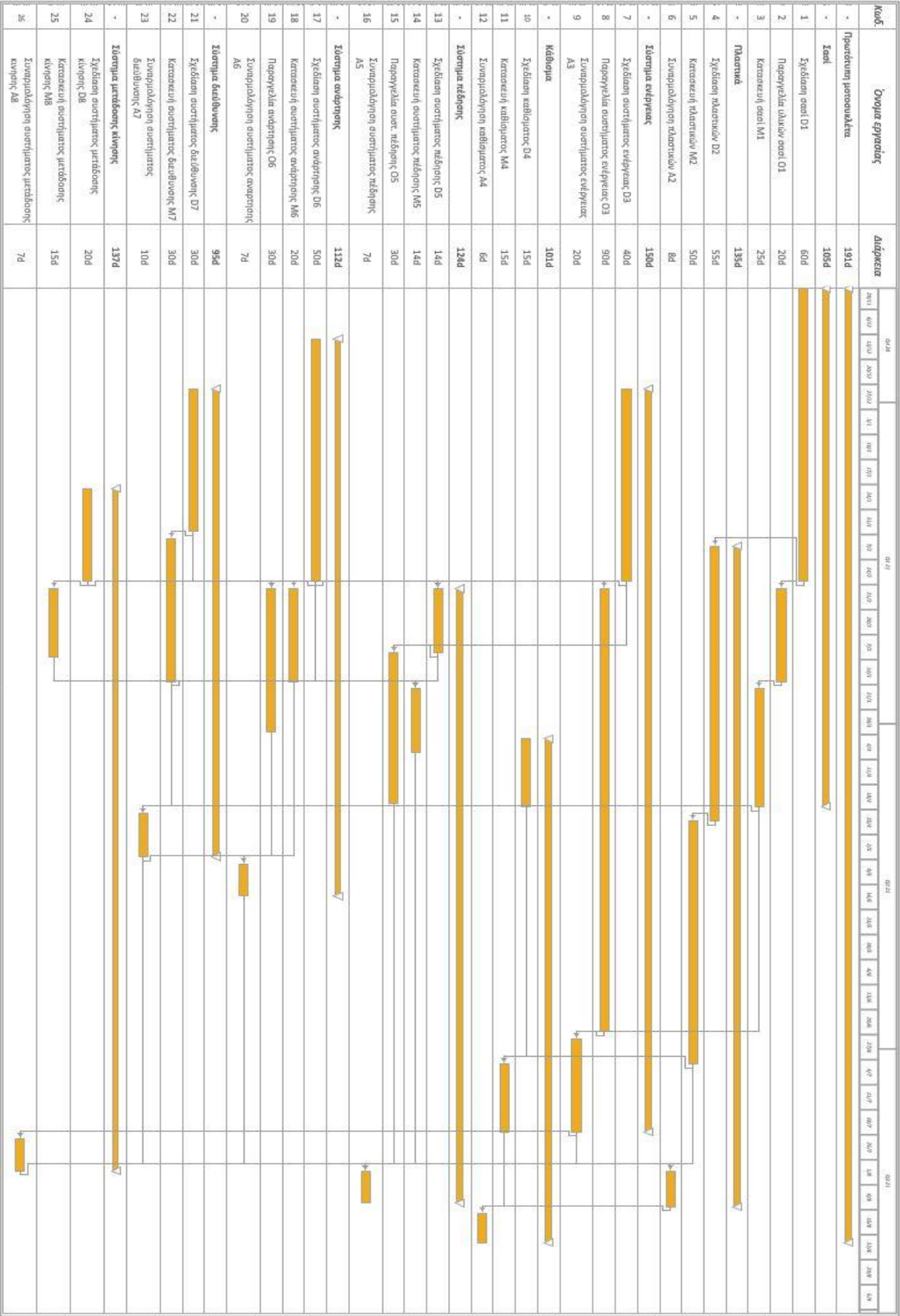
Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 1, στο λογισμικό **MS Project** σχεδιάζονται και εκτελούνται τα τρία διαφορετικά σενάρια. Η συνολική διάρκεια για το αισιόδοξο σενάριο είναι 89 ημέρες, για το πιο πιθανό σενάριο 124 ημέρες και για το απαισιόδοξο είναι 191 ημέρες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα Gantt της παραγωγικής διαδικασίας για τα τρία διαφορετικά σενάρια.



Εικόνα 12: Διάγραμμα Gantt κατασκευής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας (αισιόδοξο σενάριο).



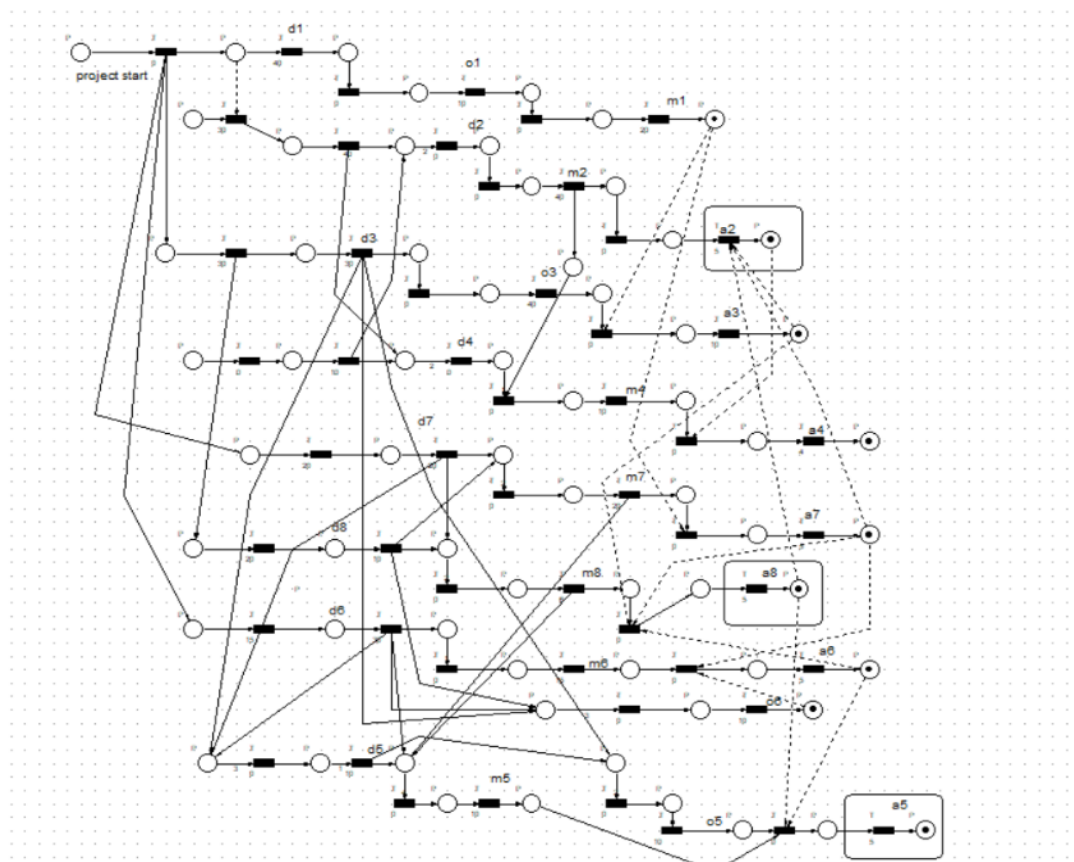
Εικόνα 13: Διάγραμμα Gantt κατασκευής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας (πιο πιθανό σενάριο).



Εικόνα 14: Διάγραμμα Gantt κατασκευής της ηρωτότυπης μοτοσυκλέτας (απαισιόδοξο σενάριο).

2.4 Υλοποίηση ψηφιακού διδύμου με χρήση δικτύων Petri (Ψηφιακό μοντέλο)

Το δίκτυο Petri της παραγωγικής διαδικασίας δημιουργήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία της [84] και ο ρόλος του είναι καθοριστικός, αφού αποτελεί το **ψηφιακό μοντέλο** πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Είναι σχεδιασμένο με βάση τις σχέσεις των εργασιών που αναφέρονται στον Πίνακα 1. Θέτοντας τις διάρκειες των εργασιών ίδιες με του Πίνακα 1, προκύπτουν ως τελικές συνολικές διάρκειες αυτές των διαγραμμάτων Gantt που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται στο Visual Object Net. Όπως προαναφέρθηκε, τα αρχικά αποτελέσματα είναι 89, 124 και 191 ημέρες για κάθε σενάριο αντίστοιχα (αισιόδοξο, πιο πιθανό και απαισιόδοξο). Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται αρχικά για τον καθορισμό των απαιτούμενων πόρων για το έργο καθώς επίσης και των αποδεκτών και μη χρονικών περιθωρίων, καθυστερήσεων.



Εικόνα 15: Διάγραμμα Petri της διαδικασίας παραγωγής πρωτότυπης μοτοσυκλέτας (ψηφιακό μοντέλο)

Η αλληλεπίδραση των δύο οντοτήτων (φυσική και ψηφιακή) επιτυγχάνεται με την προσθήκη σημείων ελέγχου στο ψηφιακό μοντέλο. Τα σημεία ελέγχου δίνουν τη δυνατότητα εισαγωγής νέων δεδομένων (χρονική διάρκεια εργασίας) στο μοντέλο από το φυσικό σύστημα μέσω κατάλληλων αισθητήρων. Ένα απλό παράδειγμα, είναι αυτό που το άτομο το οποίο αναλαμβάνει τον σχεδιασμό του συστήματος ενέργειας (εργασία D3) μόλις ολοκληρώσει την εργασία, δηλώνει το πέρας της στο σύστημα (π.χ. με τη χρήση κατάλληλης εφαρμογής πατώντας ένα κουμπί). Αυτό σημαίνει ότι η επόμενη ή οι επόμενες εργασίες μπορούν να ξεκινήσουν (στην προκειμένη περίπτωση η εργασία O3). Σε περίπτωση που δεν υπάρξει κάποια νέα είσοδος στο σύστημα, η διαδικασία σταματάει, συνεπώς η συνολική διάρκεια αυξάνεται σε σύγκριση με τα αρχικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε φορά που δημιουργείται μια νέα είσοδος δεδομένων στο σύστημα. Δηλαδή για κάθε σημείο εισόδου που υπάρχει στο δίκτυο Petri. Όσον αφορά τις εισόδους που γίνεται να εισαχθούν στο σύστημα, ισχύουν τα παρακάτω.

Η ολοκλήρωση της εργασίας να:

1. είναι εγκαίρως.
2. μην είναι εγκαίρως αλλά εντός χρονικών περιθωρίων που έχουν τεθεί εξ αρχής.
3. είναι εκτός χρονικών περιθωρίων.

Στην πρώτη περίπτωση δεν απαιτείται κάποια παρέμβαση ούτε στο μοντέλο αλλά ούτε στην αρχικά υπολογισμένη διάρκεια. Στη δεύτερη περίπτωση, γίνεται νέος υπολογισμός των διαγραμμάτων Gantt, συνεπώς προκύπτει νέα τελική διάρκεια. Στην τρίτη περίπτωση όμως, απαιτείται επανασχεδιασμός του μέρους της παραγωγικής διαδικασίας που δεν έχει ολοκληρωθεί καθώς οι αρχικώς υπολογισμένοι πόροι δεν ενδείκνυνται και πρέπει να προβούμε σε σημαντικές αλλαγές όπως υπεργολαβία για κάποιες εργασίες, πρόσληψη προσωπικού κλπ.

2.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Με δεδομένα τις διάρκειες των εργασιών του Πίνακα 1, στο αισιόδοξο σενάριο η παραγωγική διαδικασία της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας ολοκληρώνεται σε 89 ημέρες, στο πιο πιθανό σενάριο σε 124 ημέρες ενώ στο απαισιόδοξο σενάριο ολοκληρώνεται σε 191 ημέρες.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία PERT, η συνολική διάρκεια του έργου προκύπτει από τον τύπο:

$$\text{Συνολική διάρκεια έργου} = \frac{(t_a + 4 * t_b + t_c)}{6}$$

Όπου t_a , t_b και t_c , είναι οι χρόνοι του αισιόδοξου, του πιο πιθανού και του απαισιόδοξου σεναρίου αντίστοιχα.

Συνεπώς, στην περίπτωση του σεναρίου βάσης η διαδικασία ολοκληρώνεται σε:

$$\frac{(89 + 4 * 124 + 191)}{6} = 129.33 \text{ ημέρες}$$

Έχοντας υπόψιν τη συνολική διάρκεια του σεναρίου βάσης (129,33 ημέρες), είμαστε σε θέση να ορίσουμε ένα περιθώριο X επιπλέον ημερών μέσα στο οποίο δεν προβλέπεται κάποια αλλαγή στο σενάριο βάσης. Αυτό το περιθώριο ορίζεται κάθε φορά από τον υπεύθυνο του έργου. Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του περιθωρίου X μπορεί να είναι η χρονική στιγμή έναρξης επόμενου έργου κ.α.

Στην περίπτωση της κατασκευής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας αποφασίζεται ότι υπάρχει περιθώριο μιας επιπλέον καθυστέρησης 12 ημερών ($X=12$ ημέρες), μέσα στο οποίο δεν απαιτούνται αλλαγές στην διαδικασία. Δηλαδή ακολουθούμε την ίδια στρατηγική παραγωγής της μοτοσυκλέτας, όσο η συνολική διάρκεια είναι κάτω από 141.33 ημέρες.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι περιπτώσεις:

- η διαδικασία να ολοκληρώνεται με καθυστέρηση εντός χρονικού περιθωρίου
- η διαδικασία να ολοκληρώνεται με καθυστέρηση εκτός χρονικού περιθωρίου.

