



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ  
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ψηφιακά Δίδυμα: Εφαρμογές στην εκπαιδευτική  
ρομποτική**

**Ευάγγελος Γλυνός  
ΑΜ: 2013010158**

**Χανιά, 2021**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δοϊτσίδη Ελευθέριο για την άριστη συνεργασία και καθοδήγησή του σε όλο το χρονικό διάστημα εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το μέλος Ε. ΔΙ. Π της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κ. Τσιναράκη Γεώργιο, για την πολύτιμη συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον συμφοιτητή μου και καλό μου φίλο Γεώργιο Κακαρά για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε σχετικά με την λειτουργία της πλατφόρμας Hydra και τις γνώσεις του πάνω στο project.

Τέλος, την μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη την οφείλω στην οικογένεια μου για την αμέριστη και άνευ όρων στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησης μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Τα τελευταία χρόνια η μεθοδολογία STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) και η εκπαιδευτική ρομποτική κερδίζουν σταδιακά έδαφος στα προγράμματα σπουδών των σχολείων της Πρωτοβάθμιας και Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης αλλά και σε εξωσχολικές εκπαιδευτικές δραστηριότητες. Παράλληλα νέα εργαλεία, κυρίως από την περιοχή των ΤΠΕ, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται στα πλαίσια του Industry 4.0, αλλά η χρήση τους σε διαφορετικές περιοχές, όπως είναι η εκπαιδευτική διαδικασία είναι περιορισμένη. Ένα σχετικό εργαλείο αποτελούν και τα ψηφιακά δίδυμα, που ορίζονται ως η ψηφιακή αποτύπωση ενός φυσικού αντικειμένου που περιέχει όλες τις ιδιότητες, πληροφορίες και καταστάσεις του πραγματικού αντικειμένου. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτυχθηκε ένα ψηφιακό δίδυμο ενός πρωτότυπου πραγματικού συστήματος εκπαιδευτικής ρομποτικής. Μέσω του ψηφιακού δίδυμου ο εκπαιδευτής έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί, να καταγράφει, να ελέγχει, να αξιολογεί, να αναπροσαρμόζει και στη συνέχεια να επεμβαίνει στη μαθησιακή διαδικασία με στόχο την βελτιστοποίηση της επίτευξης των σχετικών μαθησιακών αποτελεσμάτων, μέσω κατάλληλων μαθησιακών σεναρίων.

## SUMMARY

Education is of key interest for most of the countries since, it has a significant impact on the society overall. During the last 20 years, mainly due to the advancement of the computers and the significant cost reduction of the related technologies, STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) and educational robotics have gained a lot of attention and became a significant asset in the overall education process of the primary and secondary education. At the same time, Industry 4.0 has led to new tools, mainly software oriented, which applications haven't been properly investigated in other fields apart from the industrial domain. In the context of this work, we focus on Digital twins a key component of Industry 4.0 and we will use it to enhance the educational process in K-12 education. We have developed a detailed digital twin of a prototype Educational Robot (ER) system and we used it, to allow the instructors/teachers to guide and monitor the educational process. This procedure allows the students to maximize the learning outcomes that they achieve.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1      ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	3
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	3
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	3
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ .....	3
2.2.1.ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ .....	3
2.2.2    ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ .....	5
2.2.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ.....	6
2.2.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ .....	9
2. 3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ.....	11
2.3.1 ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ.....	11
2.3.2    ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΣΤΗΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ.....	12
2.3.3    ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ .....	13
2.4.      ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ.....	16
2.4.1    ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	17
2.4.2    ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΒΑΣΕΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	18
2. 5 STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics).....	19
2.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ STEM.....	19
2.5.2. ΤΑ ΟΦΕΛΗ ΤΟΥ STEM .....	20
2.5.3. ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ .....	20
2. 6.      ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΚΑΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ.....	24
2.6.2 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΣΤΗΝ ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	29
Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ STEM HYDRA .....	29

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	29
3.2 HARDWARE ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ STEM HYDRA .....	30
3.2.1 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ .....	30
3.2.2 ΑΡΘΡΩΜΑΤΑ ΕΞΟΔΟΥ (Output Modules).....	32
3.2.3 ΑΡΘΡΩΜΑΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ (Input Modules) .....	35
3.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ STEM HYDRA .....	37
3.3.1 BLOCKS ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ HYDRA .....	37
3.3.2.1 Blocks Εξόδου (Output Blocks) .....	38
3.3.2.2 Blocks Εισόδου (Input Blocks).....	40
3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ .....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	46
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ .	46
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	46
4. 2 ΔΙΚΤΥΑ PETRI.....	46
4.2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	47
4.2.2 ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	47
4.2.3 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	48
4.2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΗΘΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI.....	49
4.2.5 ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ ΜΕΤΑΒΑΣΕΩΝ.....	49
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΔΙΚΤΥΑ PETRI .....	51
4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΗΘΗ ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	53
4.4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ .....	53
4.4.2 ΣΥΝΗΘΗ ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ .....	58
4.4.3 ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	66
4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	88
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ/ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	88

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	88
5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	90

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ψηφιοποίηση στην σύγχρονη εποχή αλλάζει τον κόσμο και τη βιομηχανία μας. Ολοένα και περισσότερα είδη λογισμικών και ψηφιακού εξοπλισμού εισάγονται στον κύκλο ζωής των βιομηχανιών και επιχειρήσεων. Ως αποτέλεσμα, παράγονται τεράστια δεδομένα διαφόρων τύπων. Ωστόσο, αυτά τα δεδομένα δεν ομαδοποιούνται ανάλογα το είδος πληροφόρησης που παρέχουν, οδηγώντας σε χαμηλή απόδοση και χαμηλή χρήση αυτών των πολύτιμων δεδομένων. Η προσομοίωση βασισμένη σε θεωρητικό και στατικό μοντέλο ήταν ένα συμβατικό και ισχυρό εργαλείο για την επαλήθευση, επικύρωση και βελτιστοποίηση ενός συστήματος στο αρχικό του στάδιο σχεδιασμού, αλλά δεν δίνεται προσοχή στην εφαρμογή της προσομοίωσής κατά το χρόνο εκτέλεσης του συστήματος. Με την ανάπτυξη πληροφοριών νέας γενιάς καθώς και ψηφιοποιημένων τεχνολογιών, περισσότερα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν και είναι καιρός να βρούμε έναν τρόπο για την εφαρμογή όλων αυτών των δεδομένων. Εδώ εισάγεται μια νέα τεχνολογία το “digital twin”(ψηφιακό δίδυμο), το οποίο αποτελεί μια από τις ναυαρχίδες της τρέχουσας βιομηχανικής επανάστασης, του λεγόμενου Industry 4.0. Το ψηφιακό δίδυμο έχει δείξει σημαντικές δυνατότητες σε διαφορετικά πεδία, ωστόσο, η ανάπτυξη του και η χρήση του στον τομέα της εκπαίδευσης βρίσκεται ακόμη στα σπάργανα.

Με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών και εργαλείων μάθησης στον τομέα της εκπαίδευσης, διεγείρετε το ενδιαφέρον των μαθητών και οι δυνατότητες μάθησης και εξέλιξης τους πολλαπλασιάζονται. Η προσέγγιση STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) αποτελεί μια καινοτόμα και αποτελεσματική μέθοδο εμπλουτισμού της μαθησιακής διαδικασίας, μέσω πρακτικών δραστηριοτήτων που ενθαρρύνουν και ενεργοποιούν τους μαθητές δημιουργώντας ένα διαδραστικό περιβάλλον όπου μπορούν να διερευνήσουν και να εργαστούν με πολύπλοκα προβλήματα. Τα οφέλη αυτής της προσέγγισης είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς εξελίσσουν την συλλογιστική και κριτική σκέψη, αναπτύσσουν την ικανότητα επίλυσης προβλημάτων και αυξάνουν το κίνητρο για μάθηση.



Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναπτυχθεί ένα ψηφιακό δίδυμο ενός πρωτότυπου πραγματικού συστήματος εκπαιδευτικής ρομποτικής με σκοπό την παρακολούθηση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της βάσει των μαθησιακών αναγκών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εκπαιδευτική πλατφόρμα STEM Hydra, μια εκπαιδευτική πλατφόρμα ρομποτικής χαμηλού κόστους με κατάλληλα διαμορφωμένο υλικό και λογισμικό. Αρχικά μοντελοποιήθηκε η εκπαιδευτική διαδικασία της πλατφόρμας βάσει των αναγκών και των απαιτήσεων που προϋποθέτει, με τη χρήση διαγραμμάτων ροής. Έπειτα για την καλύτερη αξιολόγηση και προσομοίωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν τα συνήθη κα χρονικά δίκτυα Petri, τα οποία διαμορφώθηκαν κατάλληλα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πραγματικού συστήματος με σκοπό την ορθότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι μέσω του ψηφιακού διδύμου που αναπτύσσεται (με τη χρήση των δικτύων Petri) να παρέχει τη δυνατότητα στο διδάσκων να παρακολουθεί, να καταγράφει, να ελέγχει, να αξιολογεί, να αναπροσαρμόζει και στη συνέχεια να επεμβαίνει στη μαθησιακή διαδικασία με στόχο την βελτιστοποίηση της επίτευξης των σχετικών μαθησιακών αποτελεσμάτων, μέσω κατάλληλων μαθησιακών σεναρίων που μπορούν να ελεγχθούν μέσω των δικτύων Petri που έχουν αναπτυχθεί.

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται μια αναλυτική βιβλιογραφική επισκόπηση στην έννοια του ψηφιακού διδύμου, καθώς και στις εφαρμογές του στα διάφορα πεδία που αναπτύσσεται και στην επίδραση που μπορεί να έχει στον τομέα της εκπαίδευσης. Ακόμα γίνεται αναφορά στην έννοια του STEM και τις πλατφόρμες εκπαιδευτική ρομποτικής.

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του hardware και του software της εκπαιδευτικής πλατφόρμας Hydra.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των δικτύων Petri και παρουσιάζονται και αναλύονται τα διαγράμματα ροής και τα δίκτυα Petri της εκπαιδευτικής διαδικασίας που αναπτύχθηκαν, καθώς και κάποια σενάρια υλοποίησης της εκπαιδευτικής διαδικασίας.

Τέλος στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας καθώς και κάποιες σκέψεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

Στο παράρτημα της εργασίας παρατίθενται τα ολοκληρωμένα διαγράμματα των δικτύων Petri που αναπτύχθηκαν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως στόχο να παρουσιάσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της έννοιας των ψηφιακών διδύμων και να τα αναλύσει από την άποψη των εννοιών, των τεχνολογιών και των βιομηχανικών και όχι μόνο εφαρμογών τους, αλλά και να αναδείξει την επίδραση που μπορεί να έχουν στον τομέα της εκπαίδευσης. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) και τα οφέλη τού στην εκπαιδευτική διαδικασία.

### 2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

#### 2.2.1.ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

Η ψηφιοποίηση στην σύγχρονη εποχή, έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες αλλαγές στη καθημερινότητα και κατ'επέκταση στη βιομηχανία. Ολοένα και περισσότερα είδη λογισμικών και ψηφιακού εξοπλισμού εισάγονται στον κύκλο ζωής των βιομηχανιών και επιχειρήσεων. Ως αποτέλεσμα, παράγεται μεγάλος όγκος δεδομένων διαφόρων τύπων. Ωστόσο, αυτά τα δεδομένα, συνήθως, δεν ομαδοποιούνται ανάλογα με το είδος της πληροφόρησης που παρέχουν, οδηγώντας σε χαμηλή απόδοση και χαμηλό επίπεδο χρήσης τους. Παράλληλα, η προσομοίωση συστημάτων, βασισμένη σε θεωρητικά και στατικά μοντέλα είναι ένα συμβατικό και ισχυρό εργαλείο για την επαλήθευση, επικύρωση και βελτιστοποίηση ενός συστήματος στο αρχικό του στάδιο σχεδιασμού, αλλά δεν δίνεται η αντίστοιχη προσοχή στη μεταφορά και εφαρμογή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης κατά το χρόνο εκτέλεσης του συστήματος.

Με την ανάπτυξη πληροφοριών νέας γενιάς καθώς και ψηφιοποιημένων τεχνολογιών, περισσότερα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν και κύριας σημασίας είναι ο τρόπος με τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα αυτά.

Τα παραπάνω συνέβαλαν στην ανάπτυξη ενός νέου όρου το “Ψηφιακό Δίδυμο” (Digital Twin), και σχετίζεται άμεσα με τις τρέχουσες εξελίξεις και το μετασχηματισμό της παραγωγικής διαδικασίας που είναι γνωστός ως “Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση” (Industry 4.0). Το ψηφιακό δίδυμο σαν προσέγγιση είναι πολλά υποσχόμενη και με πολλές ενδιαφέρουσες δηνυτικές εφαρμογές.

Οι λόγοι που ώθησαν την ανάπτυξη της έννοιας του ψηφιακού διδύμου, στηρίζονται στις εν γένει αδυναμίες της κλασσικής προσέγγισης της προσομοίωσης συστημάτων και διαδικασιών. Κατά τη δεκαετία του 1960, η προσομοίωση περιορίστηκε σε πολύ συγκεκριμένα θέματα μόνο από ειδικούς όπως μηχανικούς. Μετά το 1985, χρησιμοποιήθηκε η προσομοίωση ως βασική μέθοδος και εργαλείο για την επίλυση κάποιου συγκεκριμένου σχεδιαστικού ή/και μηχανικού προβλήματος. Στη συνέχεια, περίπου στο 2000 ξεκίνησε ο σχεδιασμός συστήματος με βάση την προσομοίωση, μια γενική μεθοδολογία για «Πολυεπίπεδα και πολυτομεακά συστήματα» που έχουν μεγαλύτερες λειτουργικές ποικιλίες και εφαρμογές. Το διαστημικό πρόγραμμα Apollo της NASA ήταν το πρώτο πρόγραμμα που χρησιμοποίησε την έννοια «δίδυμο». Το πρόγραμμα δημιούργησε δύο πανομοιότυπα διαστημικά οχήματα, έτσι ώστε αυτό που βρισκόταν στη γη να αντικατοπτρίζει, να προσομοιώνει και να προβλέπει τις συνθήκες του άλλου στο διάστημα. Το όχημα που παρέμεινε στη γη ήταν το δίδυμο του οχήματος που εκτέλεσε αποστολή στο διάστημα.

Η πρώτη χρήση της ορολογίας «ψηφιακό δίδυμο» εμφανίστηκε στη μελέτη των Hernández και Hernández's [1]. Το Digital Twin (DT) χρησιμοποιήθηκε για επαναλαμβανόμενες τροποποιήσεις στο σχεδιασμό αστικών οδικών δικτύων. Ωστόσο, αναγνωρίζεται ευρέως ότι η ορολογία εισήχθη για πρώτη φορά ως «ψηφιακό ισοδύναμο με ένα φυσικό προϊόν» από τον Michael Grieves στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν το 2003 [2]. Μια εναλλακτική έννοια είναι αυτή του «προϊόντος avatar», που εισήχθη από τους Hribernik et al. το 2006 [3]. Η έννοια του avatar προϊόντος αποσκοπούσε στην οικοδόμηση της αρχιτεκτονικής της διαχείρισης πληροφοριών, που υποστηρίζει μια αμφίδρομη ροή πληροφοριών, από την επικεντρωμένη στο προϊόν προοπτική, ωστόσο από το 2015 και μετά ο όρος αυτός έχει αντικατασταθεί από το ψηφιακό δίδυμο.

Ο αρχικός ορισμός του ψηφιακού διδύμου δόθηκε από τη NASA και έκτοτε αποτελεί βασικό κομμάτι στην αεροδιαστημική [4]. Το 2014, ο Michael Grieves δημοσίευσε ένα άρθρο για να αναλύσει περαιτέρω την έννοια [2]. Το 2017, η εταιρεία Gartner καταχώρισε το ψηφιακό δίδυμο ως 5<sup>η</sup> από τις 10 κορυφαίες στρατηγικές τεχνολογικές τάσεις, προβλέποντας ότι δισεκατομμύρια πράγματα θα έχουν ψηφιακές δίδυμες αναπαραστάσεις εντός τριών έως πέντε ετών [5]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Gartner δεν είχε υπολογίσει την επιρροή-εισαγωγή της ιδέας στο κατασκευαστικό τομέα. Στα επόμενα δύο χρόνια, η Gartner συνέχισε να καταγράφει το ψηφιακό δίδυμο στη 4η θέση από τις 10 κορυφαίες τάσεις στρατηγικής τεχνολογίας [6, 7].

Η ιδέα του ψηφιακού δίδυμου ήταν περιγραφική και δεν διέθετε βοηθητικές τεχνολογίες όταν προτάθηκε για πρώτη φορά. Ωστόσο, η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών πληροφοριών προετοιμάζει την άνοδο του ψηφιακού δίδυμου. Ο αριθμός των αποτελεσμάτων που αναζητούν το «ψηφιακό δίδυμο» σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων δείχνει μια τεράστια άνοδο, διεγείροντας όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον τόσο στη βιομηχανία όσο και στον ακαδημαϊκό χώρο, ειδικά μετά το 2015.

### 2.2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

Παρά τις συνεχείς εξελίξεις και βελτιώσεις πάνω στην έρευνα για το ψηφιακό δίδυμο μέχρι σήμερα δεν υπάρχει ένας ευρέως αποδεκτός τυποποιημένος ορισμός για αυτό. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές περιγραφές για ένα ψηφιακό δίδυμο που διαφέρουν ανάλογα με το σκοπό και το πεδίο εφαρμογής. Οι συγκριτικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους Martinez *et al.* [8] και βασίζεται στο επιχειρηματικό μοντέλο CANVAS δείχνει σαφείς διαφορές στην ερμηνεία της έννοιας του ψηφιακού δίδυμου και της χρήσης του ως ένα επιχειρηματικό μοντέλο. Ένας γενικός ορισμός για το ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε να διατυπωθεί ως *μια ενσωματωμένη πολυ-φυσική, πολλαπλής κλίμακας, πιθανή προσομοίωση ενός συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις, αισθητήρες κ.λπ., για να αντικατοπτρίζουν τη διάρκεια ζωής του αντίστοιχου δίδυμου*. Απλούστερα το ψηφιακό δίδυμο ορίζεται ως *η ψηφιακή εικόνα ενός φυσικού αντικειμένου από το πραγματικό κόσμο*. Αυτό το ακριβές αντίγραφο περιέχει όλες τις ιδιότητες, πληροφορίες και καταστάσεις του πραγματικού αντικειμένου. Ξεκινώντας ως μια προσέγγιση με υψηλό εμπορικό αντίκτυπο η προστιθέμενη αξία του ψηφιακού δίδυμου έγινε σημαντικά υψηλότερη, και έτσι κέρδισε όλο και περισσότερη προσοχή και σημασία σε πολλές εταιρείες και βιομηχανίες. Με το ψηφιακό δίδυμο, ένα πραγματικό αντικείμενο έχει μια ψηφιακή εικόνα που αποτελείται από διαφορετικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά έχουν πέντε βασικές λειτουργίες [9]:

- ⇒ Αναπαράγουν με ακρίβεια τις ιδιότητες, τη συμπεριφορά και κανόνες του φυσικού αντικειμένου για τη δημιουργία μιας ακριβούς εικόνας.
- ⇒ Αυτόνομη λειτουργία των μοντέλων με την προσομοίωση των διαφορετικών συμπεριφορών του αντικειμένου, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ως οδηγίες για τη λειτουργία του φυσικού αντικειμένου.
- ⇒ Απομακρυσμένη παρακολούθηση των περιουσιακών στοιχείων.
- ⇒ Ικανότητα πρόβλεψης προβλημάτων πριν εμφανιστούν.
- ⇒ Επικύρωση της απόδοσης πριν το προϊόν να έχει τελειώσει.

Η ροή δεδομένων μεταξύ των συστατικών του ψηφιακού δίδυμου διασφαλίζει ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να λειτουργεί συνεχώς. Σε αντίθεση με τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες, επίσης περιλαμβάνουν στοιχεία από προσομοιώσεις

και άλλες γνώσεις που σχετίζονται με το φυσικό αντικείμενο. Οι συνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων είναι απαραίτητες ώστε να επιτρέπουν τις αλληλεπιδράσεις όλων των στοιχείων του ψηφιακού δίδυμου. Αύτες οι συνδέσεις κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες:

- ⇒ συνδέσεις σε φυσικό χώρο
- ⇒ συνδέσεις σε εικονικό χώρο
- ⇒ συνδέσεις μεταξύ εικονικού και φυσικού χώρου

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του ψηφιακού δίδυμου δίνουν την δυνατότητα για επαναληπτικές αλλαγές και βελτιστοποιήσεις [9]. Διά μέσου των υπηρεσιών, των λειτουργιών και των πληροφοριών του ψηφιακού δίδυμου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα πρόσβασης στις πληροφορίες και λειτουργίες εύκολα και χωρίς προηγούμενη γνώση. Όλα τα σχετικά δεδομένα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ρέουν στο ψηφιακό δίδυμο και το εξελίσσουν συνεχώς [10].

### 2.2.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

Με την πάροδο των ετών από την εισαγωγή της ιδέας του ψηφιακού δίδυμου παρατηρείται μια συνεχή εννοιολογική αναθεώρηση. Τα προηγούμενα χρόνια το ψηφιακό δίδυμο οριζόταν στις περισσότερες έρευνες ως μοντέλο υψηλής πιστότητας ή πολυεπιστημονική προσομοίωση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σύνδεση σε πραγματικό χρόνο με το φυσικό αντικείμενο. Με την εμβάθυνση αυτών των ερευνών πολλοί ερευνητές άρχισαν να αποδίδουν σημασία στη δυναμική και αμφίδρομη χαρτογράφηση του φυσικού αντικειμένου. Ωστόσο, οι περισσότεροι δεν διέκριναν το DT από το γενικά υπολογιστικά μοντέλα και προσομοιώσεις.

Ο Zheng et al. [11], συζήτησε την έννοια και τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού δίδυμο από όλες τις πλευρές. Το προτεινόμενο πλαίσιο εφαρμογής αποτελείται από τρία μέρη: φυσικό χώρο, εικονικό χώρο και επίπεδο επεξεργασίας πληροφοριών. Στη διαδικασία εφαρμογής του, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εφαρμόσει χαρτογράφηση συστήματος πλήρους κλίμακας, δυναμική μοντελοποίηση σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής και βελτιστοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο. Οι Grieves and Vickers [12] όρισαν δύο τύπους ψηφιακών διδύμων: το ψηφιακό δίδυμο πρωτότυπο (DTP: Digital Twin Prototype) και το ψηφιακό διπλό στιγμιότυπο (DTI: Digital Twin Instance) τα οποία βρίσκονταν σε περιβάλλον ψηφιακού δίδυμου (DTE: Digital Twin Environment).

Οι Schluse και Rossmann [13] πρότειναν μια νέα ιδέα του "Experimentable Digital Twins" και περιέγραψαν πώς αυτό μπορεί να εκτελέσει το κύριο μέρος των διαδικασιών ανάπτυξης που βασίζεται σε προσομοίωση για απλοποίηση των διαδικασιών, ενεργοποίηση λεπτομερών προσομοιώσεων σε επίπεδο συστήματος και εφαρμογή

έξυπνων συστημάτων. Ο Madni et al. [14] συζήτησε τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού ψηφιακών διδύμων με το IoT (Internet of Things) και το σύστημα προσομοίωσης για την υποστήριξη βασισμένων σε μοντέλα συστημάτων μηχανικής (MBSE: Model-based System Engineering). Τέσσερα επίπεδα εικονικής αναπαράστασης ορίστηκαν, δηλαδή προ-ψηφιακό δίδυμο, ψηφιακό δίδυμο, προσαρμοστικό ψηφιακό δίδυμο, έξυπνο ψηφιακό δίδυμο. Ο Ullah [15] πρότεινε τρεις τύπους ψηφιακών διδύμων: δίδυμα αντικειμένων, δίδυμα διεργασίας, δίδυμα φαινομένων.

Η βασική ιδέα του ψηφιακού διδύμου είναι απλή, συνδέει το φυσικό και το ψηφιακό αντικείμενο με τρόπο ακριβή και σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η αρχική αρχιτεκτονική. Έχουν προταθεί πολλά ψηφιακά εννοιολογικά μοντέλα. Ο Stark et al. [16] ανέπτυξε ένα ψηφιακό δίδυμο μοντέλο 8 διαστάσεων για να σχεδιάσει το όριο και τον τύπο του DT. Τέσσερις διαστάσεις αντιπροσωπεύουν τη ποικιλία ικανοτήτων συμπεριφοράς του, ενώ οι άλλες τέσσερις αντιπροσωπεύουν τη περιοχή του περιβάλλοντος και πλαισίου του. Το μοντέλο ψηφιακού διδύμου που παρουσιάστηκε από τον Grieves [2] περιείχε τρία κύρια μέρη: φυσικά προϊόντα, εικονικά προϊόντα και τις συνδέσεις δεδομένων και πληροφοριών τους. Ο Schleich et al. [17] ανέφερε τις δυνατότητες του μοντέλου αναφοράς ψηφιακού διδύμου όπως διαλειτουργικότητα, επεκτασιμότητα και πιστότητα. Απευθύνθηκε επίσης στις διαφορετικές λειτουργίες αυτού του μοντέλου αναφοράς κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος, όπως μετατροπή, αξιολόγηση, σύνθεση και αποσύνθεση. Ο Tao et al. [18, 19] παρουσίασε ένα ψηφιακό διπλό μοντέλο πέντε διαστάσεων, το οποίο περιλάμβανε φυσική οντότητα, εικονική οντότητα, υπηρεσίες, δεδομένα ψηφιακού διδύμου και σύνδεση.

Πολλά ερευνητικά έργα συζήτησαν την έννοια και τον ορισμό του ψηφιακού διδύμου. Η έννοια εξηγείται από διαφορετικές προοπτικές και κάθε εξήγηση έχει νόημα. Ωστόσο, καμία από τις εξηγήσεις δεν μπορεί να αποδειχθεί καλύτερη από τις υπόλοιπες. Μέσω ανάλυσης, συνάγεται ένα συμπέρασμα ότι το DT είναι μια ψηφιακή οντότητα που αντικατοπτρίζει τον κανόνα συμπεριφοράς της φυσικής οντότητας και συνεχίζει να ενημερώνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Το συμπέρασμα είναι τόσο γενικό όσο και διαφορούμενο, αλλά αυτός είναι ο πυρήνας της ψηφιακής έννοιας.

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαφορετικοί ορισμοί που έχουν δοθεί στην έννοια του DT, και μέσω αυτών είναι δυνατόν να δούμε την εξέλιξη της. Όπως παρατηρείται σε αυτόν αρχικά ο ορισμός του ψηφιακού διδύμου εστίαζε μόνο στο τομέα της αεροδιαστημικής και λογιζόταν ως ένα αντίγραφο ακρίβειας. Στη συνέχεια δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη σύνδεση του με το φυσικό αντικείμενο σε πραγματικό χρόνο και τη δυνατότητα αναπαραγωγής όλων των συμπεριφορών και λειτουργιών του σε ολόκληρη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Δημοσίευση	Έτος	Ορισμός του ψηφιακού δίδυμου
[20]	2010	Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια ολοκληρωμένη πολύ-φυσική, πολύ-κλιμακωτή, πιθανοτική προσομοίωση ενός οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, ιστορικά δεδομένα ,κ.λπ., για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του ιπτάμενου δίδυμου.
[21]	2014	Το ψηφιακό δίδυμο είναι ένα πρότυπο διαχείρισης ζωής και πιστοποίησης, σύμφωνα με το οποίο τα μοντέλα και οι προσομοιώσεις αποτελούνται από τη κατάσταση του κατασκευασμένου οχήματος, έμπειρα φορτία και περιβάλλοντα και το ιστορικό συγκεκριμένων οχημάτων που επιτρέπει τη μοντελοποίηση υψηλής πιστότητας μεμονωμένων αεροδιαστημικών οχημάτων καθ 'όλη τη διάρκεια ζωής τους.
[22]	2015	Πολύ ρεαλιστικά μοντέλα της τρέχουσας κατάστασης της διαδικασίας και των συμπεριφορών τους σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους στον πραγματικό κόσμο - αποκαλείται «Ψηφιακό Δίδυμο».
[23]	2016	Τα ψηφιακά δίδυμα είναι εικονικά υποκατάστατα αντικειμένων πραγματικού κόσμου που αποτελούνται από εικονικές αναπαραστάσεις και δυνατότητες επικοινωνίας συνθέτοντας έξυπνα αντικείμενα που λειτουργούν ως ευφυείς κόμβοι στο Διαδίκτυο των πραγμάτων και υπηρεσιών.
[24]	2017	Ο όρος ψηφιακό δίδυμο μπορεί να περιγραφεί ως ψηφιακό αντίγραφο πραγματικού εργοστασίου, μηχανήματος, εργαζομένου κ.λπ., που δημιουργείται και μπορεί να επεκταθεί ανεξάρτητα, να ενημερώνεται αυτόματα καθώς και να είναι διαθέσιμο σε παγκόσμιο επίπεδο σε πραγματικό χρόνο.
[25]	2017	Ταχύτεροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, αυξημένη ισχύ υπολογιστών και ποσότητα διαθέσιμων δεδομένων, μπορούν να αξιοποιήσουν την περιοχή προσομοίωσης προς έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και βελτιστοποίηση προϊόντων και συστημάτων παραγωγής - μια έννοια που συχνά αναφέρεται ως «Ψηφιακό Δίδυμο».
[26]	2017	Είναι ένα σύνολο εικονικά κατασκευασμένων πληροφοριών που περιγράφουν πλήρως ένα πιθανό ή πραγματικό φυσικό κατασκευασμένο προϊόν από το μικροατομικό επίπεδο έως το μακρογεωμετρικό επίπεδο.
[27]	2018	Τα ψηφιακά δίδυμα αντιπροσωπεύουν ένα συγκεκριμένο πρότυπο μηχανικής, όπου τα μεμονωμένα φυσικά αντικείμενα συνδυάζονται με το ψηφιακό μοντέλο που αντικατοπτρίζει δυναμικά την κατάσταση αυτών των αντικειμένων.
[28]	2018	Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα εικονικό αντίγραφο ένα προς ένα, ενός «τεχνικού περιουσιακού στοιχείου» (π.χ. μηχανή, στοιχείο και μέρος του περιβάλλοντος).
[29]	2018	Το ψηφιακό διπλό μοντέλο είναι ένα ακριβές και σε πραγματικό χρόνο, κυβερνητικό αντίγραφο ενός φυσικού συστήματος κατασκευής που αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά όλες τις λειτουργίες του.

Δημοσίευση	Έτος	Ορισμός του ψηφιακού δίδυμου
[30]	2018	Είναι ένα ψηφιακό μοντέλο, πολλαπλών τομέων και εξαιρετικά υψηλής πιστότητας που ενσωματώνει διαφορετικά θέματα όπως θέματα μηχανικής, ηλεκτρικής, υδραυλικής και ελέγχου.
[31]	2018	Το ψηφιακό δίδυμο αντιπροσωπεύει ένα δυναμικό ψηφιακό αντίγραφο φυσικών περιουσιακών στοιχείων, διαδικασιών και συστημάτων, το οποίο παρακολουθεί διεξοδικά ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.
[32]	2018	Αυτή η πλούσια ψηφιακή αναπαράσταση πραγματικών αντικειμένων/θεμάτων και διαδικασιών, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων που μεταδίδονται από αισθητήρες, είναι γνωστή ως το ψηφιακό δίδυμο μοντέλο.
[33]	2018	Το ψηφιακό δίδυμο είναι ουσιαστικά ένα μοναδικό ζωντανό μοντέλο του φυσικού συστήματος με την υποστήριξη τεχνολογιών ενεργοποίησης, όπως προσομοίωση πολλαπλών φυσικών, μηχανική μάθηση, AR / VR και υπηρεσία cloud, κ.λπ.
[34-36]	2018	Το BIM (Building Information Model) είναι ψηφιακό δίδυμο.
[37]	2018	Το ψηφιακό δίδυμο είναι μια δυναμική αναπαράσταση των φυσικών οντοτήτων με τις λειτουργίες, τις συμπεριφορές και τους κανόνες τους.
[38]	2019	Η πρόσβαση σε ρεαλιστικά μοντέλα της τρέχουσας κατάστασης της διαδικασίας και των συμπεριφορών τους σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους στον πραγματικό κόσμο ονομάζεται «Ψηφιακό δίδυμο».
[39]	2019	Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική παρουσία ενός φυσικού συστήματος (δίδυμο) που ενημερώνεται συνεχώς με τα δεδομένα απόδοσης, συντήρησης και κατάστασης υγείας του τελευταίου σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του φυσικού συστήματος.
[40]	2019	Το ψηφιακό δίδυμο αναφέρεται σε ένα εικονικό αντικείμενο ή ένα σύνολο εικονικών πραγμάτων που ορίζονται στον ψηφιακό εικονικό χώρο, το οποίο έχει σχέση χαρτογράφησης με πραγματικά πράγματα στον φυσικό χώρο.
[41]	2019	Το ψηφιακό δίδυμο ορίζεται ως ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός φυσικού στοιχείου, συλλέγοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από το στοιχείο και αντλώντας πληροφορίες που δεν μετριώνται απευθείας σε αυτό.
[42]	2019	Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να θεωρηθεί ως παράδειγμα μέσω του οποίου επιλεγμένες διαδικτυακές μετρήσεις εξομοιώνονται δυναμικά στον κόσμο της προσομοίωσης, με το τρέχον μοντέλο προσομοίωσης να καθοδηγεί τον πραγματικό κόσμο προσαρμοστικά αντίστροφα.

#### 2.2.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια ακριβής εικόνα ενός πραγματικού συστήματος με το ψηφιακό δίδυμο, είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες



σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό εκτός από γεωμετρικά και προσομοιωτικά μοντέλα και επιπλέον των περιβαλλοντικών συνθηκών και των δεδομένων από τα αισθητήρια, περιλαμβάνει δεδομένα όπως οι λειτουργικές ρυθμίσεις, πληροφορίες επιθεώρησης και συντήρησης. Οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εμφάνιση των σχέσεων μεταξύ μεμονωμένων εξαρτημάτων και συστημάτων. Τα δεδομένα πρέπει να μεταδίδονται συνεχώς στο ψηφιακό δίδυμο ώστε να αναπαρασταθεί μια ενημερωμένη εικόνα [43]. Τα συλλεγόμενα δεδομένα πρέπει να αποθηκευτούν, διαχειριστούν και μετατραπούν σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αλγόριθμους ή προσομοιώσεις. Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν γενικά αποδεκτά πρότυπα και προδιαγραφές. Επομένως, εξακολουθεί να είναι μεγάλη πρόκληση να συνδυαστούν τα δεδομένα από διαφορετικές πηγές με διαφορετικές διεπαφές και μορφές δεδομένων σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο [9].

Προκειμένου να εκπληρωθεί η συνεχής μετάδοση των δεδομένων, απαιτείται μια υποδομή που επιτρέπει σε πραγματικό χρόνο την αλληλεπίδραση μεταξύ εικονικής αναπαράστασης και φυσικού αντικειμένου. Αυτή η υποδομή περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, σύνδεση στο διαδίκτυο και ταχύτητα καθώς και αισθητήρες και ενσωματωμένα συστήματα. Με την υποδομή αυτή, πρέπει να είναι δυνατή η πραγματική μετάδοση και επεξεργασία πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

Εκτός από την απαιτούμενη υποδομή για την ανάπτυξη και λειτουργία ενός ψηφιακού δίδυμου, απαιτείται χρόνος για τη δημιουργία των διάφορων μοντέλων υψηλής ανάλυσης με το υπάρχον υλικό και λογισμικό. Το κόστος και η προσπάθεια πρέπει να είναι συγκρίσιμη με τα οφέλη του ψηφιακού δίδυμου [9]. Ένα ψηφιακό δίδυμο πρέπει επίσης να είναι προσαρμόσιμο. Αυτό σημαίνει ότι εάν κάτι αλλάζει στο ίδιο το αντικείμενο ή στο περιβάλλον ή στις συνθήκες λειτουργίας, αυτές πρέπει να προσαρμόζονται στο ψηφιακό δίδυμο μέσω των παραμέτρων του μοντέλου χωρίς μεγάλη προσπάθεια. Εάν μεμονωμένα εξαρτήματα ή συστήματα αντικαθίστανται κατά τη συντήρηση, αυτές οι πληροφορίες πρέπει να αποθηκεύονται στο ψηφιακό δίδυμο και στα μοντέλα προσαρμοσμένα στα νέα δεδομένα [9]. Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι πάντα μοναδικό, αναφέρεται ακριβώς σε ένα αντικείμενο στον πραγματικό κόσμο και συλλέγει δεδομένα για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του ενός αντικειμένου και όχι πολλών. Ωστόσο, μπορεί να μάθει από άλλα ψηφιακά δίδυμα του ίδιου αντικειμένου και επομένως οι εμπειρίες των υπολοίπων ψηφιακών δίδυμων μπορούν να είναι επεκτάσιμες σε ένα. Συγκρίσεις μπορούν να γίνουν μεταξύ ενός ψηφιακού δίδυμου.

Αν σε ένα ψηφιακό δίδυμο παρουσιάζεται δυσλειτουργία, η αιτία του προβλήματος καθώς και οι λύσεις σε αυτό το πρόβλημα μπορούν να προσδιοριστούν ευκολότερα από παρόμοιες περιπτώσεις σε άλλο προϊόν. Εκτός από τα φυσικά μοντέλα, η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και οι τεχνολογίες μηχανικής μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το ψηφιακό δίδυμο. Χρησιμοποιώντας την AI, τα μοτίβα στα δεδομένα μπορούν να

αναγνωριστούν και πιθανές διαταραχές ή ανωμαλίες μπορούν να εντοπιστούν. Αυτά τα διαφορετικά φυσικά και αναλυτικά μοντέλα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους άλλα και να ανταλλάσσουν δεδομένα για να πραγματοποιήσουν μια εικόνα που είναι πάντα ενημερωμένη [9]. Οι διεπαφές χρήστη δημιουργούνται για αλληλεπίδραση με το ψηφιακό δίδυμο. Αυτές οι διεπαφές χρήστη πρέπει να είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζονται στον χρήστη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ή άλλων αναλύσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνει τις απαιτούμενες πληροφορίες και να μπορεί να πραγματοποιήσει τις απαιτούμενες ενέργειες χωρίς προγενέστερη γνώση. Πρέπει όμως να γίνει διάκριση μεταξύ των διαφόρων ομάδων χρηστών και για κάθε μία πρέπει να παρέχεται μια μοναδική διεπαφή, καθώς αν υπήρχε μόνο μια για όλες τις ομάδες χρηστών τότε θα οδηγούμασταν στην υπερφόρτωση της με πολλές πληροφορίες. Κατά συνέπεια, κάθε χρήστης χρειάζεται μια διεπαφή που να του παρέχει τα σχετικά δεδομένα και πληροφορίες για μια συγκεκριμένη εργασία [9]. Πέραν των απαιτήσεων που πώς πρέπει να πληρούνται, σημαντικό ρόλο έχει η ασφάλεια του ψηφιακού διδύμου. Δεδομένου ότι έχει όλα τα τρέχοντα και ιστορικά δεδομένα και μοντέλα του αντικειμένου. Η προστασία από ανεπιθύμητη πρόσβαση ή/και κακόβουλες ενέργειες είναι απαραίτητη. Η ύπαρξη διαφορετικών προφίλ για διαφορετικές ομάδες χρηστών είναι αναγκαία, έτσι ώστε όλοι να λαμβάνουν μόνο τις πληροφορίες που χρειάζονται και πρέπει να λάβουν.