Η περίπτωση στη οποία η διαδικασία ολοκληρώνεται εγκαίρως δεν εξετάζεται καθώς δεν υπάρχει διαφοροποίηση από το σενάριο βάσης.

2.5.1 Ανάλυση παραγωγικής διαδικασίας στην περίπτωση καθυστέρησης μίας εργασίας εντός χρονικών περιθωρίων

Σε αυτή την παράγραφο μελετάται και αναλύεται η περίπτωση της εργασίας D3. Η εργασία D3 θα ολοκληρωθεί σε 55 ημέρες στην περίπτωση του αισιόδοξου σεναρίου, 60 ημέρες στην περίπτωση του πιο πιθανού και σύμφωνα με το απαισιόδοξο σενάριο του πίνακα 1 ολοκληρώνεται σε 70 ημέρες από την έναρξη του έργου (οι συγκεκριμένοι χρόνοι υπολογίστηκαν μέσω της προσομοίωσης στο δίκτυο Petri). Μέσω των τύπων της μεθόδου PERT προκύπτει ότι η ολοκλήρωση της εργασίας D3 γίνεται σε:

$$\frac{(55 + 4 * 60 + 70)}{6} = 60.83 \text{ ημέρες}$$

Κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας στο φυσικό περιβάλλον, η ολοκλήρωση της εργασίας D3, αντί για 60.83 ημέρες του βασικού σεναρίου, θεωρούμε ότι ολοκληρώνεται σε 70 ημέρες (στην πραγματικότητα) λόγω κάποιων επιπλοκών. Η συγκεκριμένη αλλαγή έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της διεκπεραίωσης του έργου. Σύμφωνα με την προσομοίωση οι νέοι χρόνοι αποπεράτωσης σε κάθε σενάριο αντίστοιχα είναι 109, 129 και 196 ημέρες. Οπότε η συνολική διάρκεια ανέρχεται στις 136.8 ημέρες. Οι παραπάνω χρόνοι προκύπτουν από τη σύνδεση του φυσικού περιβάλλοντος με το ψηφιακό μοντέλο αφού ένα κομμάτι του έργου έχει πραγματοποιηθεί. Δηλαδή, μέχρι το σημείο που έχει πραγματοποιηθεί το έργο έχουμε τον πραγματικό χρόνο διεκπεραίωσης των εργασιών και στη συνέχεια (εργασίες που εκκρεμούν) ακολουθούν οι χρόνοι που βασίζονται στα δεδομένα του Πίνακα 1. Συγκρίνοντας την τελευταία διάρκεια με την αρχική διάρκεια ολοκλήρωσης (σενάριο βάσης) των 129.33 ημερών, παρατηρείται διαφορά 7.47 ημερών. Η καθυστέρηση αυτή, είναι μικρότερη από το αρχικό περιθώριο των 12 ημερών. Επομένως σύμφωνα με τη δεύτερη περίπτωση δράσης του ψηφιακού διδύμου, γίνεται μόνο νέος υπολογισμός των διαγραμμάτων Gantt. Αντίστοιχες καθυστερήσεις σε άλλες εργασίες προκαλούν διαφορετικού μεγέθους καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση του έργου. Αυτό εξαρτάται από το αν οι συγκεκριμένες εργασίες είναι κρίσιμες και από τα χρονικά περιθώρια καθυστέρησης της εκάστοτε εργασίας.

2.5.2 Ανάλυση παραγωγικής διαδικασίας στην περίπτωση καθυστέρησης μίας εργασίας εκτός αρχικών χρονικών περιθωρίων

Σε μία διαφορετική περίπτωση, θεωρούμε ότι η εργασία D3 ολοκληρώνεται σε 80 ημέρες από την έναρξη του έργου. Σε αυτό το ενδεχόμενο οι διάρκειες που προκύπτουν για κάθε σενάριο είναι 124, 144 και 211 ημέρες. Η νέα συνολική διάρκεια ανέρχεται στις 151.8 ημέρες (εφαρμογή μεθοδολογίας PERT), οπότε παρατηρείται καθυστέρηση 22.47 ημερών. Σύμφωνα με την τρίτη περίπτωση του ψηφιακού διδύμου, απαιτείται επανασχεδιασμός του μέρους της παραγωγικής διαδικασίας που εκκρεμεί. Μελετώνται όλες οι πιθανές εναλλακτικές, (για τις εργασίες που δεν έχουν πραγματοποιηθεί) λαμβάνοντας υπόψιν κάθε είδους παράγοντα (κόστος, χρόνος κλπ.). Με τη εξέταση πολλών διαφορετικών εναλλακτικών προκύπτει ένα αποδεκτό σενάριο και η παραγωγική διαδικασία συνεχίζεται σύμφωνα με τις υποδείξεις των τελευταίων αλλαγών.

Ένα πιθανό σενάριο είναι η διάθεση περισσότερου ανθρωπίνου δυναμικού για τη διεκπεραίωση των εργασιών A2, A3, A4, A5 και A8 (συναρμολόγηση). Πρόκειται για κρίσιμες εργασίες, δηλαδή εκτελούνται η μία μετά το πέρας της προηγούμενης. Στην περίπτωση που όλες ξεκινήσουν ταυτόχρονα, η συνολική διάρκεια του έργου υπολογίζεται στις 137.84 ημέρες. Πρόκειται για καθυστέρηση 8.51 ημερών από το σενάριο βάσης, η οποία βρίσκεται εντός του ορίου των 12 ημερών που αποφασίστηκε.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας επιτυγχάνεται η αποτελεσματική παρακολούθηση της εξέλιξης του εκάστοτε έργου. Είναι πολύ σημαντικό, καθώς ο επικεφαλής του έργου είναι σε θέση να ενημερωθεί για τυχόν καθυστερήσεις ή και το αντίθετο, εγκαίρως. Αυτό επιτρέπει την έγκαιρη λήψη αποφάσεων όσον αφορά τη στρατηγική ανάπτυξης του έργου.

3 Μελέτη και κατασκευή συνδέσμου εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης της ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας με χρήση της μεθόδου ψηφιακών διδύμων

3.1 Ανάλυση και περιγραφή της διαδικασίας ψηφιακού διδύμου

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται μια εφαρμογή ψηφιακού διδύμου που αφορά τη διαδικασία κατασκευής συνδέσμου του πρόσθιου συστήματος ανάρτησης της πρωτότυπης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας που κατασκευάζεται στο Πολυτεχνείο Κρήτης, με στόχο τη μείωση του χρόνου κατασκευής του. Πραγματοποιείται η ψηφιακή μοντελοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας του συνδέσμου, ο σχεδιασμός του ψηφιακού του διδύμου και μέσω προτάσεων επανασχεδιασμού επιχειρείται μείωση του χρόνου κατεργασίας.

Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στο σχεδιάγραμμα (Εικόνα 16) και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Θέτονται οι αρχικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιεί.

Βήμα 2^ο: Σχεδιασμός τρισδιάστατου μοντέλου με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού.

Βήμα 3^ο: Στατική, δυναμική, κινηματική και τοπολογική ανάλυση του προηγούμενου μοντέλου με χρήση κατάλληλων λογισμικών.

Βήμα 4^ο: Σε περίπτωση που δεν καλύπτονται κάποιες προδιαγραφές γίνεται επανασχεδιασμός (Βήμα 2^ο, αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί ώστε να προκύψει μοντέλο με κατάλληλες προδιαγραφές ως προς τους τομείς που γίνεται η ανάλυση).

Βήμα 5^ο: Προσομοίωση της κατασκευής του συνδέσμου με κατάλληλο λογισμικό CAM και εύρεση βέλτιστου χρόνου κατασκευής (για τη δεδομένη γεωμετρία).

Βήμα 6^ο: Προτάσεις επανασχεδιασμού με στόχο τη μείωση του χρόνου κατασκευής.

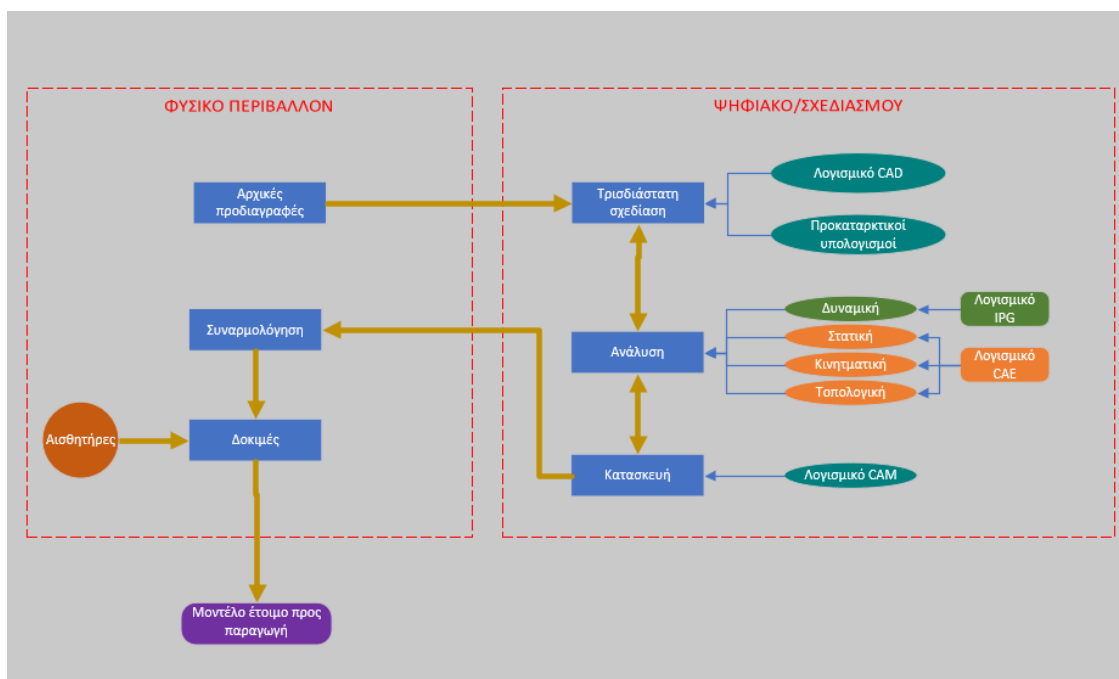
Βήμα 7^ο: Επανασχεδιασμός και έλεγχος για ικανοποίηση αρχικών προδιαγραφών (Βήμα 2^ο και Βήμα 3^ο).

Βήμα 8^ο: Τελικό μοντέλο για κατασκευή.

Στην περίπτωση που δεν μελετάται κατασκευή πρωτότυπου προϊόντος αλλά το προϊόν προορίζεται για συνεχή παραγωγή, η διαδικασία περιλαμβάνει και τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 9^ο: Συλλογή πληροφοριών και δεδομένων από τη λειτουργία - χρήση του προϊόντος και τροποποίηση αρχικών προδιαγραφών

Ένας πιθανός τρόπος συλλογής δεδομένων (Εικόνα 16) είναι ο εξοπλισμός του προϊόντος προς χρήση με κατάλληλους αισθητήρες που παρέχουν σχετικές πληροφορίες (παραμόρφωσης, κόπωσης κλπ.). Σημειώνεται ότι τα βήματα 2, 3, 4 και 9 δεν αφορούν την παρούσα εργασία.



Εικόνα 16: Διαδικασία ψηφιακού διδύμου με στόχο τη μείωση του χρόνου κατασκευής συνδέσμου μέσω επανασχεδιασμού.

Το τελικό προϊόν θα πρέπει να ικανοποιεί διαφορετικά είδη προδιαγραφών. Πιο αναλυτικά οι προδιαγραφές σχετίζονται με:

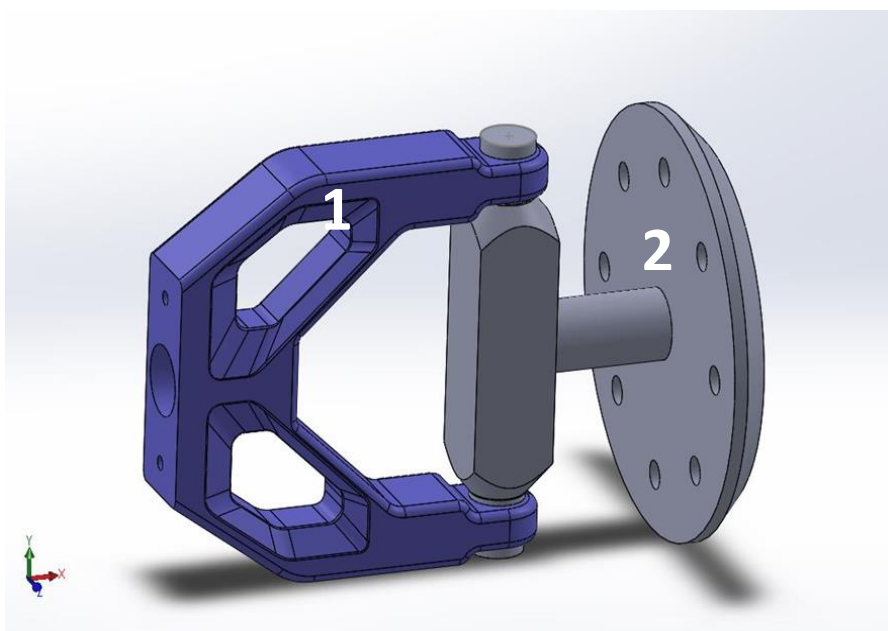
- τη λειτουργικότητα
- την αντοχή στα απαιτούμενα φορτία

- την αισθητική

Οι προδιαγραφές που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα, είναι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται ώστε να υπάρχει δυνατότητα συναρμολόγησης με την υπόλοιπη διάταξη. Η δεύτερη κατηγορία, αφορά την αντοχή του συνδέσμου σε φορτία κατά την λειτουργία της διάταξης. Η τρίτη κατηγορία αφορά τις προδιαγραφές που θέτονται ώστε η εικόνα του τελικού προϊόντος να είναι αποδεκτή ως προς την εμφάνιση. Όλα τα παραπάνω αναλύονται στη συνέχεια.

3.2 Προεπισκόπηση και χρησιμότητα του συνδέσμου

Στην Εικόνα 17 απεικονίζεται η μηχανολογική διάταξη που αντιστοιχεί σε ένα μέρος του πρόσθιου συστήματος ανάρτησης της πρωτότυπης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας Daedalus. Ο σύνδεσμος (1) αποτελεί στήριξη για τον σύνδεσμο (2), όπου πακτώνεται ο τροχός του οχήματος. Ο ρόλος της εικονιζόμενης διάταξης για τη λειτουργικότητα του οχήματος είναι κύριας σημασίας και τα μεγάλα μεταβαλλόμενα φορτία που δέχεται καθιστούν απαραίτητο τον βέλτιστο σχεδιασμό του. Για αυτό τον λόγο έχει πραγματοποιηθεί δυναμική (CAE analysis) και τοπολογική (Topology Optimization) ανάλυση από την οποία προκύπτει η παρακάτω γεωμετρία. Η κατασκευή του πρόκειται να γίνει σε CNC φρέζα.

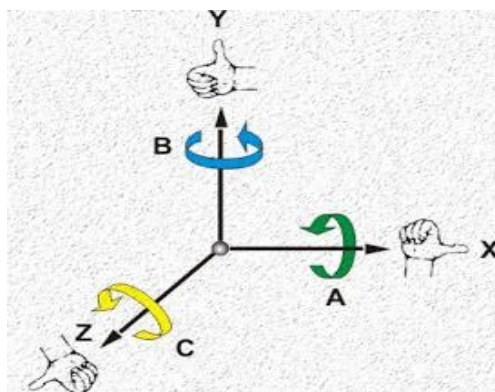


Εικόνα 17: Σύνδεσμος προς κατασκευή

3.3 Προσομοίωση CAM και κατεργασία CNC

3.3.1 Εισαγωγή στις εργαλειομηχανές CNC

Οι εργαλειομηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως για την αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, συνήθως μετάλλου, με τη μορφή αποβλήτου. Στις εργαλειομηχανές κινείται το κοπτικό ή η τράπεζα σε περισσότερες από μια κατευθύνσεις. Υπάρχουν οι συμβατικές εργαλειομηχανές και οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC, CNC και DNC). Οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου χωρίζονται σε 2, $2^{1/2}$, 3, 4, 5 και 6 αξόνων κίνησης. Στις δύο πρώτες κατηγορίες υπάρχει κίνηση του κοπτικού σε 2 άξονες κάθετους μεταξύ τους (X,Z και X,Y αντίστοιχα). Παραδείγματα αυτών, είναι οι τόρνοι ψηφιακής καθοδήγησης, οι μηχανές κοπής με laser και plasma, οι μηχανές ηλεκτροδιάβρωσης και οι μηχανές διάτρησης. Στις μηχανές 3^{ων} αξόνων πραγματοποιείται γραμμική κίνηση στους 3 κάθετους άξονες X,Y και Z μεμονωμένα ή ταυτόχρονα. Τέτοιες μηχανές είναι οι ψηφιακά καθοδηγούμενες φρέζες, οι μηχανές διάτρησης και οι μετρητικές μηχανές (CMM). Στις εργαλειομηχανές 4, 5 και 6 αξόνων παρατηρείται γραμμική κίνηση στους 3 πρώτους άξονες (X, Y και Z) και οι υπόλοιποι άξονες (4, 5 και 6) υλοποιούν περιστροφική κίνηση γύρω από τους τρεις πρώτους. Οι άξονες 4, 5 και 6 συμβολίζονται με A, B, C και είναι επίσης παράλληλοι προς τις κύριες καρτεσιανές διευθύνσεις X, Y και Z.



Εικόνα 18: Οι 6 βασικοί άξονες εργαλειομηχανών

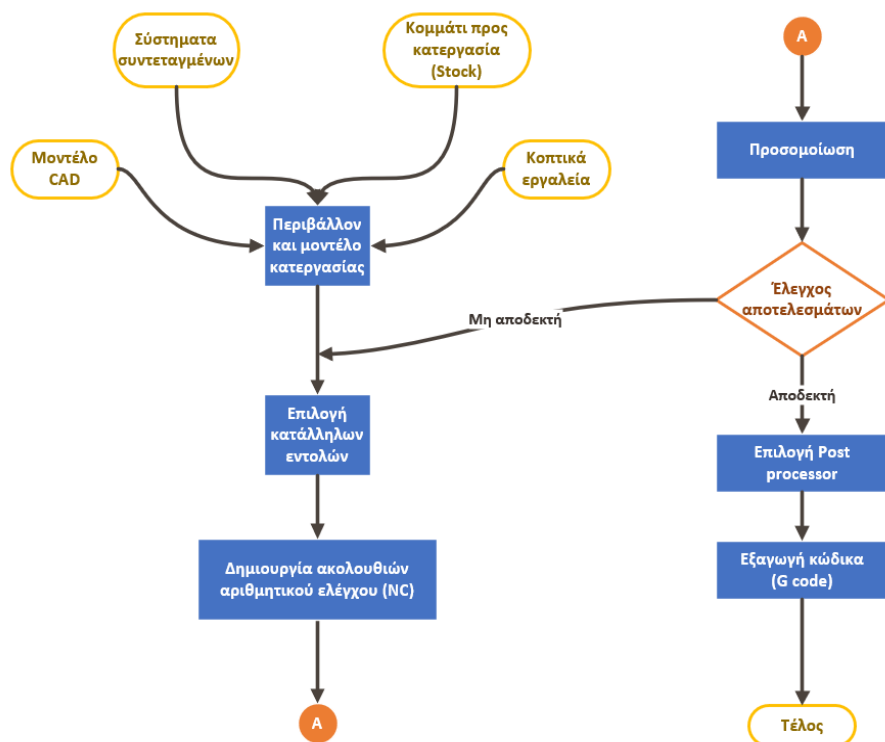
Παραδείγματα εργαλειομηχανών 4^{ων} αξόνων είναι οι ψηφιακά καθοδηγούμενοι τόρνοι με την προσθήκη κεφαλής φρέζας στο μύλο όπου τοποθετούνται τα κοπτικά, καθώς και οι ψηφιακά καθοδηγούμενες φρέζες με την τοποθέτηση, στο τραπέζι της, ενός

διαίρετη. Στις εργαλειομηχανές 5 αξόνων κατατάσσονται οι φρέζες 3+2 αξόνων όπου μία CNC φρέζα 3^{ων} αξόνων εξοπλίζεται με ψηφιακά καθοδηγούμενο τραπέζι με δυνατότητα περιστροφής στους άξονες A και B καθώς επίσης και οι φρέζες 5 αξόνων που χωρίς την προσθήκη κάποιου εξαρτήματος υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής της τράπεζας στον 4^ο και 5^ο άξονα.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των ψηφιακά καθοδηγούμενων εργαλειομηχανών, αυτές χωρίζονται σε συμβατικές CNC και σε High Speed CNC εργαλειομηχανές. Στις σύγχρονες παραγωγικές μονάδες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο η δεύτερη κατηγορία. Οι High Speed συνθήκες κατεργασίας περιλαμβάνουν ταχύτητα περιστροφής ατράκτου άνω των 6000 RPM, μεγάλες ταχύτητες πρόωσης έως και 18m/min, κατάλληλα κοπτικά εργαλεία (HSM Tools) και λογισμικό CAM που να υποστηρίζει μεθοδολογία HSM.

3.3.2 Μεθοδολογία προσομοίωσης κατεργασίας

Η μεθοδολογία για την προσομοίωση της κατεργασίας και την κατασκευή του συνδέσμου που μελετάται αναπαρίσταται στο διάγραμμα ροής (Εικόνα 19) εργασιών που αφορά λογισμικά CAD/CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing).



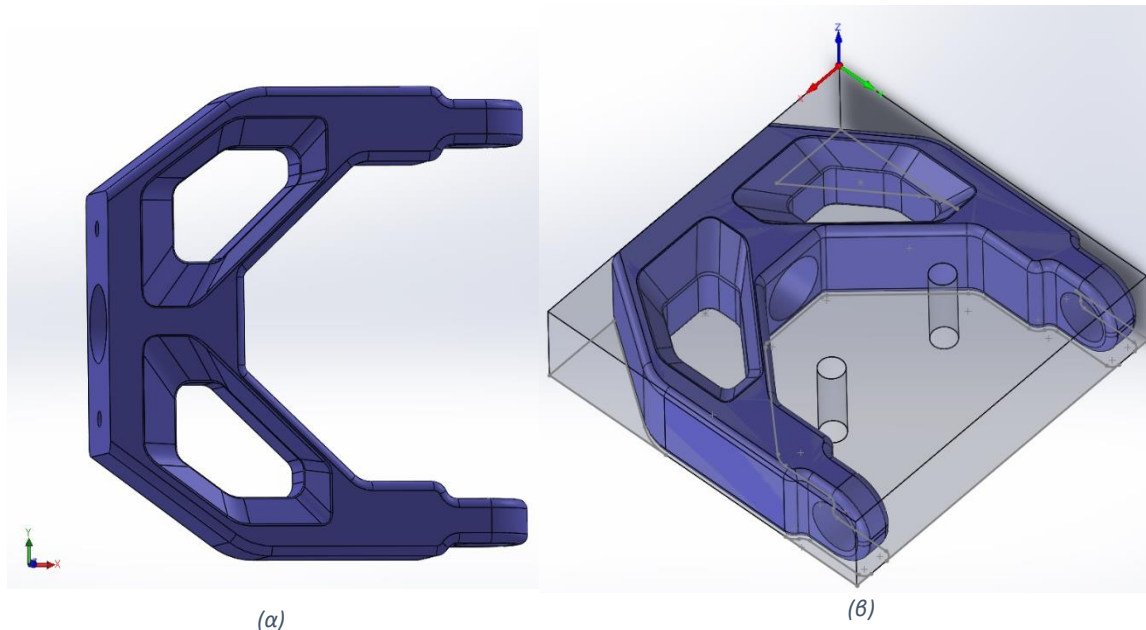
Εικόνα 19: Διάγραμμα ροής εργασιών που αφορούν τα προγράμματα CAD/CAM

Η έναρξη της διαδικασίας προσομοίωσης ξεκινά έχοντας ως δεδομένα το τρισδιάστατο τελικό μοντέλο προς κατασκευή, το αρχικό κομμάτι υλικού (stock model) από το οποίο θα προκύψει το τελικό μοντέλο με αφαίρεση υλικού, τα κοπτικά εργαλεία και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά (ταχύτητα κοπής, μέγιστες προώσεις, στροφές λειτουργίας κλπ.). Με τον ορισμό ενός συστήματος συντεταγμένων (συνήθως σε κάποιο σημείο που τέμνονται οι ακμές του δοκιμίου προς κατεργασία ή στο κέντρο κύκλου αν πρόκειται για κυκλικό δοκίμιο) ολοκληρώνεται το περιβάλλον και το μοντέλο κατεργασίας.

Στη συνέχεια μέσω της κατάλληλης επιλογής εντολών και λειτουργιών δημιουργούνται οι ακολουθίες αριθμητικού ελέγχου δηλαδή οι διαδρομές που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο σε σχέση με το αρχικό σύστημα συντεταγμένων. Στην επιλογή κατάλληλων εντολών συμπεριλαμβάνονται και τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας, όπως προώσεις (m/min) και ταχύτητα περιστροφής (RPM) της κύριας ατράκτου της εργαλειομηχανής, όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή του κοπτικού. Η διαδικασία συνεχίζεται με την εκτέλεση της προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί ως προς την κίνηση του κοπτικού και της ατράκτου. Σε αυτό το στάδιο τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται και ελέγχεται από τον χρήστη αν πρόκειται για επιτυχημένη κατεργασία (αποδεκτό τελικό ψηφιακό αντικείμενο υπό τους περιορισμούς). Αν το αποτέλεσμα δεν είναι αποδεκτό πραγματοποιούνται αλλαγές στις προηγούμενες επιλογές ή επιλέγονται εξ ολοκλήρου νέες λειτουργίες που προσφέρει το λογισμικό CAM. Σε κάθε περίπτωση, γίνεται νέος υπολογισμός των ακολουθιών αριθμητικού ελέγχου και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου υπάρξει αποδεκτό αποτέλεσμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι στους περιορισμούς που τίθενται συμπεριλαμβάνεται και ο συνολικός χρόνος κατεργασίας με στόχο την ελάττωσή του. Εφόσον βρεθεί αποδεκτός τρόπος κατεργασίας η διαδικασία συνεχίζεται με την επιλογή κατάλληλου τελικού επεξεργαστή (post processor) για την συγκεκριμένη εργαλειομηχανή CNC ώστε να μετατραπούν αυτόματα οι κινήσεις του κοπτικού εργαλείου σε αρχείο κώδικα που είναι αναγνωρίσιμο από την εργαλειομηχανή (G code).