## **2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ**

### **2.3.1 ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ**

Στην αεροδιαστημική, οι προσομοιώσεις αναπαράγουν το συνεχές χρονικό ιστορικό των πτήσεων, παράγοντας τεράστια ποσότητα δεδομένων προκειμένου να γίνει αναγνώριση των διαφορετικών καταστάσεων όπου έχει υποβληθεί το αεροσκάφος και να προβάλει τις προσεχείς απαιτήσεις συντήρησης και επιδιόρθωσης – επισκευής χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές προσομοίωσης, βασισμένες σε εφαρμογές όπως Computational Fluid Dynamics (CFD), Computer-Aided Engineering (CAE), μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και προσομοίωση Monte Carlo [44, 45, 46, 47, 48, 49]. Ορισμένοι ερευνητές, βασίζονται στη προσέγγιση ότι, η προσομοίωση πρέπει να σχετίζεται με τους ενσωματωμένους αισθητήρες και συσκευές για τη ρύθμιση μιας συνεχής εναρμόνισης κατά μήκος των επίγειων προσομοιώσεων [48]. Από την άποψη της αεροδιαστημικής, το DT μπορεί να οριστεί ως εργαλείο ολοκλήρωσης, για μια ρεαλιστική προσομοίωση υψηλού επιπέδου με μια πλατφόρμα παρακολούθησης της κατάστασης του οχήματος, που έχει όλα τα είδη προηγούμενων δεδομένων (όπως συντήρηση και στόλος) προκειμένου να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια το σύνολο της ζωής ως ένα ιπτάμενο δίδυμο που βοηθά να διευκολυνθεί η μεγάλη εμπιστοσύνη σε αυτό και σε ασφαλή επίπεδα [50]. Το DT είναι εξαιρετικά ακριβές και πρακτικό, καθώς μπορεί να

εξεταστεί για οποιοδήποτε σύστημα και υποσύστημα οχήματος (π.χ. ένα αεροπλάνο), υποστήριξη ζωής, ενέργεια, αποθήκευση και πρόωση, θερμική προστασία, αεροηλεκτρονικά και πολλά περισσότερα. Επιπλέον, το DT ενθαρρύνει την ενσωμάτωση τεχνικών επεξεργασίας υλικών με το σχεδιασμό τους, καθώς οι δυσλειτουργίες κατασκευής ενδέχεται να επηρεάσουν σοβαρά το όχημα.

Με τη βοήθεια ψηφιακών διδύμων, μπορεί να γίνει προληπτική και προβλέψιμη συντήρηση για να αυξηθεί η διαθεσιμότητα και η αποδοτικότητα της πλατφόρμας, να επεκταθεί ο ωφέλιμος κύκλος ζωής και να μειωθεί το κόστος. Επιπλέον, αυτά τα ψηφιακά δίδυμα είναι ικανά να μετριάσουν τη ζημιά, ενεργοποιώντας μηχανισμούς αυτοθεραπείας ή προτείνοντας αλλαγές στο προφίλ αποστολής για μείωση των φορτίων, αυξάνοντας έτσι τόσο τη διάρκεια ζωής όσο και την πιθανότητα επιτυχίας της αποστολής.

Ένα ψηφιακό δίδυμο καθιστά δυνατή την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής του στοιχείου με υψηλό επίπεδο ακρίβειας. Για παράδειγμα, σε ένα ψηφιακό δίδυμο ενός δομικού στοιχείου όπως είναι ένα γρανάζι προσγείωσης, οι αισθητήρες τοποθετούνται σε τυπικά σημεία αστοχίας παρακολουθώντας την υδραυλική πίεση και θερμοκρασία φρένου. Αυτό διασφαλίζει ότι το ψηφιακό δίδυμο λαμβάνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από αυτά τα σημεία, που βοηθούν στην πρόβλεψη πιθανής πρόωρης δυσλειτουργίας. Επιπλέον, βοηθά στον προσδιορισμό του υπολειπόμενου κύκλου ζωής του εργαλείου προσγείωσης.

### 2.3.2 ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΣΤΗΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ

Στη ρομποτική, η προσομοίωση αφορά κυρίως την εικονική ανάθεση εργασιών για τη βελτίωση των αλγορίθμων ελέγχου για ρομπότ, κατά τη διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης [51, 13]. Η προσομοίωση είναι η πιο αποτελεσματική πηγή πληροφοριών της ρομποτικής για την προετοιμασία στρατηγικών σχεδίων, προβλέψεων, κλίμακας και μετρήσεων καθώς και δοκιμών για διάφορα περιβάλλοντα με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης σε σχέση με το κόστος και το χρόνο. Οι προσεγγίσεις για την προσομοίωση ρομπότ βασίζονται σε κινηματική και δυναμική του σώματος. Υπάρχουν αρκετά λογισμικά προσομοίωσης είναι διαθέσιμα για εμπορικούς σκοπούς, ενδεικτικά: (1) Το GAZEBO και V-REP επικεντρώθηκαν σε αισθητήρες και συστήματα συναρμολόγησης με βάση την εικόνα, (2) ROBOTRAN, ένα λογισμικό βασισμένο στη φυσική για μοντελοποίηση και ανάλυση συστημάτων πολλαπλών σωμάτων και (3) ROBCAD, που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και βελτιστοποίηση συστήματος συναρμολόγησης, «ρομποτικού» εργοστασίου και αισθητήρων και δημιουργήθηκε από τη SIMSOL σε συνεργασία με το SIEMENS.

Το Virtual Testbeds (VT) ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα, δωρεάν διαθέσιμο που μπορεί να συνδέσει διαφορετικά προγράμματα προσομοίωσης (EnergyPlus, Modelica,

Radiance, MATLAB / Simulink) για συν-προσομοίωση και το DT κατευθύνονται προς ένα «πειραματικό DT», το οποίο είναι μια ανάπτυξη-λειτουργία ενός συστήματος που βασίζεται σε προσομοίωση. Η προσέγγιση με βάση τη δοκιμή είναι πολύ χρήσιμη για τη βελτίωση των παραδοσιακών μεθόδων προσομοίωσης. Το VT διευκολύνει την αξιολόγηση του πλήρους τεχνικού συστήματος στη φύση του. Ωστόσο, μια κανονική τεχνική προσομοίωσης αναλύει μόνο λίγα στοιχεία και χαρακτηριστικά μιας εφαρμογής. Έτσι, τα VT είναι κατάλληλα για να ενσωματώσουν τα DT. Για τη ρομποτική, υπάρχει ανάγκη μιας αυτόνομης και ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής 3D προσομοίωσης προκειμένου να εφαρμοστούν όλες οι μέθοδοι. Σε αυτήν την κατεύθυνση, οι Schluse και Rossmann [13] παρουσίασαν το MATLAB / Simulink, μια εικονική προσομοίωση σε επίπεδο συστήματος κατά τη σχεδίαση. Οι συγγραφείς έδειξαν εφαρμογές για συντήρηση σε κατάσταση λειτουργίας εντοπισμό δασικών μηχανημάτων, συστήματα υποστήριξης οδηγού και βιομηχανικών αυτοματισμών. Η προτεινόμενη προσέγγιση είναι ικανή να ενσωματώνει σχεδόν οποιοδήποτε είδος προσομοίωσης. Έχουν προσομοιώσει τον μικρό πυρήνα που ονομάζεται «Βάση δεδομένων ευέλικτης προσομοίωσης» - VSD, μια βάση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που έχει μια μορφή βασικού μοντέλου προσομοίωσης.

Η αντιστοίχιση-σύνδεση των εξαρτημάτων είναι ένα σημαντικό βήμα παραγωγής σε αυτοματοποιημένες γραμμές συναρμολόγησης. Σε ένα πρόβλημα κατασκευής μπορούν να μειωθούν αισθητά τυχόν προβλήματα μέσω της συναρμολόγησης σε πραγματικό χρόνο. Όταν κάποια εξαρτήματα είναι ήδη συνδεδεμένα μεταξύ τους, μπορεί να προκληθεί εμπλοκή, με αποτέλεσμα την αποτυχία συναρμολόγησης ή ζημιά στα ανταλλακτικά, στο ρομπότ ή στο περιβάλλον του. Επομένως, εγγενώς απαιτείται ασφαλές περιβάλλον για την ανάπτυξη και τη δοκιμή νέων αλγορίθμων. Ο Grinshpun et al. [51] πρότεινε ένα «εικονικό περιβάλλον και ρομποτική προσομοίωση» - το VEROSIM που είναι βασισμένο σε DT για εφαρμογή και βελτιστοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου ρομπότ. Παρουσίασε μια ροή εργασίας για την ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου μέσω ενός VT. Αρχικά, είχαν δημιουργήσει μια εικονική ρύθμιση για δοκιμή και βελτιστοποίηση του αλγορίθμου στην προσομοίωση. Αυτή η ρύθμιση περιλαμβάνει ένα DT του φυσικού χειριστή και ένα εικονικό περιβάλλον προσανατολισμένο στην εφαρμογή για τη λειτουργία του. Έπειτα αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος που προσαρμόζει επιτυχώς το ένα στο άλλο με μικρές αλλαγές. Αυτός ο αλγόριθμος δοκιμάζεται και επικυρώνεται χρησιμοποιώντας το DT εντός της προσομοίωσης. Τέλος μετά την επιτυχή επικύρωσή του σε VT, ο αλγόριθμος μεταφέρεται σε ένα φυσικό σύστημα που περιέχει το ρομποτικό χειριστή KUKA LWR4 και τα διαθέσιμα εξαρτήματα για τη συναρμολόγησης.

### 2.3.3 ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Με τον όρο κατασκευή, αναφερόμαστε σε μια βιομηχανική παραγωγή διαδικασία μέσω της οποίας οι πρώτες ύλες μετατρέπονται σε τελικά εμπορεύματα [52]. Ωστόσο με

την αύξηση των απαιτήσεων σχετικά με την ποιότητα των προϊόντων και την ταχεία ανταπόκριση στις απαιτήσεις της αγοράς, η σύγχρονη κατασκευή απαιτεί την φυσική και ψηφιακή αλληλεπίδραση. Η έννοια του ψηφιακού διδύμου εστιάζει στην επίτευξη αυτής της αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας μεταξύ του φυσικού και ψηφιακού κόσμου. Οι Grieves και Vickers [12] οραματίστηκαν τρεις περιπτώσεις ψηφιακού διδύμου. Μπορούμε να κατανοήσουμε οπτικά τις πραγματικές διαδικασίες παραγωγής, να συγκρίνουμε το σχήμα του φυσικού προϊόντος με το εικονικό για να διασφαλιστεί ότι αυτό που παράγουμε είναι αυτό που θέλουμε και τέλος να συνεργαζόμαστε με άλλους ώστε να έχουμε συνεχής ενημέρωση και πλήρη γνώση των προϊόντων που παράγουμε [2]. Με την ανάπτυξη της προηγμένης μηχανικής και ηλεκτρικής τεχνολογίας μέσα στα τελευταία χρόνια επιτεύχθηκε ο αυτοματισμός στην κατασκευή. Με τη χρήση ψηφιακών διδύμων έγινε εφικτή η δημιουργία κατασκευαστικών στοιχείων, τα οποία μπορούν να επικοινωνήσουν με το περιβάλλον τους καθώς και να λαμβάνουν «έξυπνες» αποφάσεις χωρίς να προγραμματίζονται.

Πολλές νέες έννοιες, παραδείγματα και πλαίσια προτείνονται στη φάση κατασκευής. Οι Rosen et al. [22] έδειξε πώς το ψηφιακό δίδυμο λειτούργησε για να μετατρέψει ένα κυβερνητικό φυσικό σύστημα παραγωγής σε αυτόνομο σύστημα. Ο Tao και ο Zhang [19] εξερεύνησαν μια νέα ιδέα - παράδειγμα, αυτή του ψηφιακού διδύμου ενός καταστήματος (DTS: DIGITAL TWIN SHOP), το οποίο περιλάμβανε τέσσερα βασικά στοιχεία, δηλαδή, φυσικό κατάστημα, εικονικό κατάστημα, σύστημα εξυπηρέτησης καταστήματος και ψηφιακά δίδυμα δεδομένα καταστήματος. Οι Park et al. [53] σχεδίασε και υλοποίησε, ένα ψηφιακό δίδυμο για την επίλυση προβλημάτων εξατομικευμένης παραγωγής και καταναμενημένου συστήματος παραγωγής. Το ψηφιακό δίδυμο σχεδιάστηκε για να παρακολουθεί το παρόν σε πραγματικό χρόνο, να παρακολουθεί πληροφορίες από το παρελθόν και να υποστηρίζει τη λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων για το μέλλον.

Μερικές από τις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων στη κατασκευή, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, είναι:

Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο: Το ψηφιακό δίδυμο παρέχει την δυνατότητα παρακολούθησης της διαδικασίας κατασκευής σε πραγματικό χρόνο με διαφορετικό και καλύτερο τρόπο τη τρέχουσα πρακτική. Αρχικά ενσωματώνει οπτικά όλα τα απαραίτητα δεδομένα με τη χρήση τρισδιάστατων μοντέλων, καθώς και ιστορικά δεδομένα, δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, καθώς και πρόβλεψη σχετικά με πιθανά μελλοντικά δεδομένα, για να παρακολουθήσει τη διαδικασία. Για τη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο στη φάση κατασκευής, χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων, συνολική τεχνολογία αντίληψης πληροφοριών [11], τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας [54], τρισδιάστατη τεχνολογία παρακολούθησης και οπτικοποίησης [55]. Το ψηφιακό δίδυμο για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο δεν είναι απλώς μια παρουσίαση των

τρεχόντων δεδομένων και της κατάστασης του φυσικού αντικειμένου, αλλά αποτελεί ένα μοντέλο υψηλής πιστότητας που βοηθά επίσης στην κατανόηση της κατάστασης και στην λήψη αποφάσεων βελτιστοποίησης.

Έλεγχος παραγωγής: Τα κατασκευαστικά συστήματα πρέπει να εκτελούν προκαθορισμένες λειτουργίες και να μπορούν να ανταπέξελθουν σε πιθανές διαταραχές της διαδικασίας. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να συνδέσει το φυσικό σύστημα με το εικονικό του ισοδύναμο για να εκτελέσει «έξυπνο» έλεγχο σε πραγματικό χρόνο. Με την συνεχή λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, στη περίπτωση δυναμικού περιβάλλοντος και με χρήση μοντέλου υψηλής ακρίβειας, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εφαρμόσει έγκαιρα ευφυή έλεγχο στρατηγικής σε σύνθετο σύστημα. Παρ' ολ' αυτά τα περισσότερα ερευνητικά έργα, που μελετήθηκαν στη βιβλιογραφία, ήταν μόνο σε θεωρητικό επίπεδο ή εφαρμόστηκαν σε εργαστήριο περιβάλλον. Ψηφιακό δίδυμο για έξυπνο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο που λειτουργεί το περίπλοκο περιβάλλον παραγωγής δεν έχει ακόμα επιτευχθεί.

Πρόβλεψη απόδοσης τεμαχίου: Στη φάση κατασκευής, υπάρχουν διαταραχές τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές (στην περίπτωση μια παραγωγικής μονάδας), κάτι που καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της απόδοσης του προς κατεργασία κομματιού [56]. Το ψηφιακό δίδυμο για να προβλέψει την απόδοση του κομματιού που θα παραχθεί, πριν την κατασκευή του πρέπει να παρέχει επαρκή δεδομένα και εικονικές αναπαραστάσεις σύνθετων κατασκευαστικών φαινομένων. Μερικές φορές όμως είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι επιστημονικοί κανόνες ορισμένων κατασκευαστικών φαινομένων, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η συναρμολόγηση ενός σύνθετου προϊόντος. Για αυτό το λόγο ενσωματώνονται γνωστοί φυσικοί κανόνες, AI αλγόριθμοι και εξειδικευμένα μοντέλα, που βοηθούν στην βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων.

Συνεργασία και αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ: Ο σχεδιασμός κίνησης ανθρώπου και ρομπότ δημιουργήθηκε με τρόπο ανοιχτού βρόχου. Επομένως, οποιαδήποτε μορφή αλλαγών ή διαταραχών συμβεί στο περιβάλλον συναρμολόγησης ή στη γεωμετρία αντικειμένων απαιτεί επαναβαθμονόμηση / επανασχεδίαση, τόσο των ανθρώπινων όσο και των ρομποτικών κινήσεων. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να πραγματοποιήσει προσομοίωση κλειστού βρόχου έτσι ώστε ο άνθρωπος και το ρομπότ να ενημερώσουν ταυτόχρονα τη διαδρομή ή τις ενέργειές τους. Το ψηφιακό δίδυμο ενός εργασιακού περιβάλλοντος ανθρώπινου-ρομπότ υποστηρίζει την κατανομή εργασιών ανθρώπου-ρομπότ, τη βελτιστοποίηση διάταξης σταθμού εργασίας, την εργονομική ανάλυση του ανθρώπου και τη δοκιμή προγράμματος ρομπότ [57].

Αξιολόγηση και βελτιστοποίηση διαδικασίας: Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα της κατασκευής καθιστά δύσκολο τον προγραμματισμό διεργασιών. Οι σχεδιαστές δεν είναι πάντα σε θέση να έχουν ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά τους τις πραγματικές συνθήκες επεξεργασίας κατά το σχεδιασμό της διαδικασίας [38, 58]. Οι δυναμικές

αλλαγές της διαδικασίας κατεργασίας και οι αβέβαιες συνθήκες των πόρων κατασκευής έχουν μεγάλη επίδραση στην ποιότητα του προϊόντος. Η απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η χαρτογράφηση δεδομένων στο εργαστήριο επιτρέπουν στο ψηφιακό δίδυμο να γνωρίζει την πραγματική διαδικασία επεξεργασίας και την κατάσταση του εξοπλισμού. Συλλέγει υπολογισμένα δεδομένα, δεδομένα απόκλισης, δεδομένα προγραμματισμού διεργασιών και τα ενσωματώνει με γεωμετρικό μοντέλο, μηχανικό μοντέλο, μοντέλο υλικού. Στη συνέχεια, το ψηφιακό δίδυμο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον κατασκευής του μέσω διεπαφών διαλειτουργικότητας, αξιολογώντας και βελτιστοποιώντας τον συνδυασμό διαδικασίας και παραμέτρων.

Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων: Η ανιχνευσιμότητα και η προβολή των περιουσιακών στοιχείων διαδραματίζουν κομβικό ρόλο στη διαδικασία βελτίωσης της απόδοσης και συμβάλλουν στον καλύτερο έλεγχο, τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό αποφάσεων [59]. Το ψηφιακό δίδυμο των κατασκευαστικών περιουσιακών στοιχείων όχι μόνο βοηθά στην επίτευξη της επιχειρηματικής λογικής τους, αλλά επίσης επιτρέπει τη διαδραστική και συνεργατική εργασία με άλλα κατασκευαστικά στοιχεία. Ακόμα υποστηρίζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με τα περιουσιακά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης στοιχείων, της αναδιάρθρωσης, του προγραμματισμού, της θέσης σε λειτουργία και της παρακολούθησης των συνθηκών [60].

Σχεδιασμός παραγωγής: Οι αυξανόμενες διαταραχές στη φάση κατασκευής απαιτούν έξυπνο δυναμικό σχεδιασμό παραγωγής. Το ψηφιακό δίδυμο καθιστά κάτι τέτοιο δυνατό για ένα βελτιστοποιημένο σχέδιο παραγωγής σύμφωνα με την αλλαγή κατάστασης σε πραγματικό χρόνο. Στο πρότυπο Digital Twin Shop-floor (DTS) που πρότειναν οι Tao και Zhang [19], το σχέδιο παραγωγής υποστηρίζεται από δεδομένα αισθητήρων, δεδομένα προσομοίωσης και δεδομένα EIS (Enterprise Information System). Το σχέδιο παραγωγής που παράγεται από την υπηρεσία προγράμματος παραγωγής, παραδίδεται στο εικονικό κατάστημα για επαλήθευση. Στην περίπτωση που αλλάξει η κατάσταση πόρων σε πραγματικό χρόνο, οι συμβουλές τροποποίησης θα δοθούν πίσω στην υπηρεσία σχεδίου παραγωγής.

## 2.4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να σχεδιαστεί με δύο βασικές μεθοδολογίες. Η πρώτη αναφέρεται, στην δημιουργία ενός μοντέλου συστήματος του φυσικού αντικειμένου. Η δεύτερη προσέγγιση, είναι να δημιουργηθεί μια δομή δεδομένων που οργανώνει και συνδέει τα δεδομένα αισθητήρα με άλλες σχετικές πληροφορίες (πχ. ιστορικό) με το αντικείμενο. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο δημιουργίας, ένα ψηφιακό δίδυμο είναι πάντα συγκεκριμένο για την εφαρμογή, είναι μοναδικό και δημιουργείται για μια συγκεκριμένη εργασία. Η ολιστική περιγραφή του

ψηφιακού δίδυμου του φυσικού αντικειμένου δεν μπορεί να επιτευχθεί και να χρησιμοποιηθεί λόγω του μεγάλου όγκου και του υψηλού κόστους δημιουργίας και συντήρησης.

### 2.4.1 ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το ψηφιακό δίδυμο που βασίζεται στο σύστημα, εστιάζει στο πραγματικό φυσικό αντικείμενο. Διαφορετικά μοντέλα, συνδυάζονται για την απόκτηση μιας όσο το δυνατόν πιο ακριβούς αναπαράστασης της πραγματικότητας. Το μοντέλο του συστήματος είναι αυτό που περιέχει όλες τις πληροφορίες και τους συνδέσμους μεταξύ των εξαρτημάτων σε φυσικό και λειτουργικό επίπεδο, καθώς αντιπροσωπεύει τη μοναδική «πηγή» πραγματικότητας.

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δίδυμο βασισμένο στο σύστημα, απαιτείται γνώση όλων των τεχνικών λεπτομερειών του αντικειμένου που θα χαρτογραφηθεί. Αυτό περιλαμβάνει επιπλέον, δεδομένα για τα μεμονωμένα στοιχεία (διαστάσεις, βάρος, υλικό κ.λπ.). Απαιτούνται επίσης πληροφορίες σχετικά με το λογισμικό και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται. Εάν τα χαρακτηριστικά του συστήματος χαρτογραφούνται χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων, τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να ανακτήσουν τις πληροφορίες που απαιτούνται με άμεσο τρόπο. Ο στόχος είναι ότι κάθε καταχώρηση πρέπει να αποθηκεύεται σε ένα μέρος μόνο σε ένα ψηφιακό δίδυμο, κάτι που ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί. Απαιτείται ένας σκελετός για τη δημιουργία, ο οποίος εμπλουτίζεται με περαιτέρω μοντέλα και δεδομένα προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μεγάλο ψηφιακό δίδυμο που περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες και τις ιδιότητες. Αυτός ο σκελετός αποτελεί τη βάση για το ψηφιακό δίδυμο και επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφόρων μοντέλων και συστημάτων.

Η παραπάνω προσέγγιση είναι κατάλληλη για προσομοιώσεις, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που θα συμπεριφερθεί το αντικείμενο κάτω υπό ορισμένες συνθήκες, καθώς και πληροφορίες-αναλύσεις συμπεριφοράς του σε πιθανές καταστάσεις. Εκτός από τις προσομοιώσεις, μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν αναλύσεις που δείχνουν πώς θα συμπεριφερόταν το αντικείμενο υπό διαφορετικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προσομοιωθούν διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες ή ρυθμίσεις στο αντικείμενο χωρίς να εκτίθενται πραγματικά πρωτότυπα ή το αντικείμενο σε αυτές, εξοικονομώντας χρήματα και χρόνο. Μπορούν να δημιουργηθούν πρόσθετοι κανόνες για το πώς ο χειριστής ή ο χρήστης πρέπει να αντιδράσει όταν συμβαίνουν ορισμένες καταστάσεις. Στην ιδανική περίπτωση, η ανθρώπινη αλληλεπίδραση δεν είναι πλέον απαραίτητη. Με βάση τα αποθηκευμένα αποτελέσματα προσομοίωσης, το αντικείμενο μπορεί να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή ακριβώς ποιες συνθήκες ή ακόμη και δυσλειτουργίες υπάρχουν και να προσαρμόζει τις ρυθμίσεις αυτόματα.



Αυτή η μέθοδος έχει μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας, από τη προσέγγιση με χρήση βάσεων δεδομένων, καθώς απαιτούνται ακριβείς πληροφορίες και προδιαγραφές από τον κατασκευαστή, προκειμένου να είναι σε θέση να δημιουργήσει ένα μοντέλο με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια [61].

Το ψηφιακό δίδυμο που βασίζεται στο σύστημα, παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του αντικειμένου, καθώς πέραν της κατανόησης της τρέχουσας κατάστασης του και της πρόβλεψης πιθανών σφαλμάτων, μας δίνεται η πιθανότητα προσομοίωσης του ανεξάρτητα από το φυσικό αντικείμενο και να γίνουν αναλύσεις για πιθανά σενάρια.

#### 2.4.2 ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΒΑΣΕΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Σε αυτήν την προσέγγιση, τα δεδομένα του φυσικού αντικειμένου είναι δομημένα σύμφωνα με κάποια κριτήρια, όπως για παράδειγμα τις λειτουργίες ή τα συγκροτήματα του φυσικού αντικειμένου. Με τον τρόπο αυτό μια απλή δομή ενός ψηφιακού διδύμου που βασίζεται σε δεδομένα μπορεί να υποστηρίξει την βαθύτερη ανάλυση που καθιστά δυνατή τη γρήγορη επισκόπηση της απόδοσης του αντικειμένου.

Στη συνέχεια, οι αισθητήρες ή άλλες πηγές δεδομένων εκχωρούνται σε αυτές τις μεμονωμένες ιδιότητες. Τα δεδομένα μπορούν να αξιολογηθούν και να αναλυθούν χρησιμοποιώντας αλγόριθμους και λειτουργίες σε συνδυασμό με μηχανική εκμάθηση. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται μοντέλα πρόβλεψης και μοντέλα πρόβλεψης συντήρησης [61]. Προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση των δεδομένων ευκολότερη για τον χρήστη, τα δεδομένα μπορούν να αναπαρίστανται οπτικά σε διαγράμματα ή με άλλες ανάλογες επιλογές εμφάνισης.

Με τις πλατφόρμες IoT, χρησιμοποιείται αυτή η προσέγγιση (γραφικής αναπαράστασης). Η διαδικασία δημιουργίας ενός ψηφιακού διδύμου που βασίζεται σε δεδομένα είναι πανομοιότυπη με κάθε πλατφόρμα που παρουσιάζεται. Αρχικά, διασφαλίζεται ότι όλα τα απαιτούμενα δεδομένα είναι προσβάσιμα για αυτό με τη δημιουργία μιας δομής δεδομένων στην οποία έχουν πρόσβαση τα διάφορα μοντέλα και υπηρεσίες. Στη συνέχεια, τα μοντέλα, οι αναλύσεις και οι λειτουργίες δημιουργούνται, επαληθεύονται με δεδομένα και στη συνέχεια διατίθενται. Τα αποτελέσματα και τα δεδομένα αποθηκεύονται. Με αυτόν τον τρόπο, η συμπεριφορά του αντικειμένου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μπορεί να γίνει κατανοητή βάσει των δεδομένων. Προκειμένου να παρέχεται στον τελικό χρήστη η προστιθέμενη αξία και οι πληροφορίες του ψηφιακού διδύμου, πρέπει να δημιουργηθούν τελικές εφαρμογές. Μέσω αυτών των εφαρμογών, ο χρήστης λαμβάνει τις πληροφορίες που είναι σημαντικές για αυτόν. Επίσης τα αποτελέσματα πολλών ψηφιακών διδύμων μπορούν να συνδυαστούν [62].

Με ψηφιακή δίδυμη αρχιτεκτονική που βασίζεται σε δεδομένα, τα αντικείμενα που σχετίζονται άμεσα προσαρμόζονται αμφίδρομα ανά πάσα στιγμή. Παραδείγματα για

κοινά αντικείμενα μπορεί να είναι τεχνικοί χώροι, εξοπλισμός ή υλικά. Η αρχιτεκτονική βάσει δεδομένων, συνδέει πληροφορίες που δημιουργούνται από ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Επομένως, το ψηφιακό δίδυμο κερδίζει κύρος ως εργαλείο ψηφιακής επικοινωνίας για τον εξορθολογισμό του σχεδιασμού, της κατασκευής και των επιχειρησιακών διαδικασιών προκειμένου να σχεδιάσει, να κατασκευάσει και να συντηρήσει αποτελεσματικότερα προϊόντα μηχανικής. Με βάση τα δεδομένα, η διαδικασία σχεδιασμού είναι εξαιρετικά επαναληπτική και δεν διατίθενται όλες οι πληροφορίες ταυτόχρονα. Οι αποφάσεις σχεδιασμού παραγωγής λαμβάνονται όχι μόνο για τα δεδομένα που πρέπει να συλλέγονται, αλλά και για το κόστος και τα οφέλη που συμμετέχουν στον πειραματισμό και την οργάνωση αισθητήρων για τη συλλογή αυτών των δεδομένων.

Ένα ψηφιακό δίδυμο βάσει δεδομένων έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούνται όλες οι τεχνικές πληροφορίες για τη δημιουργία του. Απαιτείται μόνο πρόσβαση στους αισθητήρες για να μπορείτε να τους αναλύσετε. Ο τρόπος δομής των δεδομένων μπορεί να αποφασιστεί από τον ίδιο τον χρήστη.

Τέλος υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακού διδύμου μέσω του συνδυασμού των δύο προσεγγίσεων. Εκτός από τα μοντέλα πρόβλεψης με τεχνητή νοημοσύνη ή μηχανική μάθηση βάσει του μοντέλου δεδομένων, τα μεμονωμένα μοντέλα της προσέγγισης που βασίζεται στο σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οπτική αναπαράσταση της τρέχουσας κατάστασης ή για την πραγματοποίηση αναλύσεων. Τα σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη μηχανική μάθηση για πρόγνωση μπορούν να εμπλουτιστούν με τα αποτελέσματα προσομοίωσης των αναλύσεων (πιθανών περιπτώσεων). Αυτό επιτρέπει στις προβλέψεις να βελτιωθούν σημαντικά, καθώς δεν βασίζονται μόνο σε ιστορικά δεδομένα, αλλά και σε δεδομένα που ενδέχεται να συμβούν αλλά δεν έχουν ακόμη συμβεί.

## **2.5 STEM (SCIENCE, TECHNOLOGY, ENGINEERING, MATHEMATICS)**

### **2.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ STEM**

Το STEM είναι, μια προσέγγιση της εκπαιδευτικής διαδικασίας που βασίζεται στην ιδέα της εκπαίδευσης των μαθητών σε τέσσερις ειδικούς κλάδους - επιστήμη, τεχνολογία, μηχανική και μαθηματικά – με μια διεπιστημονική και εφαρμοσμένη προσέγγιση. Αρχικά, η ιδέα πρωτοεμφανίστηκε το 1998 με πρωτοβουλία του National Science Foundation (NFS) και ονομάστηκε SMET. Στη συνέχεια, ο όρος αντικαταστάθηκε από το σημερινό STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) το 2001, από τη βιολόγο του NFS Judith A. Ramaley, η οποία ως Διευθύντρια του Ιδρύματος Φυσικών Επιστημών των ΗΠΑ, ήταν υπεύθυνη για την ανάπτυξη νέων προγραμμάτων σπουδών. Κύριος στόχος είναι αντί η εκπαίδευση να

προσεγγίσει τους τέσσερις κλάδους ως ξεχωριστά θέματα, να τους ενσωματώσει σε ένα συνεκτικό πρότυπο μάθησης που βασίζεται στην ανάπτυξη πραγματικών εφαρμογών.

Αυτό που διαχωρίζει το STEM από την παραδοσιακή εκπαίδευση, είναι το συνδυασμένο μαθησιακό περιβάλλον που δείχνει στους μαθητές πώς η επιστημονική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στην καθημερινή ζωή. Διδάσκει στους μαθητές υπολογιστική σκέψη και επικεντρώνεται στις πραγματικές εφαρμογές της επίλυσης προβλημάτων. Η βασική ιδέα πίσω από τα εργαλεία STEM είναι η θεωρία μάθησης του κονστрукτιβισμού, σύμφωνα με την οποία με τον χειρισμό και την κατασκευή αντικειμένων, οι μαθητές αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους, προσθέτοντας συνεχώς νέες γνώσεις και αξιοποιώντας τις υπάρχουσες εμπειρίες προσαρμόζοντας τις ιδέες που είχαν προηγουμένως κρατήσει για να δημιουργήσουν νέες πληροφορίες [63].

### 2.5.2. ΤΑ ΟΦΕΛΗ ΤΟΥ STEM

Τα εργαλεία STEM προσφέρουν πρακτικές δραστηριότητες που ενθαρρύνουν τους μαθητές να γίνουν ενεργοί και να δημιουργήσουν ένα διαδραστικό περιβάλλον όπου μπορούν να διερευνήσουν και να εργαστούν με πολύπλοκα προβλήματα πραγματικού κόσμου. Η ενασχόληση-αλληλεπίδραση των μαθητών με φυσικές συσκευές (κατασκευής-ανακατασκευής τους) μετατρέπουν την διαδικασία μάθησης σε μια διασκεδαστική δραστηριότητα που προσελκύει και διατηρεί το ενδιαφέρον των μαθητών, αυξάνει την περιέργεια τους και ενεργοποιεί τη θέληση για μάθηση [64]. Έτσι τα οφέλη των μαθητών-συμμετεχόντων σε τέτοια προγράμματα είναι πολλά και ποικίλα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα πιο σημαντικά:

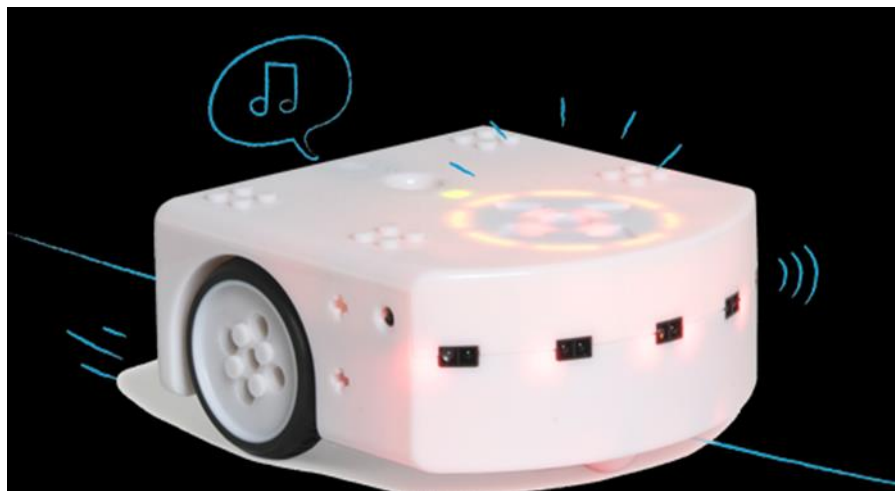
- Ανάπτυξη δεξιοτήτων (γνωστικών, επικοινωνιακών, κοινωνικών κ.λπ.).
- Βελτίωση δεξιότητας επίλυσης προβλημάτων.
- Αύξηση της αυτοπεποίθησης-αυτοεκτίμησης.
- Βελτίωση της κριτικής, υπολογιστικής και αναλυτικής σκέψης.
- Ενίσχυση δημιουργικότητας, επικοινωνίας και ομαδικού πνεύματος.
- Αύξηση των κινήτρων και του ενδιαφέροντος για μάθηση και μελλοντική ενασχόληση.
- Απόκτηση γνώσεων στους βασικούς κλάδους που αντιπροσωπεύει το STEM (επιστήμη, τεχνολογία, μηχανική και μαθηματικά) .

### 2.5.3. ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ

Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια ενσωμάτωσης του STEM στην εκπαίδευση γίνεται όλο και πιο εντατικά και παράλληλα έχουν αναπτυχθεί πολλές και ενδιαφέρουσες πλατφόρμες. Οι εκπαιδευτικές αυτές πλατφόρμες STEM έχουν ως σκοπό, μεταξύ άλλων, να ενισχύσουν το κίνητρο για μάθηση, αλλά πολλές φορές και να προετοιμάσουν τους μαθητές για τις ανώτερες βαθμίδες εκπαίδευσης. . Η ενσωμάτωση της ρομποτικής στην

τάξη αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς και καλούς τρόπους για την εισαγωγή των μαθητών στη φιλοσοφία του STEM. Οι ρομποτικές πλατφόρμες ποικίλουν ανάλογως με τις απαιτήσεις τους, καθώς πέραν του κατασκευαστικού κομματιού σε πολλές απαιτείται και χρήση εφαρμογών προγραμματισμού για τη κίνηση τους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν μερικές εκπαιδευτικές πλατφόρμες ανάλογα με τον τομέα-κλάδο που αντιπροσωπεύουν.

**ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΡΟΜΠΟΤ ΘΥΜΙΟ:** Το Thymio είναι ένα μικρό ρομπότ που εισάγει τον εκπαιδευόμενο στον κόσμο της ρομποτικής και της τεχνολογίας ανεξαρτήτως ηλικίας. Μπορεί να προγραμματιστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, με οπτικό προγραμματισμό (Visual Programming Language, Blockly, Scratch) και με εισαγωγή εντολών (Aseba Text programming) και διαθέτει 6 προ-προγραμματισμένες συμπεριφορές.