3.3.3 Κατασκευή του συνδέσμου και χρόνοι κατεργασίας

Έχοντας ως βάση την προηγούμενη μεθοδολογία κατεργασίας γίνεται η εφαρμογή αυτής με στόχο τη δημιουργία του G κώδικα για κατασκευή του συνδέσμου σε φρέζα CNC 3^{ov} αξόνων. Το τρισδιάστατο μοντέλο που ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Τρισδιάστατο αρχικό και τελικό μοντέλο

3.3.3.1 Ορισμός αρχικού δοκιμίου και συστήματος συντεταγμένων

Ορίζεται το αρχικό κομμάτι (προς κατεργασία) και το σύστημα συντεταγμένων (Εικόνα 20 β). Το υλικό είναι κράμα αλουμινίου. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 20 (β), το κομμάτι είναι διαφανές και περιέχει το τελικό μοντέλο. Το διαφανές μέρος του σχήματος είναι το υλικό που θα αφαιρεθεί. Οι δύο οπές που φαίνονται καθιστούν πιο εύκολο το δέσιμο του δοκιμίου στην τράπεζα της εργαλειομηχανής. Επίσης, στην Εικόνα 20 (β) φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων που έχει οριστεί στην πάνω δεξιά γωνία του αρχικού μοντέλου. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων το πρόγραμμα CAM υπολογίζει όλες τις απαραίτητες αριθμητικές ακολουθίες από τις οποίες προκύπτουν οι κινήσεις του κοπτικού.

3.3.3.2 Επιλογή κοπτικών εργαλείων της κατεργασίας και τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία κατεργασίας απαιτείται μία ακόμη είσοδος που είναι η λίστα με τα κοπτικά εργαλεία. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε κατεργασίας (συνολικός όγκος υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί, διαδικασία ξεχονδρίσματος ή αποπεράτωσης, γεωμετρία που απαιτείται να επιτευχθεί κ.α.), επιλέγονται τα κατάλληλα κοπτικά εργαλεία (κονδύλια) τα οποία θα προσφέρουν ικανοποιητική επιφάνεια σε ένα αποδεκτό χρονικό διάστημα κατεργασίας [80]. Τα κοπτικά εργαλεία που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά κοπτικών εργαλείων και κωδικοποιημένες ονομασίες αυτών

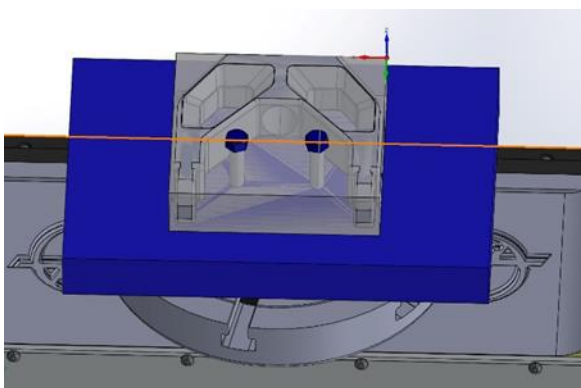
Κωδ. Κοπτ.	Τύπος κοπτ.	Διαμ. Κοπτ.	Συν. μήκος	Μήκος φτερών κοπής	Αρ. φτερών κοπής	Ακτίνα άκρης κοπτικού	Συνθήκες κατεργασίας			
							ap	ae	fz (per/tooth)	Vc (m/min)
2	DRILL	5mm	82mm	45mm	2	-	-	-	-	-
3	DRILL	12mm	118mm	71mm	2	-	-	-	-	-
4	END MILL	5mm	50mm	14mm	3	0mm	1.5x D	0.5 xD	0.031	750
6	BALL NOSE	6mm	57mm	10mm	2	3mm	10mm	0.1 xD	0.054	750
7	END MILL	10mm	76mm	22mm	3	0mm	1.5x D	0.5 xD	0.063	750
8	BALL NOSE	5mm	50mm	10mm	2	2.5mm	10mm	0.1 xD	0.045	750
9	END MILL	16mm	89mm	32mm	3	0mm	1.5x D	0.5 xD	0.101	750
10	END MILL	8mm	63mm	20mm	3	0mm	1.5x D	0.5 xD	0.065	750
11	CHAM FER TOOL	10mm	60mm	-	4	45°	0,35 x D	0,3 5x D	0,056	600
ap: αξονικό βάθος κοπής ae: ακτινικό βάθος κοπής										

Για κάθε κοπτικό εργαλείο ο κατασκευαστής αναφέρει τις συνθήκες κατεργασίας στις οποίες επιτυγχάνεται η βέλτιστη κοπή και μία αποδεκτή καταπόνηση του κοπτικού. Το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή υπόκειται σε υψηλές τάσεις στην περιοχή της κοπτικής ακμής που το καταπονούν ιδιαίτερα. Αυτές οφείλονται στην πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου υλικού στη ζώνη διάτμησης, σε τριβές και πλαστική παραμόρφωση του αποβλήτου στη ζώνη επαφής εργαλείου – αποβλήτου, καθώς επίσης και σε θραύση του κατεργαζόμενου υλικού για το σχηματισμό νέας επιφάνειας. Επιπρόσθετα, παρατηρείται

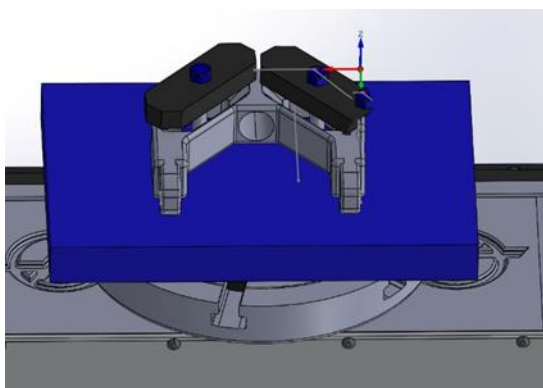
ανάπτυξη υψηλών και ακανόνιστα κατανεμημένων θερμοκρασιακών πεδίων (της τάξης των 1200 °C), που παρουσιάζουν επιπλέον υψηλούς ρυθμούς αύξησης της θερμοκρασίας και απότομες βαθμώσεις (μεταβολές από θέση σε θέση κατά μήκος της κοπτικής ακμής). Στον πίνακα των κοπτικών εργαλείων αναγράφονται τα προτεινόμενα βάθη κοπής από τον κατασκευαστή καθώς επίσης πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του κοπτικού (ball nose milling, end mill κλπ.) και τις κύριες διαστάσεις του (διάμετρος, ολικό μήκος, αριθμός αυλακώσεων, μήκος αυτών κλπ.).

3.3.3.3 Επιλογή τρόπου σταθεροποίησης δοκιμίου στο τραπέζι της φρέζας

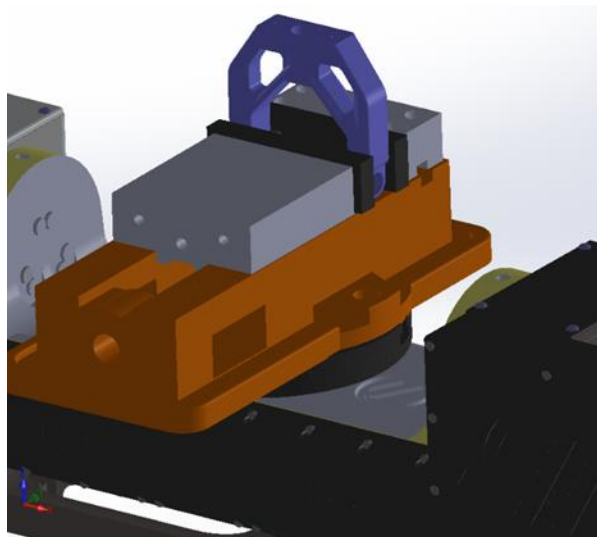
Εφόσον όλα τα δεδομένα που χρειάζονται για να δημιουργηθεί το περιβάλλον και το μοντέλο κατεργασίας είναι διαθέσιμα, επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα σταθεροποιηθεί το αρχικό μοντέλο στην τράπεζα της εργαλειομηχανής προκειμένου να ξεκινήσει η κατεργασία. Η κατεργασία ολοκληρώνεται σε 5 δεσίματα. Τα δύο από αυτά πραγματοποιούνται με βοηθητικά μεταλλικά πλακίδια, τα επόμενα δύο με τη βοήθεια κοχλίων, ενώ το τελευταίο δέσιμο πραγματοποιείται με τη βοήθεια μέγγενης. Οι τρόποι σταθεροποίησης του δοκιμίου φαίνονται στις Εικόνες 21, 22 και 23 στις οποίες έχει μοντελοποιηθεί το τραπέζι της εργαλειομηχανής, το δοκίμιο καθώς επίσης και όλα τα εξαρτήματα (πλακίδια στήριξης, κοχλίες κλπ.).



Εικόνα 221: Πρώτο και δεύτερο δέσιμο δοκιμίου



Εικόνα 22: Τρίτο και τέταρτο δέσιμο δοκιμίου



Εικόνα 23 Πέμπτο δέσιμο δοκιμίου

Στις Εικόνες 21 και 22 παρατηρείται το δοκίμιο στερεωμένο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Στην πρώτη περίπτωση (πρώτο και τρίτο δέσιμο) χρησιμοποιούνται κοχλίες για τη στερέωση ενώ στη δεύτερη (δεύτερο και τέταρτο δέσιμο) κρίνεται απαραίτητη η χρήση πλακιδίων στήριξης (μαύρο χρώμα). Για το πέμπτο δέσιμο του δοκιμίου κρίνεται απαραίτητη η χρήση μέγγενης όπως φαίνεται στην Εικόνα 23. Μοντελοποιούνται όλα τα χρησιμοποιηθέντα αντικείμενα καθώς με αυτόν τον τρόπο συνυπολογίζονται στις κινήσεις του κοπτικού. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μια αποδοτική μέθοδος κατεργασίας με ταυτόχρονη αποφυγή συγκρούσεων.

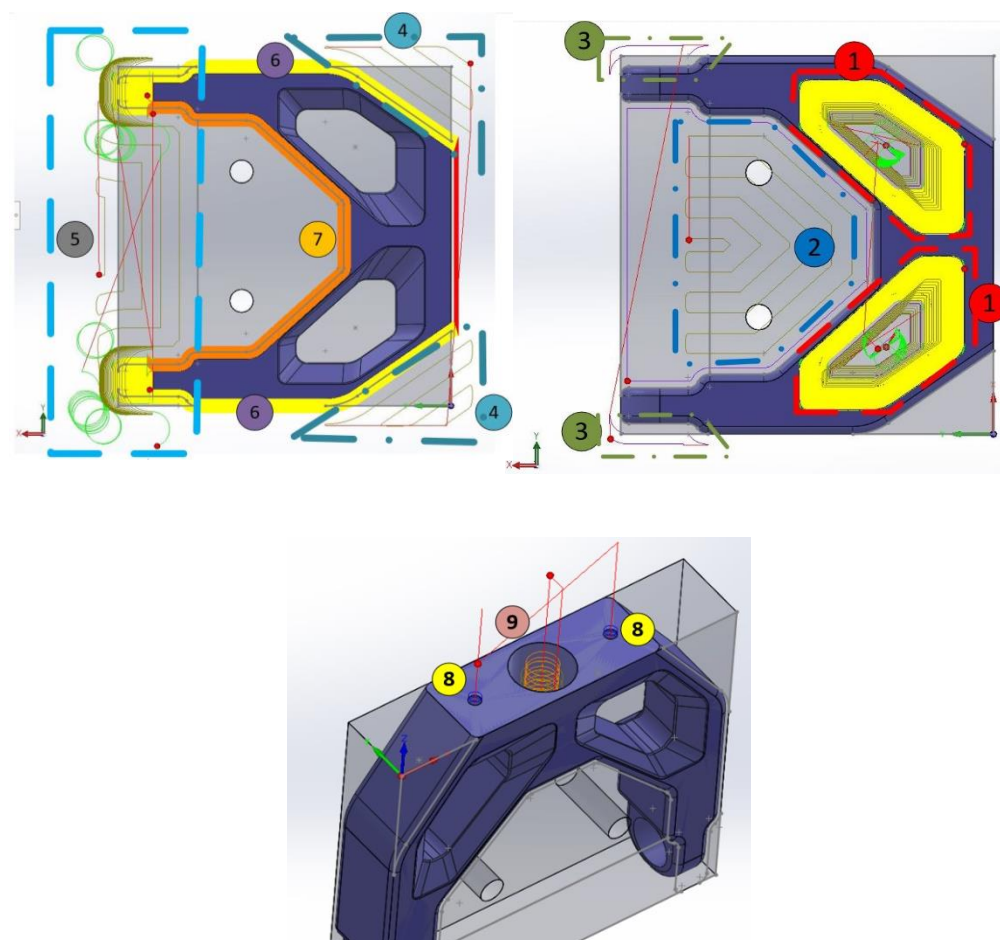
3.3.3.4 Επιλογή κατάλληλων λειτουργιών του λογισμικού CAM και δημιουργία ακολουθιών αριθμητικού ελέγχου

Ύστερα από την προετοιμασία του περιβάλλοντος και του μοντέλου κατεργασίας, γίνεται η επιλογή των κατάλληλων λειτουργιών κατεργασίας και ορίζονται οι κατάλληλες παράμετροι. Δηλαδή, το όνομα του κοπτικού που χρησιμοποιείται, οι επιφάνειες κατεργασίας, οι προώσεις, η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου, τα βάθη κοπής ο τρόπος εισόδου του κοπτικού εργαλείου κατά την έναρξη της κοπής κ.α. Πολλές από αυτές τις πληροφορίες αντλούνται από τον κατασκευαστή του κοπτικού, άλλες από γενικούς κανόνες που εφαρμόζονται εμπειρικά, ενώ άλλες από τις πηγές [81] και [86].

Η διαδικασία κατασκευής του συνδέσμου ολοκληρώνεται σε πέντε φάσεις (Εικόνες 21, 22 και 23). Κάθε φάση αντιστοιχεί σε ένα δέσιμο (1^η φάση κατεργασίας στο 1^ο δέσιμο

κλπ.) Στην Εικόνα 24 παρουσιάζονται οι διαδρομές του κοπτικού εργαλείου σε κάθε επιμέρους κατεργασία.

Στον Πίνακα 3 είναι συγκεντρωμένες και ομαδοποιημένες όλες οι επιμέρους κατεργασίες ανάλογα με τα στάδια (ξεχόνδρισμα, αποπεράτωση κλπ.) που χρειάστηκαν για να επιτευχθεί η τελική γεωμετρία. Οι αριθμοί της πρώτης στήλης του Πίνακα 3 αντιστοιχούν στους αριθμούς της Εικόνας 24.



Εικόνα 24: Διαδρομές κοπτικού ελέγχου για κάθε επιμέρους κατεργασία.

Πίνακας 3: Ομαδοποιημένες κατεργασίες

1	pocket1 – Κατεργασία εσωτερικής διαμόρφωσης Εικόνα 24 (β)
	rough1 – Κατεργασία ξεχονδρίσματος λοξότμησης Εικόνα 24 (β)
	finish1 – Κατεργασία αποπεράτωσης λοξότμησης Εικόνα 24 (β)
2	open pocket 2 και 2.1 – Κατεργασία ανοικτής εσωτερικής διαμόρφωσης Εικόνα 24 (β)
3	open pocket 3 – Κατεργασία εξωτερικής διαμόρφωσης Εικόνα 24 (β)
4	open pocket 4 – Κατεργασία εξωτερικής διαμόρφωσης Εικόνα 24 (α)
5	rough5.0 και 5.1 – Κατεργασία ξεχονδρίσματος εξωτερικής διαμόρφωσης Εικόνα 24 (α)
	finish5.1 – Κατεργασία αποπεράτωσης εξωτερικής διαμόρφωσης Εικόνα 24 (α)
6	external round – Κατεργασία διαμόρφωσης εξωτερικού round Εικόνα 24 (α)
7	internal round – Κατεργασία διαμόρφωσης εσωτερικού round Εικόνα 24 (α)
8	drilling1 – Κατεργασία τρυπήματος Εικόνα 25
9	drilling2 και pocket6 – Κατεργασία τρυπήματος Εικόνα 25
* Τα χρώματα και η αρίθμηση αντιστοιχούν στην Εικόνα 24	

Κάποιες από αυτές, λόγω του ότι ο σύνδεσμος είναι συμμετρικός ως προς δύο άξονες, επαναλαμβάνονται πάνω από δύο φορές.

3.3.3.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης και υπολογισμός χρόνου κατεργασίας

Μετά το πέρας της προσομοίωσης είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε το μοντέλο του τελικού προϊόντος. Επίσης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ελέγχεται αν το κοπτικό εργαλείο ακολουθεί την πορεία που θέλαμε εξ αρχής. Όσον αφορά τον χρόνο κατεργασίας δεν επηρεάζεται μόνο από την ταχύτητα πρόωσης και την ταχύτητα περιστροφής της κυρίας ατράκτου αλλά και από τις αριθμητικές ακολουθίες που ακολουθεί (toolpaths). Σε όλες τις κατεργασίες εφαρμόστηκαν οι προτεινόμενες από τον κατασκευαστή συνθήκες κοπής. Όμως για να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα έγιναν πολλές δοκιμές, όπως ορίζεται και στο σχεδιάγραμμα της Εικόνας 19, για να οριστούν οι κατάλληλες ακολουθίες. Στους Πίνακες 4, 5, 6 και 7 παραθέτονται οι παράμετροι, η διάρκεια κάθε κατεργασίας καθώς επίσης και η σειρά των κατεργασιών σε κάθε φάση.

Η δεύτερη φάση κατασκευής χαρακτηρίζεται από την τοποθέτηση του μοντέλου σύμφωνα με την Εικόνα 21 αλλά από την αντίθετη πλευρά που ήταν στην πρώτη φάση. Αποτελείται από πέντε επιμέρους κατεργασίες οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 μαζί με τις συνθήκες κοπής και τα κοπτικά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Η συνολική διάρκεια της δεύτερης φάσης σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, είναι 11.041 δευτερόλεπτα. Δηλαδή περίπου 3 ώρες και 4 λεπτά.

Πίνακας 6: Παράμετροι και πληροφορίες κατεργασιών τρίτης φάσης κατασκευής του συνδέσμου

[illegible]

Ο Πίνακας 6 αναφέρεται στην τρίτη φάση κατασκευής του δοκιμίου η οποία αποτελείται από τρεις διαφορετικές κατεργασίες και έχει διάρκεια 1.808 δευτερόλεπτα (περίπου 30 λεπτά). Στην τρίτη φάση κατασκευής το προς κατεργασία κομμάτι τοποθετείται σύμφωνα με την τρίτη τοποθέτηση όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 με τη χρήση πλακιδίων στήριξης.

Πίνακας 7: Παράμετροι και πληροφορίες κατεργασιών τέταρτης και πέμπτης φάσης κατασκευής του συνδέσμου

[illegible]

Οι κατεργασίες και τα χαρακτηριστικά των δύο τελευταίων φάσεων κατασκευής (τέταρτη και πέμπτη φάση) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Η τέταρτη φάση έχει η διάρκεια 1.627 δευτερόλεπτα (περίπου 27 λεπτά) ενώ η πέμπτη φάση 365 δευτερόλεπτα (περίπου 6 λεπτά). Η τοποθέτηση του κατεργαζόμενου δοκιμίου είναι σύμφωνα με την Εικόνα 22 στην τέταρτη φάση, ενώ στην πέμπτη φάση σύμφωνα με την Εικόνα 23.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας διάρκειας κατεργασίας

Φάση κατασκευής	Διάρκεια (sec)
1 ^η	11.873
2 ^η	11.041
3 ^η	1.808
4 ^η	1.627
5 ^η	365
Συνολική διάρκεια	26.714

Η συνολική διάρκεια που η εργαλειομηχανή (CNC φρέζα) θα είναι σε λειτουργία ανέρχεται στα 26.714 δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 7 ώρες και 25 λεπτά. Στο συνολικό χρόνο κατεργασίας όμως, πρέπει να προστεθούν οι χρόνοι προετοιμασίας της εργαλειομηχανής καθώς επίσης και ο χρόνος που χρειάζεται για την μετάβαση από ένα δέσιμο σε κάποιο άλλο. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως η κατασκευή του δοκιμίου πραγματοποιείται σε πέντε φάσεις (πέντε διαφορετικά δεσίματα).



Εικόνα 25: Όλοι οι παράγοντες που πρέπει να συνυπολογιστούν για τη συνολική διάρκεια της κατεργασίας.

Στην Εικόνα 25 παρουσιάζονται με τη σειρά όλες οι εργασίες που πρέπει να υλοποιηθούν προκειμένου το δοκίμιο να είναι έτοιμο προς συναρμολόγηση. Ο χρόνος που χρειάζεται για την προετοιμασία της εργαλειομηχανής ανέρχεται στα 20 λεπτά, ενώ ο χρόνος για την προετοιμασία, τοποθέτηση, εισαγωγή κώδικα κλπ. του δοκιμίου είναι 10 λεπτά. Επομένως συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω (Εικόνα 25) η συνολική διάρκεια

κατασκευής του εξαρτήματος της μοτοσυκλέτας, ανέρχεται στα 30,914 δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου στις 8 ώρες και 35 λεπτά.

3.4 Μείωση του χρόνου κατεργασίας μέσω επανασχεδιασμού

3.4.1 Προτάσεις επανασχεδιασμού για συγκεκριμένες κατεργασίες

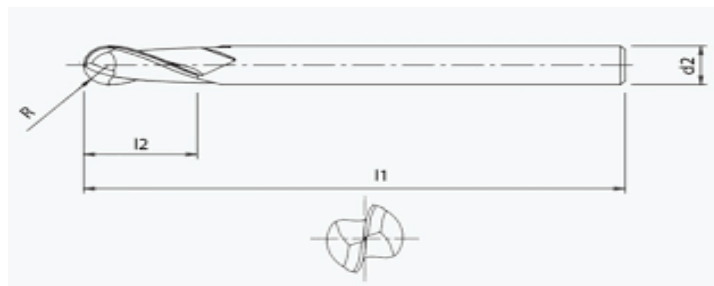
Έπειτα από την παραπάνω ανάλυση, παρατηρείται ότι οι πιο χρονοβόρες κατεργασίες είναι οι εξής:

1. finish 1 – Κατεργασία αποπεράτωσης λοξότμησης (6,810 δευτερόλεπτα, 1 ώρα και 53 λεπτά)
2. external round – Κατεργασία διαμόρφωσης εξωτερικού round (2,342 δευτερόλεπτα, 39 λεπτά)
3. internal round – Κατεργασία διαμόρφωσης εσωτερικού round (1,627 δευτερόλεπτα, 27 λεπτά)
4. finish 5.1 – Κατεργασία αποπεράτωσης εξωτερικής διαμόρφωσης (1,619 δευτερόλεπτα, 27 λεπτά)

όλες οι παραπάνω κατεργασίες πραγματοποιούνται δύο φορές καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής του δοκιμίου όπως παρουσιάζεται και στους Πίνακες 4, 5 και 6.

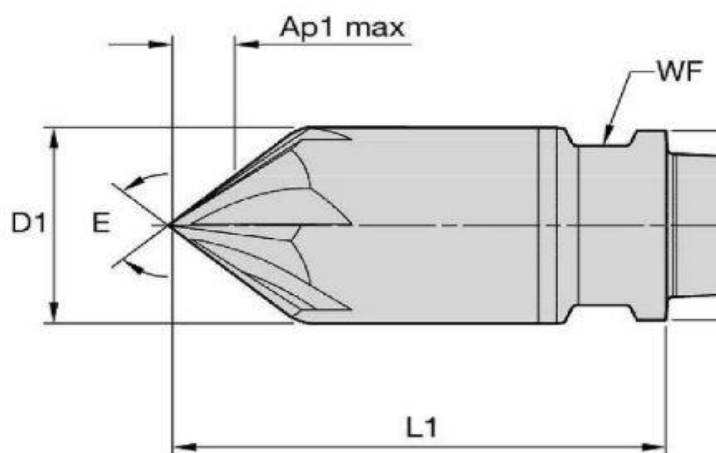
Για κάθε μία από τις κατεργασίες παρουσιάζονται και αναλύονται προτάσεις επανασχεδιασμού. Βασικός στόχος είναι η μείωση του χρόνου κατεργασίας με ταυτόχρονη ικανοποίηση των προδιαγραφών που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.1.

Η κατεργασία finish 1 αφορά την αποπεράτωση της επιφάνειας που παρουσιάζεται στο σημείο με αριθμό 1 της Εικόνας 24. Ο λόγος ύπαρξης της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι (α) να αφαιρεθεί περιττό υλικό το οποίο προσθέτει βάρος και (β) αισθητικός. Λόγω του ότι η γωνία κλίσης της λοξότμησης (chamfer) δεν είναι σταθερή, γίνεται λεπτομερή προσέγγιση της επιφάνειας του μοντέλου με επαναλαμβανόμενα, παράλληλα περάσματα των οποίων οι αποστάσεις είναι πολύ μικρές (0.05 mm). Στη συγκεκριμένη κατεργασία χρησιμοποιείται κοπτικό εργαλείο σφαιρικού τύπου (Ball Nose) διαμέτρου 6mm (βλ. Πίνακα 2) που ενδείκνυται για την κατεργασία τέτοιου είδους διαμορφώσεων (Εικόνα 26).



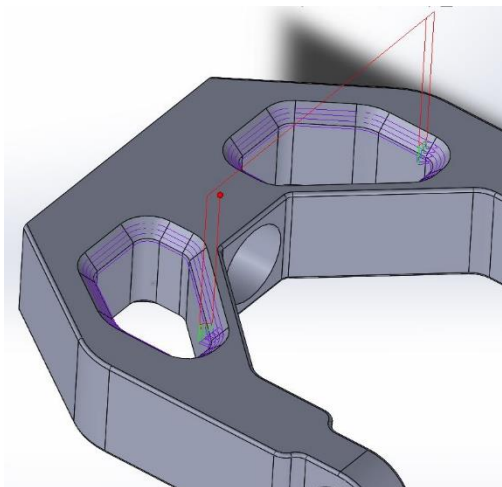
Εικόνα 2626: Κονδύλι σφαιρικού τύπου (Ball Nose Tool).