*Εικόνα 2.1 Εκπαιδευτικό ρομπότ Thymio [75]*

**BEEBOT (ΕΞΥΠΝΗ ΜΕΛΙΣΣΑ):** ο BeeBot, είναι ένα προγραμματιζόμενο ρομπότ δαπέδου ειδικά κατασκευασμένο για να χρησιμοποιείται ακόμη και από παιδιά προσχολικής ηλικίας καθώς και των πρώτων τάξεων δημοτικής εκπαίδευσης. Ο προγραμματισμός της γίνεται με πλήκτρα που βρίσκονται επάνω της (On-board) μέσω της γλώσσας προγραμματισμού LOGO και μπορεί να προγραμματιστεί για να κινείται με ακρίβεια στο χώρο.

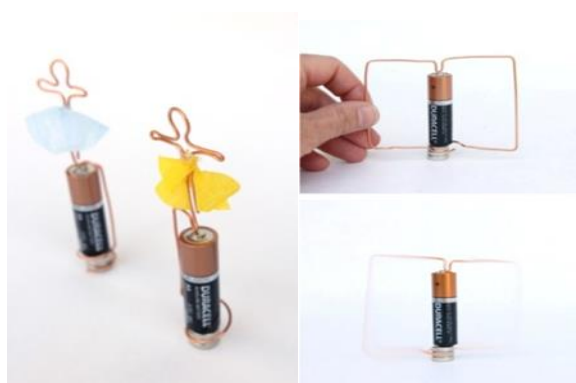


Εικόνα 2.2 Εκπαιδευτικό ρομπότ Beebot [76]

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες πλατφόρμες STEM σύμφωνα με τον κλάδο που αντιπροσωπεύουν (Science, Technology, Engineering, Mathematics).

#### **Επιστήμη (Science): Tiny Dancers**

Στο πείραμα αυτό κατασκευάζεται ένας απλός ομοιοπολικός κινητήρας και χρειάζεται μόνο μερικά εύκολα στη λήψη αντικείμενα και είναι πολύ απλό στην κατασκευή. Είναι επίσης μια εξαιρετική εισαγωγή στον ηλεκτρισμό και τον ηλεκτρομαγνητισμό.



Εικόνα 2.3 Πείραμα Tiny Dancers [77]

#### **Τεχνολογία (Technology): Stop Motion Animation**

Το animation stop motion είναι μια τεχνική δημιουργίας ταινιών που κάνει τα άψυχα αντικείμενα να φαίνονται να κινούνται μόνα τους. Για να λειτουργήσει, τοποθετείτε ένα αντικείμενο μπροστά από μια κάμερα και τραβάτε μια φωτογραφία. Στη συνέχεια μετακινείτε το αντικείμενο λίγο και τραβάτε μια άλλη φωτογραφία. Επαναλάβετε αυτήν

τη διαδικασία αρκετές φορές, αναπαραγάγετε την ακολουθία σε γρήγορη εξέλιξη και το αντικείμενο φαίνεται να κινείται ρευστά στην οθόνη.



*Εικόνα 2.4 Stop Motion Animation [77]*

### **Μηχανική (Engineering): Mini Robot**

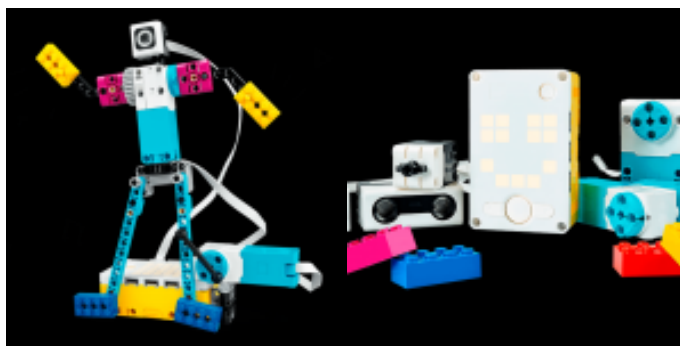
Μέσω της κατασκευής αυτού του ρομπότ γίνεται μια εισαγωγή σε κάποιες βασικές γνώσεις μηχανικής. Με λίγα και απλά υλικά και συγκεκριμένα βήματα κατασκευάζεται το παρακάτω ρομπότ.



*Εικόνα 2.5 Πείραμα κατασκευής Mini Robot [77]*

Ακόμα όσον αφορά το κομμάτι της μηχανικής αξίζει να σημειώσουμε και τις νέες εκπαιδευτικές πλατφόρμες LEGO SPIKE, μέσω του οποίου οι μαθητές γνωρίζουν το STEAM και την εκπαιδευτική ρομποτική, κατασκευάζοντας και προγραμματίζοντας διασκεδαστικά ρομπότ και έξυπνες συσκευές. Το SPIKE LEGO συνδυάζει τουβλάκια LEGO, ένα ισχυρό προγραμματιζόμενο Hub (μικροελεγκτή), γλώσσα προγραμματισμού που βασίζεται και ακολουθεί τη φιλοσοφία του Scratch και μαθήματα STEAM που θα

ενισχύσουν την αυτοπεποίθηση καθώς και το επίπεδο κριτικής σκέψης των μαθητών. Οι δραστηριότητες συνδυάζουν κατασκευή και προγραμματισμό διευκολύνοντας την εισαγωγή των μαθητών στην συλλογή και ανάλυση δεδομένων και στην επίλυση προβλημάτων με εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο ενισχύοντας την ανάπτυξη της κριτικής σκέψης, καθώς και την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μέσα από μια διασκεδαστική διαδικασία όπου μαθαίνουν μέσα απ' το παιχνίδι.



Εικόνα 2.6 Παράδειγμα εκπαιδευτικής πλατφόρμας LEGO SPIKE [78]

### Μαθηματικά (Mathematics): Mirror Box

Το κουτί καθρέφτη είναι επίσης ένας πολύ καλός τρόπος για να εξερευνήσετε απλές μαθηματικές έννοιες όπως συμμετρία, σχήματα και καταμέτρηση.



Εικόνα 2.7 Mirror box (παράδειγμα εκπαιδευτικής πλατφόρμας μαθηματικών) [77]

## 2.6. ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΚΑΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

Η τεχνολογία ψηφιακού διδύμου είναι μια από τις κύριες τεχνολογίες που σχετίζονται με τη Βιομηχανία 4.0 και την σύγχρονη εποχή. Είναι ζωτικής σημασίας στην εκπαίδευση τα μαθησιακά προγράμματα και το περιεχόμενο της εκπαίδευσης να είναι ενημερωμένα, συμπεριλαμβανομένων των εκπαιδευτικών περιβαλλόντων και της τεχνογνωσίας των εκπαιδευτικών. Μαθητές, εκπαιδευτικοί και εταιρείες μπορούν να επωφεληθούν από τη

χρήση νέων ψηφιακών τεχνολογιών, όπως, εργαλεία DT. Αυτό μπορεί να έχει αντίκτυπο στην απασχόληση μαθητών, φοιτητών, καθώς και στην ανταγωνιστικότητα των εταιρειών.

### **2.6.1 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

Παρόλο που η νέα αυτή τεχνολογία έχει αρχίσει να κάνει την εμφάνιση του στον τομέα της εκπαίδευσης, δεν έχει καταφέρει να εισαχθεί ακόμα στον τομέα της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Πολλοί ερευνητές, επισημαίνουν την ιδιαίτερη σημασία εισαγωγής του ψηφιακού διδύμου στα σχολεία ως εργαλείο μάθησης, απεναντίας υπάρχει ακόμα ερευνητικό κενό στο κομμάτι αυτό. Κύριο εμπόδιο στο στάδιο αυτό αποτελεί το γεγονός ότι πρόκειται για μια νέα τεχνολογία που δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως, καθώς και περιορισμένη εξοικίωση των μαθητών και των εκπαιδευτικών με αυτή και τις απαιτήσεις της. Επομένως, αποτελεί μείζονος σημασίας η ανάπτυξη μιας προσέγγισης στα πλαίσια της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, που θα διευκολύνουν την υιοθέτηση της. Με αυτόν τον τρόπο η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου θα μπορέσει να αποτελέσει σημαντικό αρωγό στην προσπάθεια που γίνεται μέσω των διαφόρων προγραμμάτων STEM ενισχύοντας τα και βοηθώντας μέσω της εξοικείωσης που προσφέρει με την τεχνολογία

Το παραπάνω, θα αποτελέσει και το κύριο μέρος της ερευνητικής προσπάθειας της εργασίας και θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια με λεπτομέρια.

### **2.6.2 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΣΤΗΝ ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

Στα πλαίσια της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, έχει υοθετηθεί η προσέγγιση των ψηφιακών διδύμων, στοχεύοντας στα πλεονεκτήματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Στη σχολή Ναυτικών και Τεχνικών Μηχανικών του Aarhus οι μαθητές χρησιμοποιούν ψηφιακά τρισδιάστατα αντίγραφα συστημάτων αυτοματισμού για τον προγραμματισμό αυτόματων γραμμών παραγωγής [65]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, προσφέρει μεγάλη ευελιξία, καθώς δίνει τη δυνατότητα στους εκπαιδευόμενους να πραγματοποιήσουν μεγάλο μέρος της εκπαίδευσης τους με πολύ μεγάλο βαθμό ρεαλισμού εκτός των φυσικών συστημάτων. Οι εκπαιδευτές, περιγράφουν τα παιδαγωγικά οφέλη της ψηφιακής τεχνολογίας διδύμων ως, *...Ο φυσικός εξοπλισμός είναι ακριβός και η μαθησιακή διαδικασία είναι αργή. Με τα ψηφιακά δίδυμα είμαστε πολύ ευέλικτοι γιατί μπορούμε να επεκτείνουμε τον αριθμό των μηχανών με ένα κλικ στο ποντίκι...* [65].

Η τεχνολογία ψηφιακού διδύμου σήμερα θεωρείται ως γέφυρα μεταξύ του ψηφιακού και του φυσικού κόσμου, επιτρέποντας την έγκαιρη πρόσβαση στα δεδομένα του φυσικού συστήματος, αποτρέποντας έτσι τα προβλήματα πριν εμφανιστούν. Τα ψηφιακά



δίδυμα μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των διακοπών λειτουργίας και ακόμη και στην ανάπτυξη νέων κατευθύνσεων και σχεδίων για τη μετατροπή της εκπαίδευσης. Όταν οι μαθητές αναπτύσσουν προσομοιώσεις, πρέπει να φανταστούν ένα μεγάλο μέρος του οραματισμένου συστήματος - ένα πολύτιμο σύστημα σκέψης και μαθησιακής εμπειρίας. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να είναι ένα πολύτιμο συμπλήρωμα από αυτή την άποψη.

Σήμερα, οι διεθνείς εταιρείες σε αυξανόμενο αριθμό χρησιμοποιούν ψηφιακά δίδυμα λόγω της δυνατότητας μείωσης του χρόνου και των δαπανών. Είναι σημαντικό τα σχολεία να ενθαρρύνονται σήμερα από τη βιομηχανία να ενσωματώσουν παιδαγωγικά ψηφιακά δίδυμα στην εκπαίδευση.

Στην έρευνα των Antti Liljaniemi and Heikki Paavilainen [69] χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό δίδυμο σε μια σειρά μαθημάτων με τίτλο «Προσομοίωση στο σχεδιασμό συστήματος ελέγχου». Η έρευνα αυτή διεξήχθη σε 3 κύκλους, όπου μετά απ' το πέρας κάθε κύκλου γίνονταν οι απαραίτητες βελτιώσεις. Το περιεχόμενο του μαθήματος εμπεριείχε τα εξής: (1) διδασκαλία σχετικά με τα πλεονεκτήματα των προσομοιώσεων, (2) αρχές δημιουργίας μοντέλου προσομοίωσης, επαλήθευση και δοκιμή του και (3) διάφορα περιβάλλοντα προσομοίωσης και περίπτωση προσομοίωσης σε διάφορες εφαρμογές. Στόχος αυτού με την ολοκλήρωση του ήταν ο μαθητής να εξοικειωθεί με τις δυνατότητες προσομοιώσεων, να είναι ικανός να δημιουργήσει χρήσιμα μοντέλα προσομοίωσης για να ελέγξει τη συμπεριφορά του προϊόντος, καθώς και να μπορεί να χρησιμοποιήσει μοντέλα προσομοίωσης για να αναπτύξει και δοκιμάσει τους αλγορίθμους διεύθυνσης και ελέγχου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ψηφιακά εργαλεία και η τεχνολογία DT μπορούν να αυξήσουν τα κίνητρα της μελέτης, την ευθύνη των μαθητών για μάθηση, καθώς και να βελτιώσουν τη μάθηση. Συγκεκριμένα, με χρήση ενός ερωτηματολογίου που απάντησαν οι συμμετέχοντες σχετικά με την ψηφιοποίηση γενικά και το DT, αναγνωρίστηκαν τα εξής οφέλη:

Για την ψηφιοποίηση γενικά:

- ⇒ Αύξηση των κινήτρων για σπουδές.
- ⇒ Αύξηση της προσωπικής ευθύνης για μάθηση.
- ⇒ Διευκόλυνση της παρακολούθησης των μελετών.
- ⇒ Διευκόλυνση της μάθησης από άλλους μαθητές.
- ⇒ Βελτίωση της μάθησης.

Για το Digital Twin:

- ⇒ Η τεχνολογία Digital Twin αύξησε τα κίνητρά μου για σπουδές.
- ⇒ Η τεχνολογία Digital Twin διευκόλυνε τη μάθηση με το μάθημα.
- ⇒ Η τεχνογνωσία Digital Twin κάνει τη δουλειά μου πιο εύκολη.

Παρά το γεγονός ότι οι μαθητές δεν γνώριζαν την τεχνολογία DT, αυτή αναγνωρίστηκε ακόμη πιο θετικά από την ψηφιοποίηση. Βέβαια σε σύγκριση με άλλα μαθήματα αυτοματισμού μηχανών, η απόδοση ήταν στο ίδιο επίπεδο. Η τεχνολογία DT δεν αύξησε ούτε μείωσε τους βασικούς δείκτες απόδοσης. Τα κύρια οφέλη της τεχνολογίας ήταν η ανάπτυξη εμπειρογνωμοσύνης και αυξημένα κίνητρα για σπουδές. Τα κύρια εμπόδια ήταν τα προβλήματα πληροφορικής, η έλλειψη πόρων και η ανεπαρκής εμπειρία των εκπαιδευτικών.

Στην μια άλλη έρευνα [70] παρουσιάζεται μια καινοτόμα εκπαιδευτική προσέγγιση που αξιοποιεί την τεχνολογία ψηφιακών δίδυμων, για να μετατρέψει τις παραδοσιακές διαλέξεις σε εμπειρίες «μάθησης στην πράξη» στο εργαστήριο μαθημάτων μηχανικής. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο η χρήση της ψηφιακής δίδυμης τεχνολογίας, σε περιβάλλον εργαστηριακής προσομοίωσης, προσφέρει στους μαθητές μαθησιακές εμπειρίες αντίστοιχες με αυτές που αναμένεται ένας μαθητής να συναντήσει στον πραγματικό κόσμο. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πλατφόρμες υλικού: αρχικά, ένα μοντέλο τηλεχειριζόμενου αυτοκίνητου, και στη συνέχεια, ένα τηλεχειριζόμενο ελικόπτερο με τέσσερις ρότορες (quadcopter). Η διαδικασία αυτού του εργαστηριακού μαθήματος, αντιστοιχούσε στην προσαρμογή κατάλληλων αισθητήρων στην κάθε πλατφόρμα, και στη συνέχεια ολοκλήρωση του DT. Μέσω του DT, ο ψηφιακός έλεγχος του οχήματος που γινόνταν σε περιβάλλον προσομοίωσης, ολοκληρωνόταν και στο πραγματικό πρωτότυπο.

Στόχος αυτού του μαθήματος ήταν η εκμάθηση δημιουργίας ενός ψηφιακού διδύμου, ο πειραματισμός με αυτό σε περιβάλλον προσομοίωσης, η εκμάθηση μεταφοράς πληροφοριών που αποκτήθηκαν από τον πειραματισμό ψηφιακού διδύμου στο φυσικό δίδυμο, καθώς και η εφαρμογή κριτικής σκέψης και επίλυση προβλημάτων στην επινόηση και έλεγχο διάφορων υποθέσεων και πραγματοποίηση προβλέψεων.

Με ένα ψηφιακό δίδυμο, οι μαθητές μπορούν να λάβουν άμεση ανατροφοδότηση σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος, να εντοπίσουν ζητήματα και να αναπτύξουν ένα διανοητικό μοντέλο, για το πώς είναι πιθανό να αποδώσει το φυσικό δίδυμο στον πραγματικό κόσμο κάτω από διαφορετικά λειτουργικά πλαίσια. Στην πραγματικότητα, η άμεση και εποικοδομητική ανατροφοδότηση είναι μια από τις κύριες εκπαιδευτικές πτυχές που σχετίζονται τόσο με τα θετικά μαθησιακά αποτελέσματα όσο και με το κίνητρο [64]. Όταν οι μαθητές λαμβάνουν άμεση, εποικοδομητική ανατροφοδότηση, είτε επιβεβαιωτική είτε αντιφατική, σχετικά με το φυσικό σύστημα ως αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων με το ψηφιακό δίδυμο, μπορούν να εκμεταλλευτούν τα σχόλια κάνοντας παρεμβάσεις για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος. Μπορούν να μάθουν από αυτήν την παρέμβαση και να κάνουν τις κατάλληλες προσαρμογές στο ψηφιακό δίδυμο μοντέλο, όταν και όπου απαιτείται. Η γνώση που αποκτήθηκε από αυτήν τη διαδικασία κλειστού βρόγχου είναι μια πολύτιμη πηγή

σημαντικών μαθημάτων και κατανόησης των ευαισθησιών του συστήματος σε διάφορους τύπους διαταραχών και αλλαγών στις παραμέτρους του συστήματος.

Η σχέση και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού δίδυμου επιτρέπουν επίσης στο ψηφιακό δίδυμο να χρησιμεύσει ως μια βάση μάθησης, για τη μάθηση με βάση την έρευνα κατά την ανάπτυξη και τη δοκιμή του συστήματος. Οι μαθητές μπορούν να υποθέσουν, να κάνουν προβλέψεις και να θέσουν ερωτήσεις στοχεύοντας στο φυσικό σύστημα μέσω του ψηφιακού δίδυμου, και έτσι να αποκτήσουν πληροφορίες σχετικά με την ανάπτυξη και την απόδοση του συστήματος μέσω των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που παρέχονται από αυτό. Η συγκεκριμένη στρατηγική, αξιοποιεί τις γρήγορες και συχνές μαθησιακές ευκαιρίες που προσφέρει το ψηφιακό δίδυμο. Η εμπειρία στην τάξη με το ψηφιακό δίδυμο περιλαμβάνει τόσο ομαδική συνεργασία όσο και ατομική εργασία. Η εργαστηριακή εμπειρία μπορεί να παρέχει βαθύτερες πληροφορίες για τη διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος και την εξελισσόμενη συμπεριφορά του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, οι μαθητές μπορούν να συνεχίσουν να αποκτούν σημαντικές γνώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της ανάπτυξης του συστήματος. Δεδομένου ότι το ψηφιακό δίδυμο είναι προσβάσιμο σε διάφορα μαθησιακά πλαίσια και μπορεί να προσφέρει μια ποικιλία ευκαιριών για πρακτική και πειραματισμό, οι μαθητές θα είναι σε θέση να σχηματίσουν πολλές λογικές συνδέσεις μεταξύ σχετικών εννοιών και αρχών, σταθεροποιώντας έτσι τόσο την εννοιολογική όσο και τη διαδικαστική κατανόηση [65].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ STEM HYDRA

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πλατφόρμα STEM HYDRA αποτελεί μια εκπαιδευτική πλατφόρμα που απευθύνεται σε μαθητές δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Συγκεκριμένα είναι μια χαμηλού κόστους πλατφόρμα που αποτελείται από κατάλληλο υλικό και λογισμικό με σκοπό την εισαγωγή και την εξοικείωση των μαθητών στις έννοιες του προγραμματισμού και της ρομποτικής.