Λόγω του ότι η διάρκεια της κατεργασίας finish 1 αποτελεί μεγάλο ποσοστό της συνολικής κατεργασίας (44% του συνολικού χρόνου) προτείνεται ο επανασχεδιασμός του αντικειμένου. Ο επανασχεδιασμός αφορά την αλλαγή της λοξότμησης μη σταθερής κλίσης σε λοξότμηση σταθερής κλίσης 45 μοιρών. Πραγματοποιώντας μια τέτοια αλλαγή στο αρχικό σχέδιο, δίνεται η δυνατότητα κατεργασίας με κονδύλι λοξότμησης (Chamfer Tool) όπως της Εικόνας 27. Ακόμη η κατεργασία rough 1 παραλείπεται καθώς με διαδοχικές διαδρομές του κονδυλιού λοξότμησης επιτυγχάνεται αποδεκτό αποτέλεσμα και δεν υπάρχει η ανάγκη ξεχονδρίσματος.



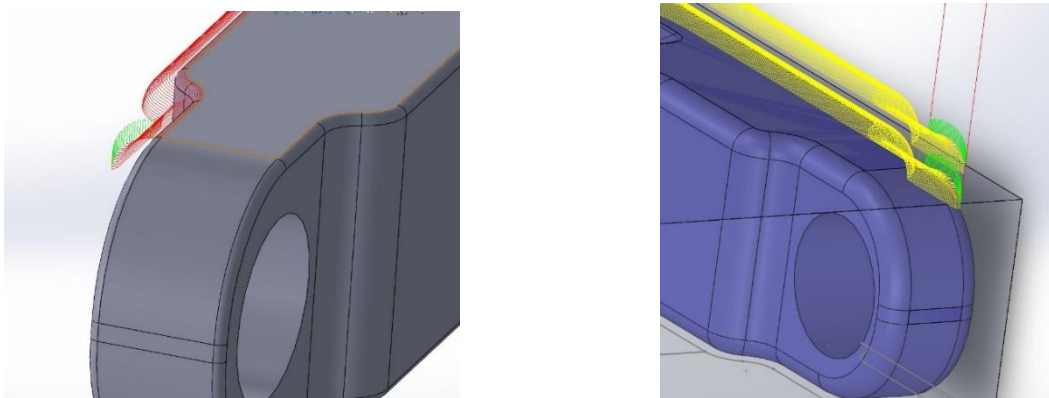
Εικόνα 27: Κονδύλι τύπου λοξοτόμησης (Chamfer Tool).

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις παρατηρείται σημαντική μείωση του χρόνου κατεργασίας στα 223 δευτερόλεπτα (3 λεπτά και 43 δευτερόλεπτα) από την αρχική διάρκεια των 6.810 δευτερολέπτων (1 ώρα και 53 λεπτά). Πρόκειται για μείωση της τάξης του 96% για τη συγκεκριμένη κατεργασία. Έχοντας τη μείωση του χρόνου και την τελική μορφή ως δεδομένα, ελέγχεται αν το επανασχεδιασμένο δοκίμιο ικανοποιεί τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί εξ αρχής (λειτουργικότητα, αισθητική κλπ.). Σε περίπτωση που ικανοποιούνται η αλλαγή γίνεται αποδεκτή και ενσωματώνεται στο τελικό μοντέλο προς κατασκευή.



Εικόνα 28: Ακολουθίες αριθμητικού ελέγχου για την κατεργασία λοξότμησης 45 μοιρών

Οι κατεργασίες external round και internal round παρουσιάζονται στην Εικόνα 24 με αριθμούς 6 και 7 αντίστοιχα. Οι διαμορφώσεις που προκύπτουν από την κατεργασία έχουν κυρίως αισθητικό σκοπό. Ωστόσο, λόγω της λεπτομερούς προσέγγισης απαιτούνται πολλές διαδρομές του κοπτικού εργαλείου κάθε κατεργασίας (βλ. Πίνακα 2), γεγονός που αυξάνει τον χρόνο κατεργασίας. Ο χρόνος κατεργασίας ανέρχεται στα 2.342 δευτερόλεπτα για την κατεργασία external round (περίπου 39 λεπτά) και στα 1.627 δευτερόλεπτα για την κατεργασία internal round (περίπου 27 λεπτά). Λόγω του ότι οι παραπάνω εργασίες είναι χρονοβόρες (15% του χρόνου λειτουργίας της εργαλειομηχανής) προτείνεται η μείωση της ακτίνας του round από 3mm σε 1mm. Η αλλαγή αυτή επιτρέπει στον μηχανουργό να επιτύχει την τελική διαμόρφωση με μία σειρά παράλληλων διαδρομών και όχι με δύο όπως απαιτούνταν προηγουμένως (Εικόνα 29).



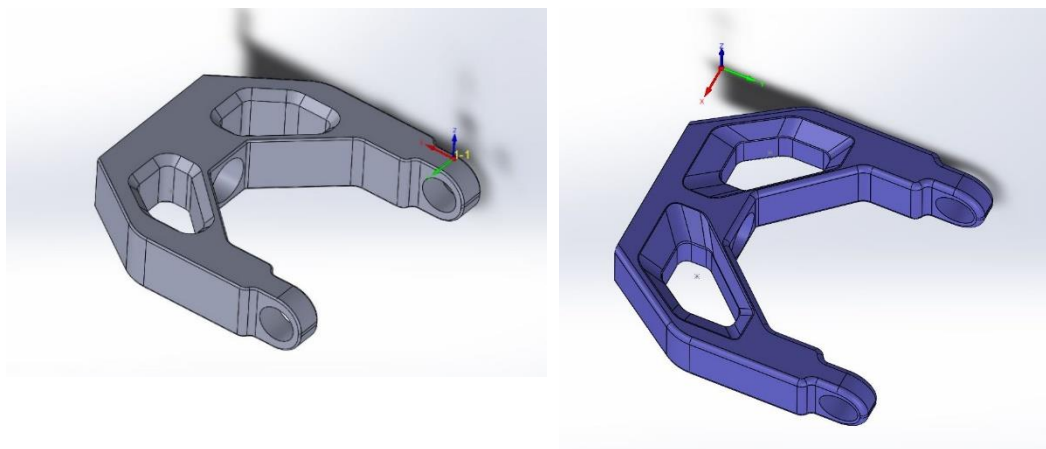
Εικόνα 29: Εκτέλεση κατεργασίας με μία σειρά παράλληλων διαδρομών (αριστερά) και με δύο σειρές παράλληλων διαδρομών (δεξιά)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περίπτωση της συγκεκριμένης αλλαγής, οι νέοι χρόνοι κατεργασίας ανέρχονται στα 587 δευτερόλεπτα για την κατεργασία external round (περίπου 9 λεπτά) και στα 434 δευτερόλεπτα για την κατεργασία internal round (περίπου 7 λεπτά). Πρόκειται για μείωση της τάξης του 74% σε σχέση με τη συνολική διάρκεια των κατεργασιών με ακτίνα round 3mm. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ελέγχονται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί (αισθητική κλπ.) και αποφασίζεται αν οι εν λόγω αλλαγές είναι αποδεκτές.

Στην περίπτωση της κατεργασίας finish 5.1 (Εικόνα 24 με αριθμό 5) μετά από κατάλληλο έλεγχο διαπιστώνεται ότι παρόλο που η κατεργασία είναι χρονοβόρα δεν μπορεί να γίνει κάποια πρόταση επανασχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει καθώς σε περίπτωση που αλλάξει η γεωμετρία του συνδέσμου στο συγκεκριμένο σημείο, επηρεάζεται η λειτουργικότητα του συστήματος.

3.4.2 Σύνοψη προτάσεων επανασχεδιασμού

Σύμφωνα με τις παραπάνω προτάσεις επανασχεδιασμού, το τελικό μοντέλο που προκύπτει είναι αυτό της Εικόνας 30 (αριστερά).



Εικόνα 30: Σύνδεσμος που προκύπτει από τον επανασχεδιασμό (αριστερά) σε σύγκριση με τον αρχικό σύνδεσμο (δεξιά)

Στην περίπτωση εφαρμογής των προτάσεων επανασχεδιασμού, παρατηρείται μείωση του χρόνου λειτουργίας της εργαλειομηχανής κατά 73%. Οι χρόνοι τοποθέτησης του δοκιμίου (10 λεπτά ανά τοποθέτηση) και ο χρόνος προετοιμασίας της εργαλειομηχανής (20 λεπτά) παραμένουν οι ίδιοι, οπότε σύμφωνα με το σχήμα της Εικόνας 25 η συνολική διάρκεια κατεργασίας ανέρχεται στα 11.404 δευτερόλεπτα (περίπου 3 ώρες και 10 λεπτά). Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα ο συνολικός χρόνος κατεργασίας μειώνεται κατά 63%. Λόγω του επανασχεδιασμού όμως, αυξάνεται ο χρόνος σχεδίασης και ανάλυσης του δοκιμίου. Εκτιμάται ότι η αύξηση στη διαδικασία σχεδίασης και ανάλυσης είναι της τάξης του 15%.

Πίνακας 9: Συγκριτικός πίνακας διάρκειας κατεργασιών πριν και μετά τις προτάσεις επανασχεδιασμού

Φάση κατασκευής	Διάρκεια μετά τον επανασχεδιασμό	Διάρκεια πριν τον επανασχεδιασμό
1 ^η	3,308 sec (περίπου 55 λεπτά)	11,873 δεύτ. (περίπου 3 ώρες και 17 λεπτά)
2 ^η	2,482 δεύτ. (περίπου 41 λεπτά)	11,041 δεύτ. (περίπου 3 ώρες)
3 ^η	615 δεύτ. (περίπου 10 λεπτά)	1,808 δεύτ. (περίπου 30 λεπτά)
4 ^η	434 δεύτ. (περίπου 7 λεπτά)	1,627 δεύτ. (περίπου 27 λεπτά)
5 ^η	365 δεύτ. (περίπου 6 λεπτά)	365 δεύτ. (περίπου 6 λεπτά)
Συνολική διάρκεια	7,204 δεύτ. (2 ώρες και 4 δευτερόλεπτα)	26,714 δεύτ. (7 ώρες και 25 λεπτά)

3.5 Διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας με την εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου

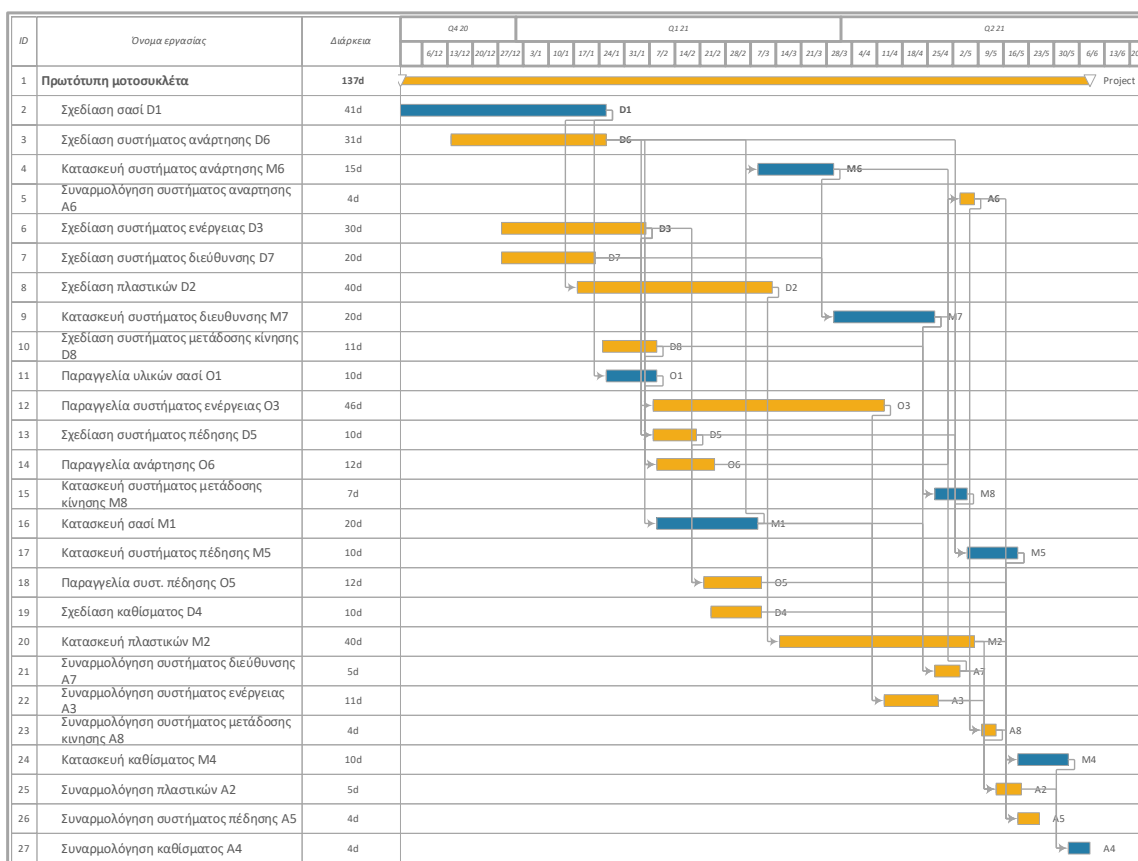
Το σύστημα ανάρτησης της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας αποτελείται και από άλλα αντίστοιχα εξαρτήματα που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με την μεθοδολογία που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 3.3.2. Υποθέτοντας ότι και στην κατασκευή των υπόλοιπων εξαρτημάτων υπάρχει αντίστοιχη μείωση του χρόνου κατεργασίας, καταλήγουμε ότι με την εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου επανασχεδιασμού, επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου κατασκευής του συστήματος ανάρτησης κατά 63%. Ταυτόχρονα, όπως αναφέρθηκε υπάρχει αύξηση του χρόνου σχεδίασης και ανάλυσης κατά 15%. Σύμφωνα με το σενάριο βάσης του δεύτερου κεφαλαίου η εργασία κατασκευής του συστήματος ανάρτησης κωδικοποιείται με M6. Ενώ η εργασία σχεδίασης του συστήματος ανάρτησης κωδικοποιείται με D6. Λόγω του ότι η εργασία M6 στην οποία πραγματοποιείται σημαντική μείωση (63%) δεν είναι κρίσιμη, δεν παρατηρείται συνολική μείωση της παραγωγικής διαδικασίας.

Σε ένα διαφορετικό σενάριο, που λόγω μη επαρκούς αριθμού ανθρωπίνου δυναμικού στο μηχανουργείο, όλες οι εργασίες κατασκευής εκτελούνται η μία μετά το πέρας της προηγούμενης (δεν μπορούν να έχουν διαφορετική σχέση προτεραιότητας εκτός από FS). Ο περιορισμός αυτός αυξάνει τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής στις 139.5 ημέρες. Με βάση αυτό το σενάριο οι κρίσιμες εργασίες της διαδικασίας είναι οι D1, O1, M1, M6, M7, M8, M5, M4 και η A4. Μέσω του λογισμικού MS Project υπολογίζεται ότι η εργασία M6 αποτελεί κρίσιμη εργασία ακόμα και αν διαρκεί 2 ημέρες (η εκτιμώμενη διάρκεια μέσω PERT είναι 15 ημέρες). Αυτό σημαίνει ότι η μείωση του χρόνου κατασκευής του συστήματος ανάρτησης, μειώνει και τον συνολικό χρόνο περάτωσης της παραγωγικής διαδικασίας.

Συγκεκριμένα, μείωση του χρόνου κατασκευής του συστήματος ανάρτησης κατά 63% σημαίνει ότι η εργασία αντί για 15 ημέρες πραγματοποιείται σε 5.5 ημέρες. Ταυτόχρονα

όμως, υπάρχει αύξηση του χρόνου σχεδιασμού του συστήματος ανάρτησης (αύξηση κατά 15%). Γεγονός που αυξάνει τη διάρκεια της εργασίας D6 από 31.67 ημέρες (μέσω μεθόδου PERT) σε 36.4 ημέρες. Ωστόσο, η εργασία D6 δεν είναι κρίσιμη και το περιθώριο καθυστέρησης (χωρίς να επηρεάζει τη συνολική διάρκεια) είναι 31 ημέρες. Επομένως έχουμε συνολική μείωση της διαδικασίας κατά 9.5 ημέρες με την εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου επανασχεδιασμού. Δηλαδή η συνολική διάρκεια ανέρχεται στις 130 ημέρες.

Σημειώνεται ότι αυτή η διαδικασία είναι προτιμότερη και από οικονομικής πλευράς. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται κατά ένα ποσοστό η διαδικασία σχεδίασης ενώ μειώνεται κατά ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό ο χρόνος λειτουργίας της εργαλειομηχανής. Σημειώνεται ότι το κόστος λειτουργίας της εργαλειομηχανής ανά ώρα, είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος σχεδίασης ανά ώρα.



Εικόνα 31: Διάγραμμα Gantt της διαδικασίας παραγωγής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας με τις εργασίες που εκτελούνται σε μηχανουργείο να εκτελούνται η μία μετά το πέρας της προηγούμενης

4 Συμπεράσματα

4.1 Τελικά συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων (Digital Twins) στη διαδικασία παραγωγής της πρωτότυπης μοτοσυκλέτας Δαίδαλος (Daedalus) που κατασκευάζεται στο Πολυτεχνείο Κρήτης [98]. Μελετήθηκαν και εφαρμόστηκαν μεθοδολογίες ψηφιακών διδύμων για την αποτελεσματική παρακολούθηση της διαδικασίας καθώς επίσης και τη μείωση του χρόνου κατασκευής δοκιμίων σε CNC φρέζα (πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με λογισμικό CAD/CAM).

Αρχικά αναλύθηκε η έννοια του ψηφιακού διδύμου και πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σχετική με τις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων στον τομέα των οχημάτων. Οι υπάρχουσες δημοσιεύσεις ομαδοποιήθηκαν βάσει κριτηρίων και έγινε η εξαγωγή στατιστικών. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μία μεθοδολογία ψηφιακού διδύμου, σύμφωνα με την [82], που αφορά την αποτελεσματική παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας της ηλεκτροκίνητης πρωτότυπης μοτοσυκλέτας Daedalus. Έπειτα μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένα ψηφιακό δίδυμο επανασχεδιασμού με στόχο τη μείωση του χρόνου κατασκευής ενός συνδέσμου του πρόσθιου συστήματος ανάρτησης της μοτοσυκλέτας Daedalus. Προσομοιώθηκε η διαδικασία κατασκευής σε εξειδικευμένο λογισμικό CAD/CAM και υπολογίστηκαν οι τρόποι και οι χρόνοι κατεργασίας. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα και λαμβάνοντας υπόψιν τις προδιαγραφές που πρέπει να πληρεί ο σύνδεσμος προς κατασκευή έγιναν προτάσεις επανασχεδιασμού. Υπολογίστηκαν οι νέοι χρόνοι κατεργασίας του επανασχεδιασμένου δοκιμίου και παρατηρήθηκε μείωση του χρόνου κατασκευής κατά 63%. Λόγω του ότι όλα τα εξαρτήματα του εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο (CNC φρέζα), ο χρόνος κατασκευής του συστήματος σημείωσε αντίστοιχη μείωση.

Τέλος, εξετάστηκε η συνεισφορά της παραπάνω μείωσης στη συνολική παραγωγική διαδικασία της μοτοσυκλέτας. Πρέπει να αναφερθεί ότι υπό συνθήκες παρατηρήθηκε μείωση του συνολικού χρόνου παραγωγής σε ποσοστό περίπου 7%. Σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις καταλήγουμε στο γεγονός ότι με τις παραπάνω εφαρμογές ψηφιακών διδύμων (Digital Twins), (α) επιτυγχάνεται αποτελεσματική παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας και (β) σημειώνεται σημαντική μείωση στο χρόνο κατασκευής εξαρτημάτων σε ψηφιακά καθοδηγούμενη (CNC) φρέζα.

4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η παραπάνω εργασία αποτελεί οδηγό κατανόησης των ψηφιακών διδύμων που αφορούν παντός τύπου οχήματα. Ακόμη, μέσω δύο διαφορετικών εφαρμογών ψηφιακών διδύμων, γίνεται η αρχή για την πολυδιάστατη μελέτη της διαδικασίας ανάπτυξης της μοτοσυκλέτας Daedalus και της βελτιστοποίησης της.

Προτείνεται ως μελλοντική επέκταση της εργασίας η μελέτη και ο σχεδιασμός νέων ψηφιακών διδύμων που αφορούν διαφορετικά μέρη και συστήματα της μοτοσυκλέτας. Σε τελικό στάδιο η συνένωση όλων των παραπάνω ψηφιακών διδύμων σε ένα, θα είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη κατανόηση και τον βέλτιστο σχεδιασμό της διαδικασίας ανάπτυξης αντίστοιχων οχημάτων.

5 Βιβλιογραφία

- [1] Ρεντούμης Ιωάννης, Διπλωματική εργασία, Industry 4.0: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Σχολή Ναυτιλίας και Βιομηχανίας. Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, 2018.
- [2] S. Yun, J. Park and W. Kim, "Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems," 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Milan, 2017, pp. 922-926.
- [3] Bondarenko, O. and T. Fukuda. "Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics." Energy 196 (2020).
- [4] Pastore, T. and V. Djapic. "Improving autonomy and control of autonomous surface vehicles in port protection and mine countermeasure scenarios." J. Field Robotics 27 (2010).
- [5] Thomas Plank "The digital twin – an introduction" <https://www.linkedin.com/pulse/digital-twin-introduction-thomas-plank/>.
- [6] A. Rassõlkin, T. Vaimann, A. Kallaste and V. Kuts, "Digital twin for propulsion drive of autonomous electric vehicle", 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2019.
- [7] Hassan Abid, Luong Thi Thu Phuong, Jin Wang, Sungyoung Lee, and Saad Qaisar, "V-Cloud: vehicular cyber-physical systems and cloud computing", 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 165, 1–5, 2011.
- [8] Baheti, Radhakisan and H. Gill. "Cyber-physical Systems.", 2011.

- [9] J. Wan, H. Yan, D. Li, K. Zhou and L. Zeng, "Cyber-Physical Systems for Optimal Energy Management Scheme of Autonomous Electric Vehicle", in *The Computer Journal*, vol. 56, no. 8, pp. 947-956, Aug. 2013.
- [10] Dushyanth Kundanati, Dr. A. Kamala Kumari¹, "Design and Application of Digital Twin Network by using IoT Platform", *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* Volume 08, Issue 11, 2019.
- [11] Svae, Alexander et al. "Self-adaptive control in cyber-physical systems: the autonomous train experiment." *Proceedings of the Symposium on Applied Computing (2017)*: n. pag.
- [12] Simon Evans (Arup), "Digital twin: towards a meaningful framework", London, 2019.
- [13] Shyam V Nath, "Digital Twin for the Transportation Industry", IoT & Cloud Architecture Oracle, Intelligent Transportation Workshop, May 13, 2019.
- [14] Pk, Rajesh & Manikandan, N. & Ramshankar, C.S. & Vishwanathan, T. & Sathishkumar, "Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance", *Procedia Computer Science*, 2019.
- [15] Chen, Ximing & Kang, Eunsuk & Shiraishi, Shinichi & Preciado, Victor & Jiang, Zhihao, "Digital Behavioral Twins for Safe Connected Cars", 21th ACM/IEEE International Conference, October 2018.
- [16] Veledar, Omar & Damjanovic-Behrendt, Violeta & Macher, Georg, "Digital Twins for Dependability Improvement of Autonomous Driving", In book: *Systems, Software and Services Process Improvement*, August 2019.
- [17] V. Damjanovic-Behrendt, "A Digital Twin-based Privacy Enhancement Mechanism for the Automotive Industry", 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), Funchal, Portugal, pp. 272-279, 2018.
- [18] Madni, Azad & Madni, Carla & Lucero, Scott, "Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering" *Systems*. 7. 7. 10.3390/systems7010007.
- [19] E. H. Glaessgen and D.S. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles", 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, 2012.
- [20] Liao, Min & Renaud, Guillaume & Bombardier, Yan., "Airframe Digital Twin Technology Adaptability Assessment and Technology Demonstration" *Engineering Fracture Mechanics*, 2020.
- [21] Qiu, Shiguang & Liu, Shuntao & Kong, Deshuai & He, Qichang, "Three-dimensional virtual-real mapping of aircraft automatic spray operation and online simulation monitoring" *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2019.
-

- [22] Guivarch, D. & Mermoz, E. & Marino, Y. & Sartor, M., “Creation of helicopter dynamic systems digital twin using multibody simulations”, *CIRP Annals*, 2019.
- [23] Goswami, D. & Schneider, Reinhard & Masrur, Alejandro & Lukasiewicz, Martin & Chakraborty, Samarjit & Voit, Harald & Annaswamy, Anuradha, “Challenges in automotive cyber-physical systems design”, 2012 International Conference (SAMOS), 2012.
- [24] Chakraborty, Samarjit & Al Faruque, Mohammad Abdullah & Chang, Wanli & Goswami, D. & Wolf, Marilyn & Zhu, Qi, “Automotive Cyber-Physical Systems: A Tutorial Introduction”, *IEEE Design & Test*, 2016.
- [25] Macher, Georg & Armengaud, Eric & Schneider, Daniel & Brenner, Eugen & Kreiner, Christian, “Towards Dependability Engineering of Cooperative Automotive Cyber-Physical Systems”, Part of the Communications in Computer and Information Science book series (CCIS, volu, 2017.
- [26] Tsiatsis, Vlasios & Karnouskos, Stamatis & Höller, Jan & Boyle, David & Mulligan, Catherine, “Autonomous Vehicles and Systems of Cyber-Physical Systems- Chapter 16”, 2019
- [27] Bradley JM, Atkins EM, “Optimization and Control of Cyber-Physical Vehicle Systems”, *Sensors (Basel)*, 2015.
- [28] Shin J, Baek Y, Lee J, Lee S, “Cyber-Physical Attack Detection and Recovery Based on RNN in Automotive Brake Systems”, *Applied Sciences*, 2019.
- [29] F. Biesinger, B. Kraß and M. Weyrich, “A Survey on the Necessity for a Digital Twin of Production in the Automotive Industry”, 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Salerno, Italy, 2019.
- [30] H. Brandtstaedter, C. Ludwig, L. Hübner, E. Tsouchnika, A. Jungiewicz and U. Wever, “DIGITAL TWINS FOR LARGE ELECTRIC DRIVE TRAINS”, 2018 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe), Antwerp, Belgium, 2018.
- [31] Lozoya-Santos, Jorge & Campos, Andrés & Vargas-Martínez, Adriana & Morales-Menendez, Ruben & Ramirez-Mendoza, Ricardo A. & Tudón-Martínez, Juan, “Digital Twin model proposal for An Automotive Chassis”, 30th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST2019), Concordia University, Montreal, Canada, 2019.
- [32] Hayato SHIKATA, Tetsuo YAMASHITA, Kouji ARAI, Takayuki NAKANO, Kenichi HATANAKA, and Hiroyuki FUJIKAWA, “Digital Twin Environment to Integrate Vehicle Simulation and Physical Verification”, *SEI Technical review number 88*, April 2019.
- [33] Ryan Magargle, Lee Johnson, Padmesh Mandloi, Peyman Davoudabadi, Omkar Kesarkar, Sivasubramani Krishnaswamy, John Batteh, Anand Pitchaikani, “A Simulation-Based Digital Twin for Model-Driven Health Monitoring and Predictive Maintenance of an Automotive Braking System”, *Modelica*, 2017.