Ο βασικός άξονας σχεδιασμού της πλατφόρμας ήταν η φιλικότητα προς τον χρήστη. Συγκεκριμένα ο πυρήνας του συστήματος βασίζεται στον δημοφιλή μικροελεγκτή arduino, μια συσκευή χαμηλού κόστους που είναι ευρέως αποδεκτή. Το συνολικό σύστημα σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε, παρέχοντας ένα επεκτάσιμο, αρθρωτό σύστημα χαμηλής πολυπλοκότητας κατάλληλο για μαθητές χωρίς ή χαμηλότερες προηγούμενες γνώσεις σε θέματα που σχετίζονται, μεταξύ άλλων, με τον προγραμματισμό, ενσωματωμένες συσκευές, αισθητήρες και ενεργοποιητές και ρομποτική. Ο αρχικός σχεδιασμός της πλατφόρμας έγινε στη [71], όπου παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα ηλεκτρονικά δομικά μέρη (αρθρώματα) και ο τρόπος προγραμματισμού, καθώς και με αρχική μελέτη περίπτωσης χρήσης της συγκεκριμένης πλατφόρμας από μαθητές της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης. Στην [72], παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός εικονικών κελύφων, που επιτρέπουν στο χρήστη να δημιουργήσει πολύπλοκες κατασκευές όπως για παράδειγμα ένα έντροχο ρομποτικό όχημα

Στο αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της πλατφόρμας, του υλικού και του λογισμικού που χρησιμοποιείται, καθώς και του τρόπου λειτουργίας της, προκειμένου να κατανοηθούν τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της, στη προσέγγιση STEM. Η ανάλυση είναι αναγκαία προκειμένου να γίνει κατανοήτος ο τρόπος χρήσης της στην εκπαιδευτική διαδικασία, αλλά και το πως μπορεί να μοντελοποιηθεί αυτή με χρήση εξειδικευμένων εργαλείων ώστε να δημιουργηθεί το σχετικό ψηφιακό δίδυμο.

## 3.2 HARDWARE ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ STEM HYDRA

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστεί το ολοκληρωμένο σύστημα αρθρωμάτων (modules) που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να παρέχεται η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τον χρήστη και το περιβάλλον. Τα αρθρωματα αυτά περιλαμβάνουν το ηλεκτρονικά μέρη μαζί τα κελύγη τους.

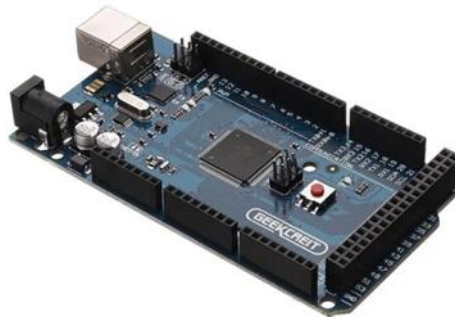
Πρόκειται για αρθρώματα σχεδιασμένα και κατασκευασμένα έτσι ώστε να ικανοποιούν ορισμένους εκπαιδευτικούς στόχους, και παράλληλα να είναι εύκολα διαχειρίσιμα από τον χρήστη. Τα συγκεκριμένα αρθρώματα έχουν σχεδιαστεί έχοντας λάβει υπόψη τον περιορισμένο εκπαιδευτικό χρόνο που θα πρέπει να διατεθεί για την γνωριμία και εξοικείωση των μαθητών με το δεδομένο σύστημα, ώστε να δίνεται βαρύτητα στον βασικό εκπαιδευτικό στόχο που σχετίζεται με την κατανόηση βασικών εννοιών, ανάλογα με την ενότητα που μελετάται. Η πολυπλοκότητα του συστήματος παρουσιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι μαθητές να μπορούν να δημιουργούν διαφορετικά σενάρια, συναρμολογώντας τα αρθρώματα, ενισχύοντας τη δημιουργική τους σκέψη χωρίς να προκαλείται νευρική κατάσταση.

Το προκείμενο σύστημα, απαρτίζεται από 7 αρθρώματα και έναν μικροελεγκτή με την κεντρική πλακέτα του,. Η πολυπλοκότητα του συστήματος ορίζεται από τις επιλογές και τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνδέσει τα αρθρώματα της επιλογής του στην κεντρική πλακέτα και κατά συνέπεια στον μικροελεγκτή. Όλα τα αρθρώματα περικλείονται από ένα κέλυφος, η δομή των οποίων βασίζεται σε έναν γεωμετρικό σχηματισμό αντεστραμμένης πυραμίδας [72]. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή των κομματιών, προστέθηκαν μικρές υποδοχές και αντίστοιχες προεξοχές, στην λογική του αρσενικού - θηλυκού για βελτίωση της συναρμολόγησης και της σταθερότητας σε διακριτές θέσεις. Παράλληλα η βασική ιδέα με τη συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ότι θα υπάρχει η δυνατότητα τα κομμάτια να έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης σε διαφορετικές θέσεις. Το κάθε κέλυφος απαρτίζεται από δύο κομμάτια, το πάνω και το κάτω, τα οποία αποτελούν στη πραγματικότητα και το θηλυκό-αρσενικό μέρος του κουμπώματος αντίστοιχα [72].

### 3.2.1 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Στην κεντρική μονάδα ανήκει ο μικροελεγκτής (  $\mu E$  ) με τη κεντρική πλακέτα. Ο ρόλος του  $\mu E$  είναι ίσως ο σημαντικότερος καθώς μπορεί να αλληλεπιδρά διαδραστικά και αμφίδρομα με τον χρήστη. Δέχεται πληροφορίες από τον χρήστη, μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος και επιστρέφει τα ανάλογα αποτελέσματα. Όλες αυτές οι πληροφορίες μεταδίδονται και διαχέονται στα εξαρτήματα μέσω των ακροδεκτών που θα δούμε στη συνέχεια. Τους ακροδέκτες του  $\mu E$ , που φέρει στην δική μας περίπτωση η πλακέτα Arduino, μπορούμε να τους ομαδοποιήσουμε σε τρεις βασικές κατηγορίες (Εικόνα 3.1):

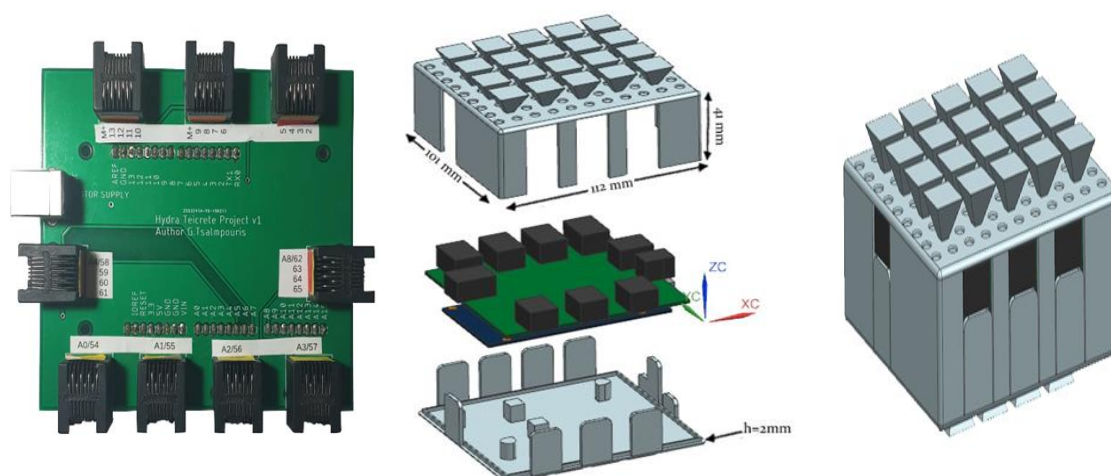
- (i) Οι ψηφιακοί (Digital) ακροδέκτες που παρέχουν λειτουργίες εισόδου\εξόδου και μπορούν να λάβουν δύο καταστάσεις με 0 ή 5V, με το χαρακτηρισμό LOW ή HIGH
- (ii) Οι αναλογικοί (Analog) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως είσοδοι για ανάγνωση αναλογικών τάσεων από 0 έως 5V σε αριθμούς της κλίμακας (0-1023)
- (iii) Οι ψευδοαναλογικοί (Pulse Width Modulation) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι για τη δημιουργία τετραγωνικών κυματομορφών μεταβλητού κύκλου εργασίας (duty cycle). Οι συγκεκριμένες κυματομορφές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και τον έλεγχο φωτεινότητας των leds [71].



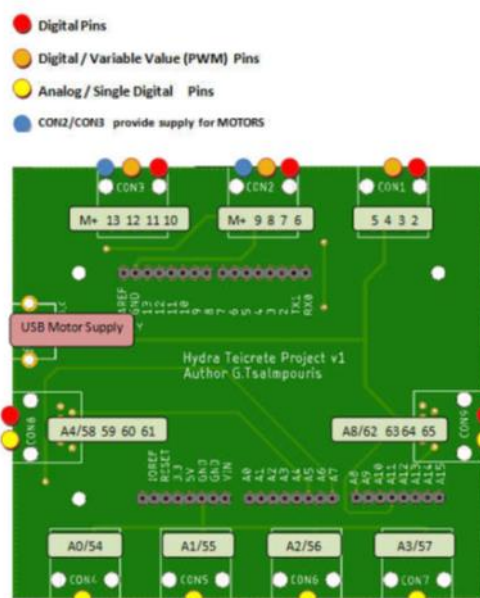
*Εικόνα 3.1 Μικροελεγκτής Arduino Mega2560 Rev3 [21]32*

Η κεντρική πλακέτα, ευθύνεται κυρίως για τη σύνδεση όλων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων με τον Arduino μέσω ειδικών συνδετήρων, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 3.2. Συγκεκριμένα, διαθέτει:

1. Εννέα συνδετήρες RJ45, με τους οποίους μπορούμε να συνδέσουμε τα αρθρώματα της πλατφόρμας.
2. Μία θύρα USB τύπου B για να συνδέουμε φορτιστή κινητού, tablet ή υπολογιστή (δεν συνιστάται) με τη κεντρική πλακέτα για την τροφοδοσία των κινητήρων.



Εικόνα 3.2 Κεντρική πλακέτα άνω οψη [72]



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα ακροδεκτών της κεντρικής πλακέτας Hydra [72]

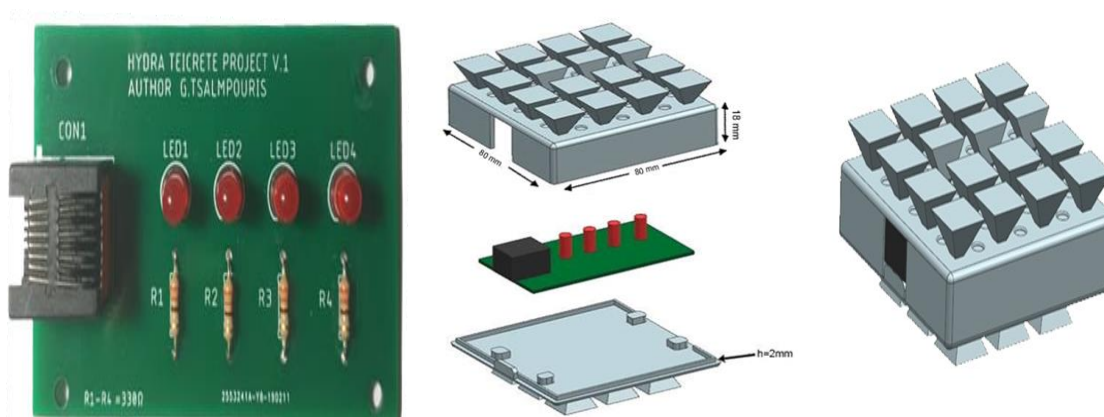
### 3.2.2 ΑΡΘΡΩΜΑΤΑ ΕΞΟΔΟΥ (Output Modules)

Από τα αρθρώματα αυτά εξάγονται πληροφορίες από τον H/Y στον χρήστη.

#### Άρθρωμα 4led

Το συγκεκριμένο άρθρωμα παρέχει τη δυνατότητα αυτόνομου ελέγχου τεσσάρων led. Διαθέτει τέσσερα led κόκκινου χρώματος με αντιστάτες τιμής 330Ω, ώστε να διατηρείται το ρεύμα σε κάθε led σε ασφαλή επίπεδα. Το άρθρωμα 4led (Εικόνα 3.4) μπορεί να συνδεθεί στις :

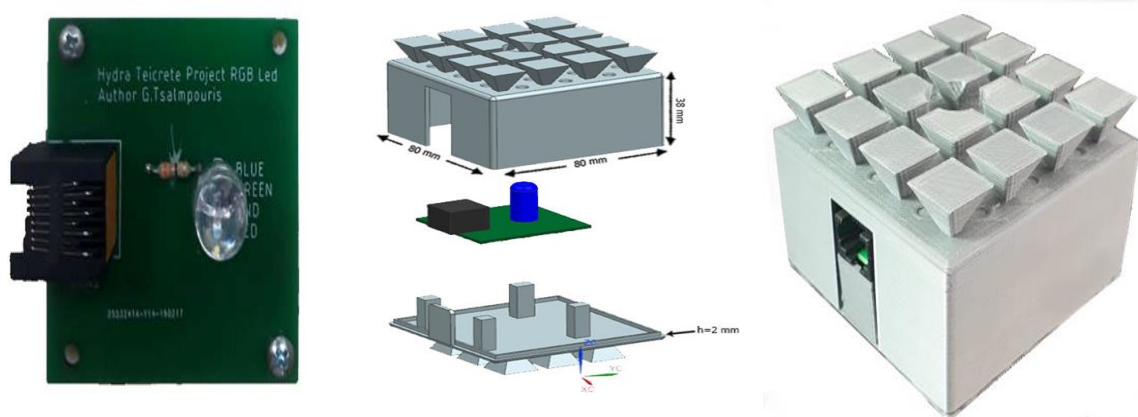
- i. Ψηφιακές θύρες 1, 2, 3, 8 και 9 για τον έλεγχο των led στις καταστάσεις (ON-OFF)
- ii. Ψευδοαναλογικές θύρες (PWM) 1, 2, 3 για έλεγχο της φωτεινότητας.



Εικόνα 3.4 Άρθρωμα 4led [reference kakars]

### Άρθρωμα RGB led

Το άρθρωμα RGB led (Εικόνα 3.5) χρησιμοποιείται για τη παραγωγή χρωμάτων με συνδυασμούς κόκκινου, πράσινου και μπλε. Διαθέτει ένα led τριών χρωμάτων (κόκκινου, πράσινου και μπλε) και τρεις αντιστάσεις ( $330\Omega$ ) για σωστή ρύθμιση του ρεύματος στο led. Το άρθρωμα RGB led συνδέεται στις ψευδοαναλογικές θύρες (PWM) 1, 2 και 3.

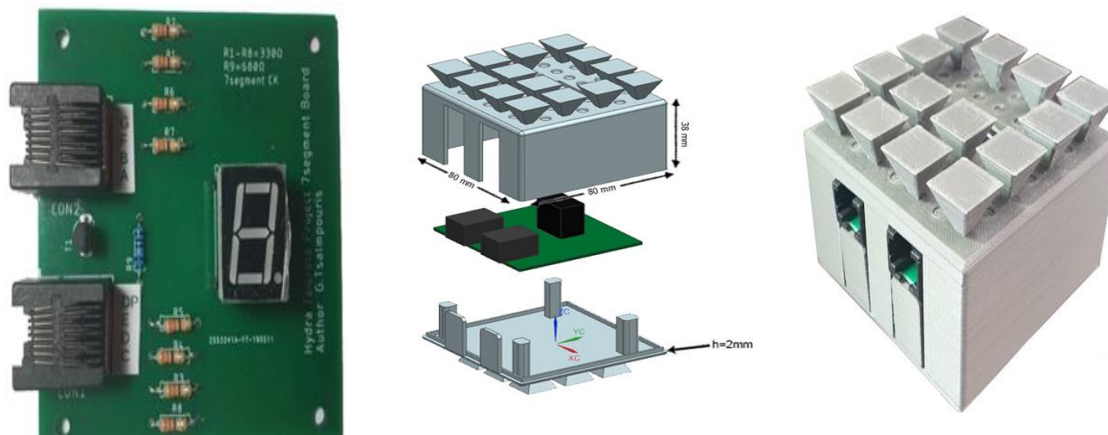


Εικόνα 3.5 Άρθρωμα RGB led [72]

### Άρθρωμα 7segment display

Το κύριο μέρος του αρθρώματος 7segment display είναι η οθόνη η οποία αποτελείται από επτά τμήματα διόδων εκπομπής φωτός (LED) και ένα επιπλέον για την ένδειξη κουκίδας. Ο χρήστης επιλέγοντας τη κατάλληλη διάταξη μπορεί να δημιουργεί την απεικόνιση ακέραιων αριθμών από το 0 έως το 9. Το παραπάνω άρθρωμα μπορεί να συνδεθεί σε δύο από τις ψηφιακές θύρες 1, 2, 3, 8 ή 9 για τον έλεγχο των led στις καταστάσεις (ON-OFF) (Εικόνα 3.6).

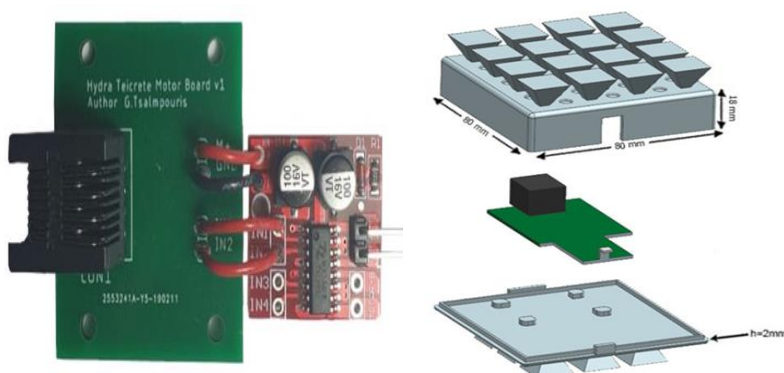




Εικόνα 3.6 Άρθρωμα 7-Segment Display [72]

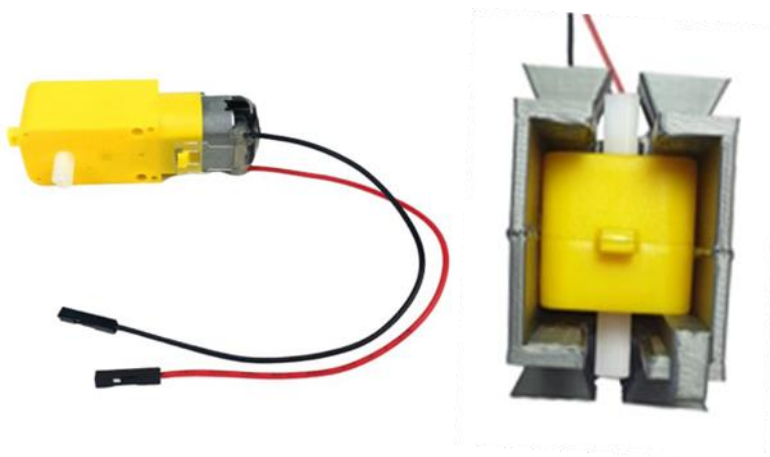
### Άρθρωμα DC motor

Το άρθρωμα DC motor απαρτίζεται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος και μία ηλεκτρονική πλακέτα, που συνιστά γέφυρα (H), δηλαδή ένα κύκλωμα τεσσάρων διακοπών με δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας και φοράς περιστροφής των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 3.7 Ολοκληρωμένο άρθρωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Motor DC)

Ο κινητήρας του αρθρώματος (DC Gear Motor TT - 130 rpm) διαθέτει ονομαστική τάση λειτουργίας 5V και ρεύμα 200 mA εν κενό (Εικόνα 3.10). Για αυτό τον λόγο απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία μέσω των θυρών USB από H/Y οι οποίες μεταδίδουν ρεύμα ικανής τάσης για τον συγκεκριμένο κινητήρα, ωστόσο προτείνεται η τροφοδοσία από εξωτερική πηγή ρεύματος όπως φορτιστή κινητού τηλεφώνου ή tablet. Τέλος, το άρθρωμα DC motor μπορεί να συνδεθεί στις ψευδοαναλογικές θύρες (PWM) 2 και 3, συνδεδεμένες με εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.