- [34] Erikstad, Stein, “Design Patterns for Digital Twin Solutions in Marine Systems Design and Operations”, COMPIT, 2018.
- [35] Vincenzo Arrichiello, Paola Gualeni, “Systems engineering and digital twin: a vision for the future of cruise ships design, production and operations”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* volume 14, pages115–122, 2020
- [36] Liu, Z., N. Meyendorf, and N. Mrad., “The Role of Data Fusion in Predictive Maintenance Using Digital Twin” In AIP Conference Proceedings, April 2018
- [37] A. A. Malozemov, V. N. Bondar, V. V. Egorov and G. A. Malozemov, “Digital Twins Technology for Internal Combustion Engines Development” 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, Russia, 2018, pp. 1-6.
- [38] Tharma, Rajeeth & Winter, Roland & Eigner, Martin, “AN APPROACH FOR THE IMPLEMENTATION OF THE DIGITAL TWIN IN THE AUTOMOTIVE WIRING HARNESS FIELD”, 15th International Design Conference, 2018, pp. 3023-3032.
- [39] L. Merkle, A. S. Segura, J. Torben Grummel and M. Lienkamp, “Architecture of a Digital Twin for Enabling Digital Services for Battery Systems”, 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS), Taipei, Taiwan, 2019, pp. 155-160.
- [40] Coraddu, Andrea & Oneto, Luca & Baldi, Francesco & Cipollini, Francesca & Atlar, Mehmet & Savio, s, “Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling”, *Ocean Engineering*, Volume 186, 2019
- [41] Mohammed M. Islam, “Ship Smart System Design (S3D) and Digital Twin”, in *VFD Challenges for Shipboard Electrical Power System Design* , IEEE, 2019, pp.117-127.
- [42] C. M. Ezhilarasu, Z. Skaf and I. K. Jennions, “Understanding the role of a Digital Twin in Integrated Vehicle Health Management (IVHM)”, 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), Bari, Italy, 2019, pp. 1484-1491.
- [43] M. Uzun, M. Umut Demirezen, E. Koyuncu and G. Inalhan, “Design of a Hybrid Digital-Twin Flight Performance Model Through Machine Learning”, 2019 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2019, pp. 1-14.
- [44] K. Nawa, N. P. Chandrasiri, T. Yanagihara, T. Komori and K. Oguchi, “Cyber physical system for vehicle application”, 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Bangkok, Thailand, 2012, pp. 135-138.
- [45] Younghun Song, Jeehun Park, Kyung-Chang Lee & Suk Lee, “Reducing the Design Complexity of Automated Vehicle Electrical and Electronic Systems Using a Cyber-physical System Concept”, *Int. J. Control Autom. Syst.* 17, 2019, pp. 500–508.
- [46] Satwani, A., Mahajan, D.S., & Vyas, P.Z., “Optimization and Control of Cyber-Physical Vehicle Systems” 2017.

- [47] Aditya Patil, Kedar More, Siddhesh Kulkarni, "A Review on Vehicular Cyber Physical Systems, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 02, 2018
- [48] "The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases, Volume 117 1st Edition" pp. 97-100
- [49] Manickavasagam, K. & Venkatesan, Suchitra & Nagendran, Vijayalakshmi & Tengenkai, Nikita, "Health Monitoring and Prognosis of Electric Vehicle Motor using intelligent-Digital Twin", IET Electric Power Applications, 2019.
- [50] M. Ruba, R. O. Nemes, S. M. Ciornei, C. Martis, A. Bouscayrol and H. Hedesiu, "Digital Twin Real-Time FPGA Implementation for Light Electric Vehicle Propulsion System Using EMR Organization", 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 1-6.
- [51] Um, Jung-Sup, "Drones as Cyber-Physical Systems Concepts and Applications for the Fourth Industrial Revolution (Κεφάλαιο 7)", 2019.
- [52] Tianle Zhang, Xiangtao Liu, Zongwei Luo, Fuqiang Dong & Yu Jiang, "Time series behavior modeling with digital twin for Internet of Vehicles", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking volume 2019, Article number: 271, 2019.
- [53] Yu Zheng, Liang Chen, Xiaoyan Lu, Yang Sen & Huanchong Cheng, "Digital twin for geometric feature online inspection system of car body-in-white", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020
- [54] Li, Chenzhao & Mahadevan, Sankaran & Ling, You & Choze, Sergio & Wang, Liping, "Dynamic Bayesian Network for Aircraft Wing Health Monitoring Digital Twin", AIAA Journal, 2017
- [55] Hazbon, Omar & Gutierrez, Luis & Bil, Cees & Napolitano, Marcello & Fravolini, mario, "Digital Twin Concept for Aircraft System Failure Detection and Correction", AIAA Aviation 2019 Forum, 2019.
- [56] Tuegel, Eric & Ingrassia, Anthony & Eason, Thomas & Spottswood, Stephen, "Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin", International Journal of Aerospace Engineering, 2011.
- [57] M. Schirmann, M. Collette, and J. Gose, "Ship motion and fatigue damage estimation via a digital twin", Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2075-2082, 2019.
- [58] Alexander Danielsen-Haces, "Digital Twin Development - Condition Monitoring and Simulation Comparison for the ReVolt Autonomous Model Ship", Master thesis in NTNU, 2018.
- [59] Zaccaria, Valentina & Stenfelt, Mikael & Aslanidou, Ioanna & Kyprianidis, Konstantinos, "Fleet Monitoring and Diagnostics Framework Based on Digital Twin of Aero-Engines", ASME Turbo Expo, Lillestrom, Norway, 2018.

- [60] Baiyu Chen, Zhengyu Yang, Siyu Huang, Xianzhi Du, Zhiwei Cui, Janki Bhimani, Xin Xie, and Ningfang Mi, "Cyber-physical system enabled nearby traffic flow modelling for autonomous vehicles" IEEE 36th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC), San Diego, CA, USA, 2017, pp. 1-6.
- [61] General Electric Company, "GE Digital Twin Analytic Engine for the Digital Power Plant", 2016, pp. 1-30.
- [62] Danish Maritime Authority, "Digital Twins for Blue Denmark", 2018, pp. 1-25.
- [63] Kraft, Edward, "The Air Force Digital Thread/Digital Twin - Life Cycle Integration and Use of Computational and Experimental Knowledge", 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016.
- [64] Fei, Xiao & Fengchen, Qian & Bing, Su & Yuzhu, Fan. "Digital Twin of Solid Rocket Motor, Problem and Challenge", 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 2018.
- [65] Cai, Hongxia & Zhang, Wei & Zhu, Zheng, "Quality Management and Analysis of Aircraft Final Assembly Based on Digital Twin", 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2019.
- [66] Taylor, Nicole & Human, Carlo & Kruger, Karel & Bekker, Anriëtte & Basson, Anton, "Comparison of Digital Twin Development in Manufacturing and Maritime Domains", In book: Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, 2020.
- [67] H. Cai, Z. Zhu and W. Zhang, "Vehicle Wheel Hub Manufacturing Scheduling Problem with Intermediate Storage", 2019 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2019, pp. 198-201.
- [68] S. Bhat, I. Stenius, N. Bore, J. Severholt, C. Ljung and I. Torroba Balmori, "Towards a Cyber-Physical System for Hydrobotic AUVs", OCEANS 2019 - Marseille, 2019, pp. 1-7.
- [69] Seshadri, Banavara & Krishnamurthy, Thiagarajan, "Structural Health Management of Damaged Aircraft Structures Using Digital Twin Concept", 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 2017.
- [70] Zakrajsek, Andrew & Mall, Shankar, "The Development and use of a Digital Twin Model for Tire Touchdown Health Monitoring", 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2017.
- [71] Stephen Smaldone, Chetan Tonde, Vancheswaran K. Ananthanarayanan, Ahmed Elgammal, and Liviu Iftode, "The cyber-physical bike: a step towards safer green transportation", 12th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (HotMobile '11), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2011, pp. 56-61.
- [72] Deborah S. Ray, Ed Baca, Steven Evancuk, Paul Golata, Dr. Michael Grieves, Michael Parks, "Methods_ Digital Twinning", Mouser's technology ang solutions eZine, Volume 2, Issue 2, 2018.

- [73] Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C.-Y. Lu & A. Y. C. Nee, “Digital twin-driven product design framework”, *International Journal of Production Research* 57(1), 2018, pp. 1-19.
- [74] Qi, Qinglin & Tao, Fei & Hu, Tianliang & Anwer, Nabil & Liu, Ang & Wei, Yongli & Wang, Lihui & Nee, Andrew, “Enabling technologies and tools for digital twin”, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 58, Part B, 2021, pp. 3-21.
- [75] Robinson Stewart & Brooks Roger, “Independent Verification and Validation of an Industrial Simulation Model” *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, 2010, pp. 405-416.
- [76] Coraddu, Andrea & Oneto, Luca & Baldi, Francesco & Cipollini, Francesca & Atlar, Mehmet & Savio, “Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling”, *Ocean Engineering*, Volume 186, 2019.
- [77] K. Sampigethaya and R. Poovendran, “Cyber-physical system framework for future aircraft and air traffic control”, 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2012, pp. 1-9.
- [78] Krasikov, I.I. & Kulemin, A., “Analysis of Digital Twin Definition and Its Difference from Simulation Modelling in Practical Application”, *KnE Engineering*, 2020, pp. 105–109.
- [79] EXOR International, 2020, <https://www.exorint.com/en/blog/what-is-the-difference-between-a-simulation-and-a-digital-twin>
- [80] Kandarp Patel, Gerardo Salas Bolaños, Rajnish Bassi & Sanjeev Bedi, “Optimal tool shape selection based on surface geometry for three-axis CNC machining”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, pp.655–670.
- [81] BDE Manufacturing Technologies, 2017, <https://www.bdeinc.com/blog/different-tool-path-strategies-optimizing-cnc-machining/>
- [82] G. J. Tsinarakis, P. S. Spanoudakis, G. Arabatzis, N. C. Tsourveloudis and L. Doitsidis, “Implementation of a Petri-net based Digital Twin for the development procedure of an Electric Vehicle”, 2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Saint-Raphaël, France, 2020, pp. 862-867.
- [83] J. Wang, *Timed Petri Nets: Theory and Application*. Norwell, MA: Kluwer, 1998.b
- [84] Hassane Alla, René David, “A modelling and analysis tool for discrete events systems: continuous Petri net”, *Performance Evaluation*, Volume 33, Issue 3, 1998, pp. 175-199.
- [85] G. J. Tsinarakis, “Modeling Task Dependencies in Project Management Using Petri Nets with Arc Extensions”, 2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Zadar, Croatia, 2018, pp. 84-89.
- [86] Αθανηλίδης Ηλίας, Σχεδιασμός και κατεργασία σε κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων με τη χρήση του CATIA, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα: Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2013

- [87] Δημητριάδης Αντώνης, “Διοίκηση – Διαχείριση έργου, Project Management”, 5^η έκδοση, Αθήνα, 2019.
- [88] Κάντζαρη Μαρία, “Μοντέλα για τον χρονοπρογραμματισμό έργων με περιορισμένους πόρους”, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών-Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών “Μαθηματικά των Υπολογιστών και των Αποφάσεων”, 2010.
- [89] Γεωργίου Ι. Τσιναράκη, Μοντελοποίηση και μελέτη συστημάτων παραγωγής τυχαίας τοπολογίας με δίκτυα Petri: Μια προσέγγιση ιεραρχικού ελέγχου, 2007
- [90] BRAUER, WILFRIED & Reisig W., “Carl Adam Petri and Petri Nets”, Informatik-Spektrum. 1996, pp. 369-374.
- [91] Δημητριάδου - Γιαννέλη Χριστίνα, “Δίκτυα Petri”, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών: «Πληροφορική και Διοίκηση», Τμήμα Πληροφορικής και Οικονομικών, 2013.
- [92] Lopez-Mellado, Ernesto, “Analysis of discrete event systems by simulation of timed Petri net models” Mathematics and Computers in Simulation, 2002.
- [93] Desel, Jörg & Juhas, G., “What Is a Petri Net?” Informal Answers for the Informed Reader. 2001, pp. 1-25.
- [94] T. Murata, “Petri nets: Properties, analysis and applications”, in Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 4, 1989, pp. 541-580.
- [95] Jehng W. K., “Petri net models applied to analyze automatic sequential pressing systems”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 120, 2002, pp. 115 – 125.
- [96] Hofstadt R., “A petri net application to model metabolic processes”, Systems Analysis Modelling Simulation, vol. 2, pp. 113 – 122, 1994.
- [97] Will J. and Heiner M., Petri nets in Biology, Chemistry and Medicine –Bibliography-, Τεχνική Έκθεση, Brandenburg University of Technology at Cottbus, 2002.
- [98] Daedalus Site. Διαθέσιμο online: <http://daedalus.tuc.gr>