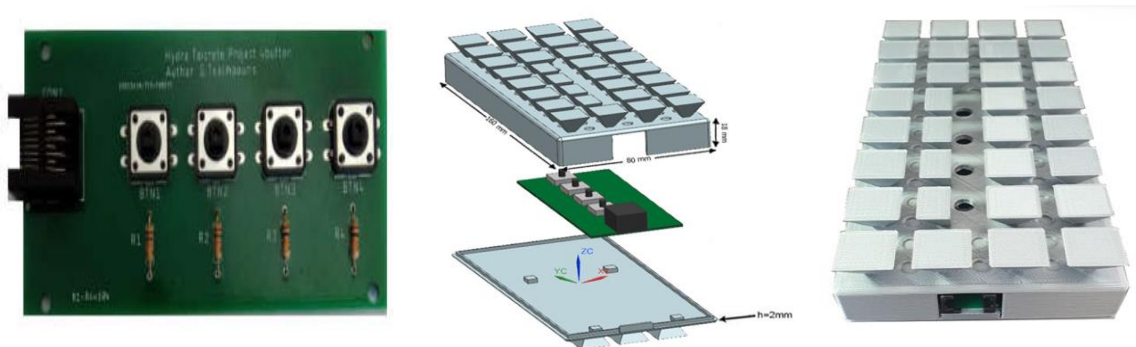
Εικόνα 3.8 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος Gear Motor TT-130rpm [71]

### 3.2.3 ΑΡΘΡΩΜΑΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ (Input Modules)

Από τα αρθρώματα αυτά εισάγονται πληροφορίες από τον χρήστη στον Η/Υ.

#### Άρθρωμα 4\_button

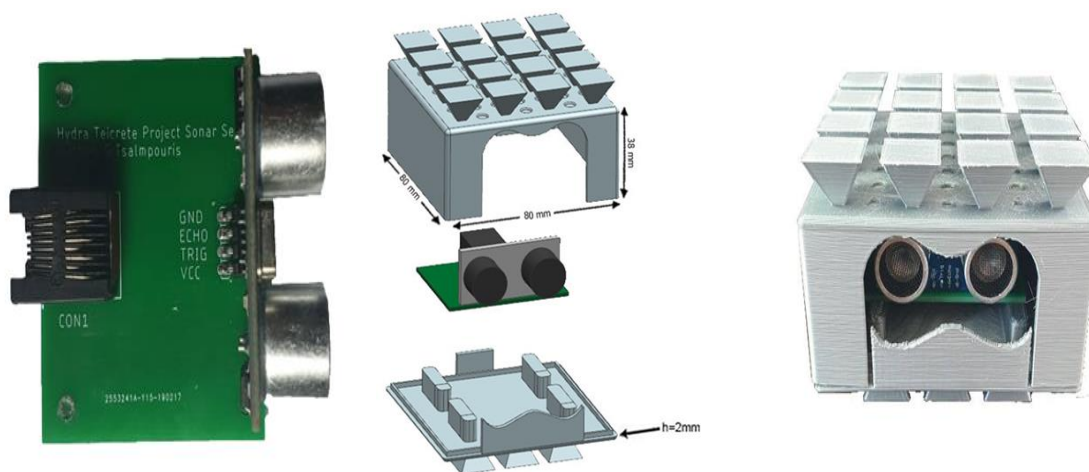
Αποτελείται από τέσσερα κουμπιά και τέσσερις αντιστάσεις πρόσδεσης (pull down) τιμής 10KΩ. Συνδέεται με τις ψηφιακές θύρες 1, 2, 3, 8 και 9 της κεντρικής πλακέτας (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9 Άρθρωμα 4\_Button [72]

#### Άρθρωμα sonar sensor

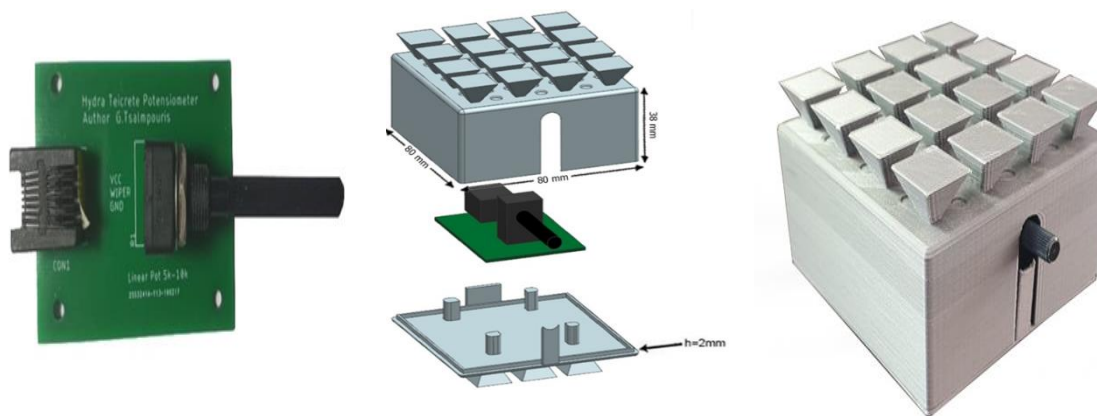
Το άρθρωμα sonar sensor (αισθητήρας υπερήχων) αποτελεί το εξάρτημα του συστήματος το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό απόστασης ανάμεσα στον αισθητήρα και τα εμπόδια. Το συγκεκριμένο άρθρωμα sonar sensor (Εικόνα 3.10) συνδέεται στις ψηφιακές θύρες 1, 2, 3, 8 και 9 της κεντρικής πλακέτας.



Εικόνα 3.10 Άρθρωμα αισθητήρα υπερήχων (Sonar Sensor) [72]

### Άρθρωμα ποτενσιόμετρου (potentiometer)

Με αυτό το άρθρωμα επιτυγχάνεται η ελεγχόμενη ρύθμιση κάποιου φυσικού μεγέθους που επιλέγει ο χρήστης, όπως για παράδειγμα η φωτεινότητα led ή η ταχύτητα κινητήρα. Περιστρέφοντας ,ουσιαστικά, τον άξονά του δημιουργείται ένας διαιρέτης τάσης μεταξύ 0 και 5V (Εικόνα 3.11). Ο χρήστης μπορεί να συνδέσει αυτό το άρθρωμα με την κεντρική πλακέτα στις αναλογικές θύρες 4, 5, 6, 7, 8, 9 που διαθέτει.

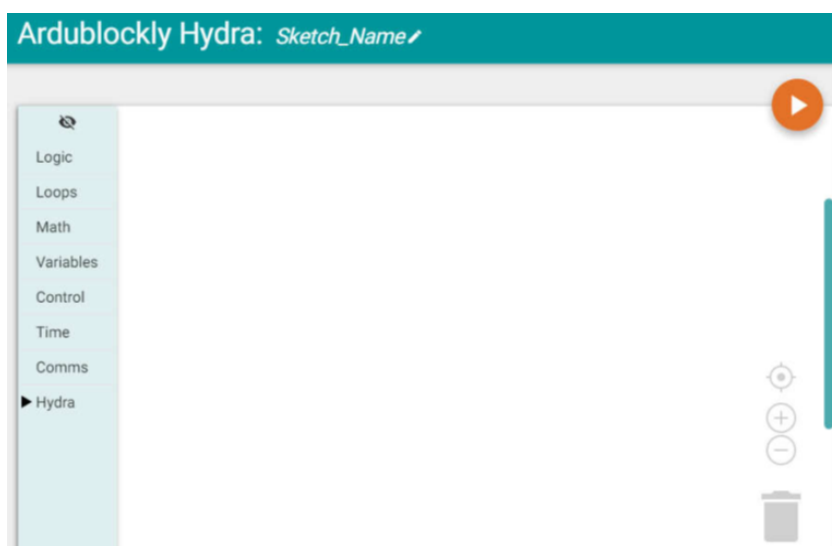


Εικόνα 3.11 Άρθρωμα ποτενσιόμετρου [72]

### 3.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ STEM HYDRA

Το λογισμικό της πλατφόρμας Hydra είναι μια βελτιωμένη και τροποποιημένη έκδοση του Ardublockly [73], που δημιουργήθηκε από τον προγραμματιστή Carlos Pereira Atencio το 2015 και αποτελεί ένα πρόγραμμα επεξεργασίας οπτικών προγραμμάτων για το Arduino με βάση το Google Blockly [74], το οποίο έχει τροποποιηθεί σωστά για τη δημιουργία κώδικα Arduino. Τα κύρια χαρακτηριστικά του λογισμικού είναι ότι μπορεί να δημιουργήσει κώδικα Arduino με οπτικά drag and drop, μπορεί να φορτώσει τον κώδικα σε ένα Arduino Board, παράγει χρήσιμες προειδοποιήσεις μπλοκ κώδικα και είναι συμβατό με τις περισσότερες αυθεντικές πλακέτες Arduino. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα είναι ότι οι μαθητές μπορούν να έχουν πρόσβαση στο Arduino IDE, επομένως ο κωδικός όπως χρησιμοποιείται από τον μικροελεγκτή είναι προσβάσιμος [71].

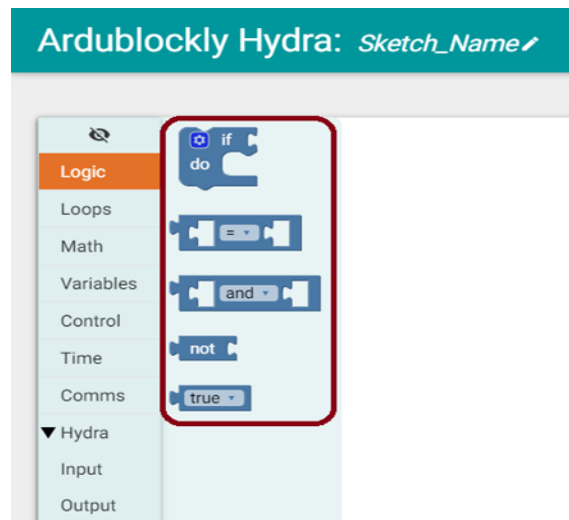
Για την δημιουργία του λογισμικού Ardublockly Hydra πραγματοποιήθηκαν ορισμένες τροποποιήσεις στο μενού του Ardublockly με κύρια την προσθήκη μιας επιπλέον καρτέλα για τις μονάδες Hydra, έτσι ώστε να μπορεί να εξυπηρετηθεί το hardware της πλατφόρμας (Εικόνα 3.12).



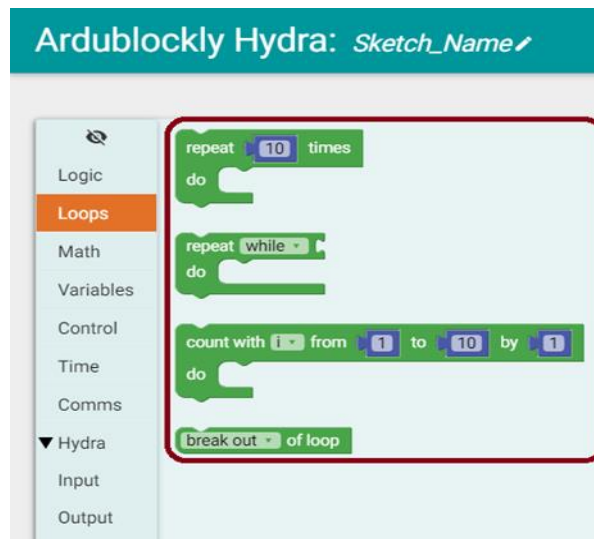
Εικόνα 3.12 Τροποποιημένο μενού πλατφόρμας Ardublockly Hydra

#### 3.3.1 BLOCKS ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ HYDRA

Τα blocks της πλατφόρμας είναι σχεδιασμένα με κύριο γνώμονα την φιλικότητα προς τον χρήστη, καθώς απευθύνεται σε μαθητές πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, οι οποίοι κατά κύριο κανόνα δεν διαθέτουν πρότερη γνώση. Για αυτό το λόγο τα blocks διαθέτουν διάφορα δομικά χαρακτηριστικά για την διευκόλυνση του χρήστη στην επιλογή τους, όπως σχήμα, χρώμα, μέγεθος, κείμενο, υποδοχές (τρόποι σύνδεσης) κ.α., όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στις Εικόνες 3.13 και 3.14.



Εικόνα 3.13 Επιλογές της κατηγορίας Logic της πλατφόρμας Hydra



Εικόνα 3.14 Επιλογές της κατηγορίας Loops της πλατφόρμας Hydra

Στη συνέχεια για χάριν ευκολίας κατανόησης θα διαχωρίσουμε τα blocks με τρόπο αντίστοιχο με τα αρθρώματα, δηλαδή σε blocks εισόδου και εξόδου.

### 3.3.2.1 Blocks Εξόδου (Output Blocks)

#### Block DC motor

Το Block DC motor αντιστοιχεί στο άρθρωμα DC motor, το οποίο είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ο οποίος για να εκτελέσει κίνηση (εκτός από τη σύνδεση με τους ακροδέκτες {1}) προϋποθέτει τη ρύθμιση δύο μεταβλητών φοράς περιστροφής στις

καταστάσεις Right (δεξιόστροφη) ή Left (αριστερόστροφη) {2} και έλεγχο ταχύτητας σε αριθμητικές τιμές από 0 έως 255 {3} (Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15 ΕικονικόBlock DC Motor

### Blocks 4 led

Τα blocks 4 led αντιστοιχούν στο άρθρωμα 4 led. Ο χρήστης ορίζει τις θέσεις (ακροδέκτες) {1} στις οποίες θα συνδεθεί με την κεντρική πλακέτα μέσω της δυνατότητας drop down menu και με αντίστοιχο τρόπο επιλέγει και την κατάσταση των leds (HIGH-LOW, δηλαδή ανοιχτό-κλειστό) {2} (Εικόνα 3.16). Βέβαια στην περίπτωση που απαιτούνται λιγότερα led χρησιμοποιούμε τον αντίστοιχο αριθμό block με τον επιθυμητό.



Εικόνα 3.16 Εικονικό block 4led

Τέλος υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της φωτεινότητας των leds κάνοντας χρήση του block variable\_led (Εικόνα 3.17).

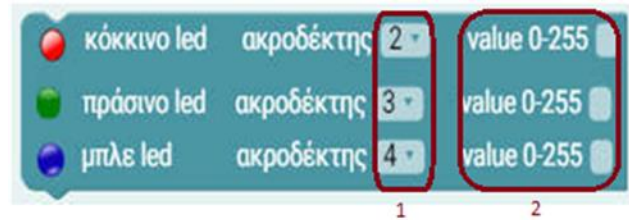


Εικόνα 3.17 Block Led μεταβλητής φωτεινότητας

### Block RGB led

Το Block RGB led αντιστοιχεί στο άρθρωμα RGB led. Με το block αυτό μπορούμε να ορίσουμε αριθμητικές τιμές εύρους (0-225) ή όνομα αριθμητικής μεταβλητής σε κάθε ένα από τα χρώματα κόκκινου (Red), πράσινου (Green) και μπλε (Blue) που διαθέτει το άρθρωμα, για να παράγουμε ένα συνδυαστικό τελικό χρώμα. (Εικόνα 3.18)

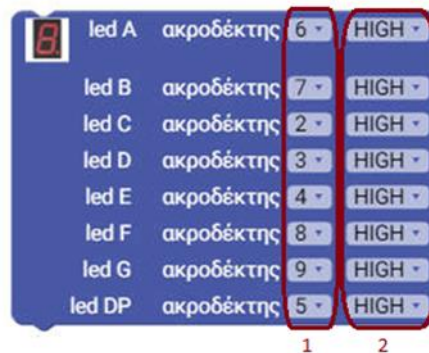




Εικόνα 3.18 Εικονικό Block RGB Led

### Block 7-segment display

Το Block 7-segment display αντιστοιχεί στο άρθρωμα 7-segment display. Μέσω των blocks μπορούμε να διαχειριστούμε κατάλληλα και να σχηματίσουμε τον αριθμό που επιθυμούμε, αφού κάθε led το έχουμε συνδέσει με ένα ακροδέκτη (Εικόνα 3.19) {1}. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας την κατάσταση του κάθε τμήματος επιλέγοντας HIGH-LOW {2}. Ακόμα δίνεται η δυνατότητα χρήσης των μεμονωμένων blocks που αφορούν ξεχωριστά κάθε led, όπως στα Blocks 4 led, τα οποία μπορεί να συνθέσει ο χρήστης για να αποδώσει το αποτέλεσμα που επιθυμεί.

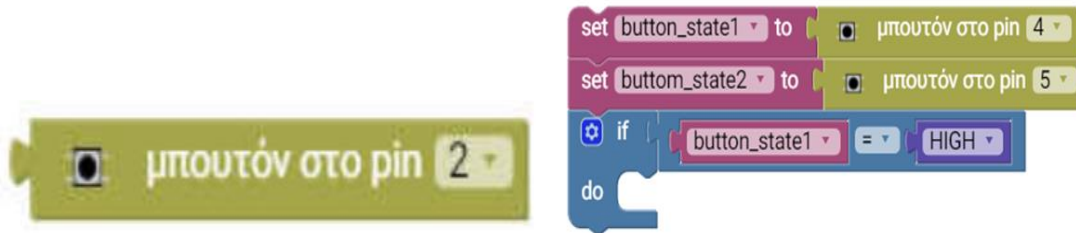


Εικόνα 3.19 Εικονικό Block 7-segment display

### 3.3.2.2 Blocks Εισόδου (Input Blocks)

#### Block 4\_button

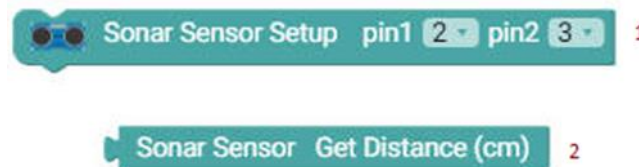
Το Block 4\_button αντιστοιχεί στο άρθρωμα 4\_button. Για τον έλεγχο του μέσω του λογισμικού, θα πρέπει αρχικά να ορίσουμε και εδώ την θέση των ακροδεκτών όπου θα συνδεθεί το άρθρωμα. Η ιδιαιτερότητα στο συγκεκριμένο block είναι ότι διαθέτει έξοδο για ένα μόνο αποτέλεσμα {Εικόνα 3.20 (α)}. Άρα, σε περίπτωση που επιθυμούμε περισσότερα από μια θα πρέπει να ενσωματώσουμε και αντίστοιχες φορές το ίδιο block (με τις κατάλληλες θέσεις ακροδεκτών). Στην συνέχεια, με τη βοήθεια άλλων blocks που υπάρχουν στο μενού χειριστή μπορούμε να καλέσουμε την κατάσταση των buttons όπως στο παράδειγμα της Εικόνα 3.20(β).



Εικόνα 3.20 (α) Εικονικό Block 4\_button (β) Παράδειγμα χρήσης του Block 4\_button

### Block sonar sensor

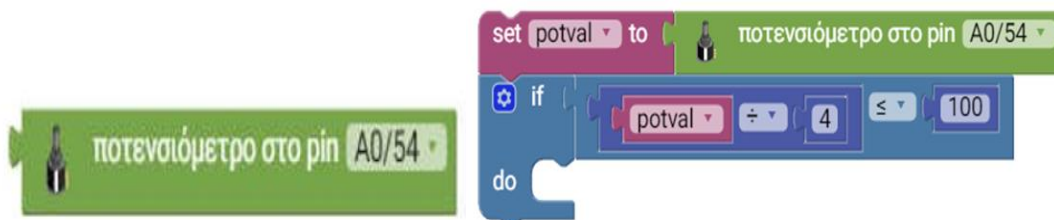
Το block sonar sensor αντιστοιχεί στο άρθρωμα sonar sensor και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ εμποδίου και αισθητήρα. Για να ορίσουμε τις θέσεις σύνδεσης με τους ακροδέκτες και την απόσταση που επιθυμούμε να επιστρέφει ως πληροφορία, απαιτείται η χρήση δύο blocks του λογισμικού, του block Sonar Sensor Setup {1} και του block Sonar Sensor Get Distance {2} (Εικόνα 3.21).



Εικόνα 3.21 Εικονικό Block Sonar Sensor

### Block ποτενσιόμετρον (potentiometer)

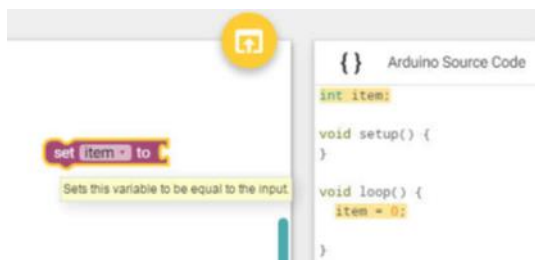
Το block ποτενσιόμετρον αντιστοιχεί άρθρωμα ποτενσιόμετρον και έχει παρόμοια λειτουργία με αυτή του block 4\_button. Συγκεκριμένα διαθέτει δυνατότητα ορισμού θέσεων με τους ακροδέκτες και με τη βοήθεια δηλαδή άλλων blocks καλούμε την αριθμητική τιμή (εύρους 0-1023) και παίρνουμε την αντίστοιχη πληροφορία, ανάλογα με την περιστροφή του άξονα του πραγματικού αρθρώματος {Εικόνα 3.22(α)} όπως στο παράδειγμα της Εικόνα 3.22(β).



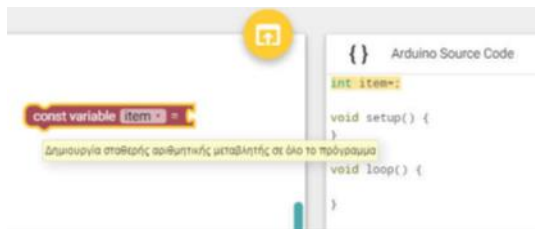
Εικόνα 3.22 (α) Εικονικό Block ποτενσιόμετρον (potentiometer), (β) Παράδειγμα χρήσης του Block potentiometer



Τέλος υπάρχουν και τα blocks ειδικής λειτουργίας που υπάρχουν στην κατηγορία Variables στο μενού χρήστη. Το λογισμικό Ardublockly έχει σχεδιαστεί με χρήση καθολικών μεταβλητών (global variables) και συγκεκριμένα με το block set item to (Εικόνα 3.23). Καθολική λέγεται μία μεταβλητή όταν έχει ισχύ σε όλο το πρόγραμμα διατηρώντας το περιεχόμενό της. Λόγω προγραμματιστικών περιορισμών που δημιουργεί η συγκεκριμένη μεταβλητή σχετικά με τη διατήρηση του περιεχομένου της δεν μας εξυπηρετεί. Έτσι λοιπόν, στην εφαρμογή Ardublockly Hydra, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ενός block ίδιας χρήσης, το block const variable item (Εικόνα 3.24), το οποίο πληρεί όλες τις ιδιαιτερότητες που χρειαζόμαστε για δημιουργία μεταβλητής.



Εικόνα 3.23 Block δημιουργίας μεταβλητής (set item to)



Εικόνα 3.24 Block δημιουργίας σταθερής αριθμητικής μεταβλητής (const variable item)

### 3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Τα παραπάνω αρθρώματα μπορούν να συνδιαστούν, προκειμένου να δημιουργηθούν πλήρως λειτουργικά πρωτότυπα. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία και η χρήση επιπλέον στατικών κομματιών που θα βοηθήσουν τη παραπάνω διαδικασία. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σύντομα η δημιουργία ενός πρωτότυπου ρομποτικού οχήματος, όπως αυτό έχει περιγραφεί αναλυτικά στη διπλωματική εργασία του κύριου Κακαρά Γεώργιου [72].

Αρχικά, δημιουργήθηκε η κατάλληλη υποδομή για τη χρήση τροχών και συγκεκριμένα προστέθηκαν ρόδες στις οποίες ενσωματώθηκαν ειδικοί άξονες που επιτρέπουν την σύνδεσή τους με τους αντίστοιχους άξονες υποδοχής των κινητήρων που διαθέτονται (Εικόνα 3.25, Εικόνα 3.26).



Εικόνα 3.25 Εξάρτημα ρόδας [72]



Εικόνα 3.26 Συναρμολογημένη όψη κινητήρα με την ρόδα [72]

Παράλληλα, προστέθηκαν κατάλληλες μπίλιες οι οποίες διευκολύνουν τη κίνηση του ρομποτικού οχήματος με το αντίστοιχο κέλυφος για την κατάλληλη πρόσδεση τους.

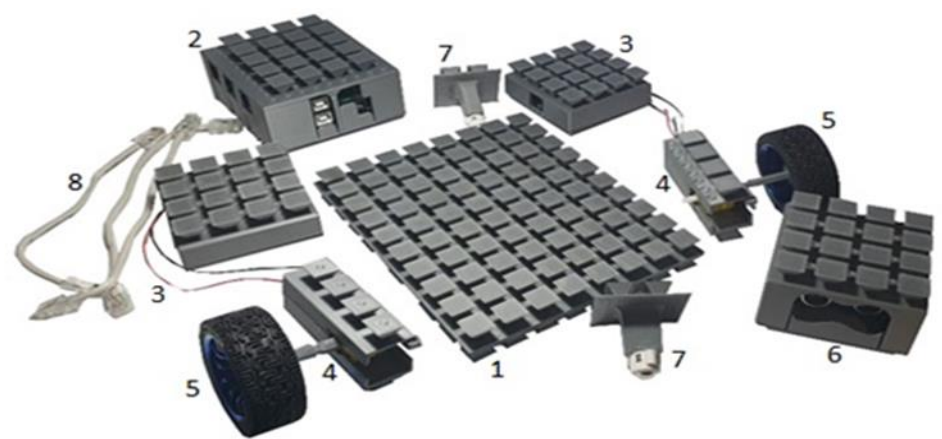


Εικόνα 3.27 Εξάρτημα μπίλιας [72]

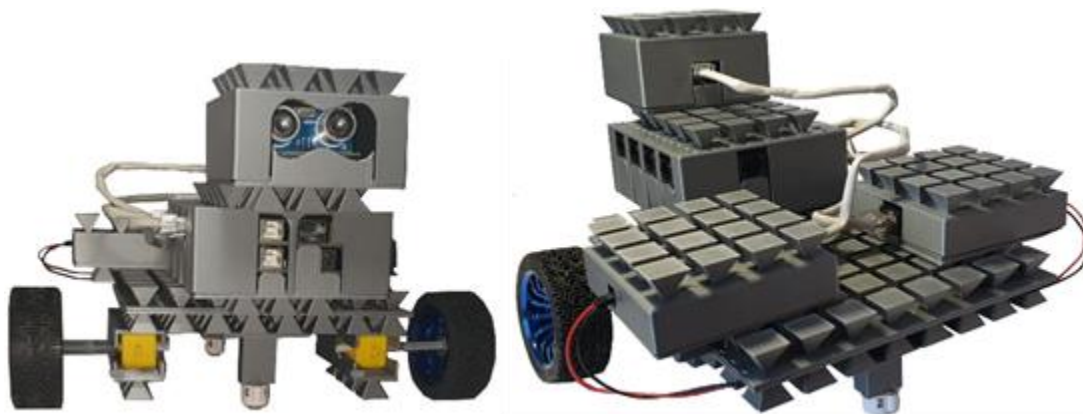
Έτσι τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του αυτόνομου λειτουργικού οχήματος της διαδικασίας είναι τα εξής:

1. Κεντρικός σύνδεσμος (σασί)
2. Άρθρωμα Κεντρικής πλακέτας
3. 2 αρθρώματα DC Motor
4. 2 DC κινητήρες (με τους άξονές τους)

5. 2 τροχούς
6. Άρθρωμα αισθητήρα Sonar Sensor
7. 2 αρθρώματα μπίλιας
8. Καλώδια σύνδεσης

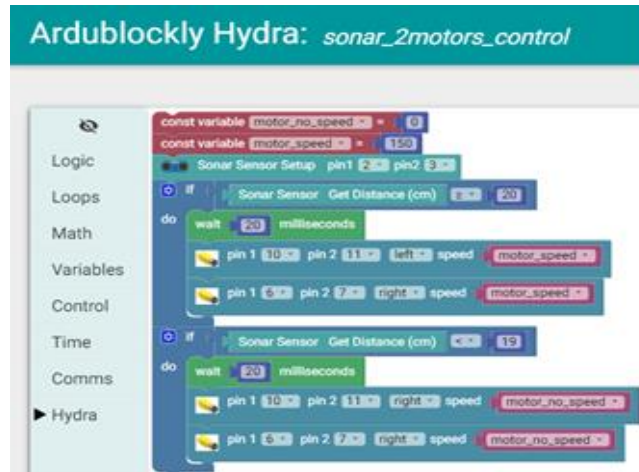


Εικόνα 3.28 Αποσυναρμολογημένη διάταξη ρομποτικού οχήματος [72]



Εικόνα 3.29 Απεικόνιση ρομποτικού οχήματος από διαφορετικές όψεις [72]

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του ρομποτικού οχήματος.



Εικόνα 3.30 Παράδειγμα κώδικα *sonar\_2motors\_control* [72]

Με την εκτέλεση του παραπάνω κώδικα το ρομποτικό όχημα τίθεται σε κίνηση. Συγκεκριμένα αρχικά ορίζεται η ταχύτητα του με τις εντολές *motor no speed = 0* για την ακινητοποίηση του οχήματος (σταμάτημα λειτουργίας κινητήρα) και *motor speed = 150* για την κίνηση του οχήματος (λειτουργία κινητήρα). Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση των blocks του αισθητήρα *sonar sensor* το όχημα κινείται στο χώρο και σταματάει μόνο όταν ανιχνεύσει εμπόδιο σε προκαθορισμένη απόσταση (μικρότερη των 20cm). Μάλιστα με τη χρήση των blocks των κινητήρων δίνεται η επιλογή για προσδιορισμό φοράς κατεύθυνσης του κινητήρα (*left/right*), ώστε να γίνει ορθή κίνηση του οχήματος σύμφωνα με το ζητούμενο αποτέλεσμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη συγκεκριμένη παράγραφο αναπτύσσεται το ψηφιακό δίδυμο της εκπαιδευτικής διαδικασίας της πλατφόρμας Hydra, που αποτελεί ένα εργαλείο STEM με πολλαπλά οφέλη και απευθύνεται σε μαθητές της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δίκτυα PETRI, λόγω της ιδιότητας τους ως ένα γραφικό εργαλείο για μοντελοποίηση και αξιολόγηση απόδοσης πραγματικών συστημάτων με διακριτά γεγονότα. Παράλληλα η επιλογή αυτού του εργαλείου έγινε εξαιτίας της δυνατότητας εφαρμογής του σε συστήματα σε πραγματικό χρόνο, της ευελιξίας που προσφέρει, καθώς και την δυνατότητα γραφικής αναπαράστασής του, προσδίδοντας μια επιπρόσθετη αξία στα συστήματα που αναλύονται και στη δυνατότητα κατανόησης τους.

Αφορμή της πραγματοποίησης αυτής της ανάλυσης είναι η συνεχώς αυξανόμενη απήχηση της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου, καθώς και των εφαρμογών της και η εισαγωγή της στον τομέα της εκπαίδευσης και ιδίως στους τομείς της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, κάτι που ακόμα βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο. Παράλληλα αποτελεί μια προσπάθεια εμπλουτισμού της πλατφόρμας Hydra και των πολλαπλών οφελών που αυτή προσφέρει.

### 4.2 ΔΙΚΤΥΑ PETRI

Τα δίκτυα Petri αναπτύχθηκε αρχικά από τον Carl Adam Petri, και αποτέλεσαν αντικείμενο της διατριβής του το 1962. Τα δίκτυα Petri είναι μια γραφική αναπαράσταση ενός συνδυαστικού μοντέλου. Σε σύγκριση με άλλα δίκτυα, έχουν ένα μοναδικό πλεονέκτημα στον τομέα της περιγραφής και της ανάλυσης. Ταυτόχρονα, τα δίκτυα Petri είναι ένα αυστηρά καθορισμένο μαθηματικό και γραφικό εργαλείο στη μοντελοποίηση

και αξιολόγηση απόδοσης πραγματικών συστημάτων με διακριτά γεγονότα που χαρακτηρίζονται ως ταυτόχρονα, συγχρονισμένα, ασύγχρονα, κατανεμημένα, παράλληλα, μη ντετερμινιστικά και στοχαστικά, όπως συστήματα υπολογιστών, δίκτυα επικοινωνίας και συστήματα παραγωγής, κ.λπ. Με τη βοήθεια της μαθηματικής ανάπτυξης μεθόδων και τεχνικών ανάλυσης δικτύων Petri, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατική δομική ανάλυση, καθώς και για δυναμική ανάλυση της συμπεριφοράς.

#### 4.2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI

Η τεράστια ερευνητική προσπάθεια που αφιερώθηκε τα τελευταία χρόνια στον τομέα των δικτύων Petri παρέχει τώρα αρκετές ενδιαφέρουσες τεχνικές ανάλυσης, όπως υπολογισμός ροών και ημι-ροών, κανόνες δομικής μείωσης, γραφήματα προσβασιμότητας με αυτόματη ανίχνευση και εκμετάλλευση συμμετριών κ.λπ. Επιπλέον τα δίκτυα Petri και οι έννοιες τους επεκτάθηκαν και αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν σε διάφορους τομείς: αυτοματισμός γραφείου, ευέλικτη κατασκευή, γλώσσες προγραμματισμού, πρωτόκολλα και δίκτυα, δομές υλικού, συστήματα σε πραγματικό χρόνο, αξιολόγηση απόδοσης, έρευνα λειτουργίας, ενσωματωμένα συστήματα, αμυντικά συστήματα, τηλεπικοινωνίες, διαδίκτυο, ηλεκτρονικό εμπόριο και εμπορία, σιδηροδρομικά δίκτυα, βιολογικά συστήματα. Μάλιστα λόγω της ιδιότητας του ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την μοντελοποίηση συστημάτων, οι δυνατότητες γραφικής αναπαράστασης τους αποκτούν πρόσθετη 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 να γίνει εύκολα κατανοητή [66].

#### 4.2.2 ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

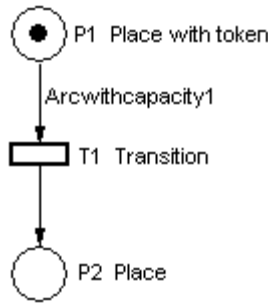
Τα συνήθη δίκτυα Petri αποτελούν το βασικό μοντέλο με βάσει το οποίο στη συνέχεια προέκυψαν νέα. Το αρχικό μοντέλο δεν περιλαμβάνει σύνδεση με την έννοια του χρόνου, αλλά αναπαριστά ακολουθίες εκτέλεσης διακριτών γεγονότων καθώς και τις λογικές συνδέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών μερών του υπό μελέτη συστήματος. Αντιθέτως τα χρονικά διαγράμματα Petri που αποτελούν μια από τις επεκτάσεις των συνήθη δικτύων Petri, χρησιμοποιούνται για την ποσοτική ανάλυση αποδοτικότητας και τον έλεγχο αξιοπιστίας συστημάτων στο πέρασμα του χρόνου. Μια ακόμη προέκταση που προκύπτει από τα χρονικά δίκτυα Petri αποτελούν τα συνεχή δίκτυα Petri, τα οποία αναπτύχθηκαν λόγω των μεγάλων αριθμών προσεγγίσεων σημάνσεων που δημιουργούνται σε κάποια δίκτυα Petri και των προβλημάτων που επιφέρουν στην ανάλυση τους, με σκοπό την διευκόλυνση στη διαχείρισή τους μέσω της κατά προσέγγιση με πραγματικούς αριθμούς (μετατροπή των σημάνσεων από ακέραιους αριθμούς σε πραγματικούς) περιγραφής συστημάτων διακριτών γεγονότων. Τέλος μια εξίσου σημαντική προέκταση αποτελούν τα υβριδικά δίκτυα Petri τα οποία προκύπτουν

ως ένας συνδυασμός συνήθων και συνεχών δικτύων Petri. Τα υβριδικά δίκτυα Petri χρησιμοποιούνται για να περιγράφουν αλληλεπίδραση συνεχών και διακριτών μεταβλητών σε ένα σύστημα, όπως το κλείσιμο μιας βαλβίδας ρύθμισης της ροής στις σωληνώσεις ενός εργοστασίου ή τη βλάβη ενός χημικού αντιδραστήρα συνεχούς εισόδου-συνεχούς εξόδου.

#### 4.2.3 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα Δίκτυα Petri είναι διμερή γραφήματα που συμπληρώνονται με διακριτικά που ρέουν μέσω του γραφήματος. Ένα διμερές γράφημα είναι ένα με δύο κατηγορίες κορυφών. Τα τόξα συνδέουν πάντα μια κορυφή σε μια κατηγορία με μία ή περισσότερες κορυφές στην άλλη κλάση. Οι δύο κατηγορίες κορυφών Δικτύων Petri είναι *θέσεις* και *μεταβάσεις*, έτσι, το όνομα Nets Place-Transition (P / T) που χρησιμοποιείται συχνά για αυτήν την κατηγορία διμερών γραφημάτων, τα τόξα συνδέουν ένα μέρος με μία ή περισσότερες μεταβάσεις ή μια μετάβαση με ένα ή περισσότερα μέρη. Οι θέσεις περιγράφουν τις καταστάσεις (κάθε θέση μια μερική κατάσταση) και τους πόρους του συστήματος κι αντιπροσωπεύονται γραφικά από κύκλους (O). Οι θέσεις είναι τα παθητικά στοιχεία του δικτύου, που αναφέρονται και ως δίαυλοι κι είναι ικανά να αποθηκεύσουν υλικά (π.χ. κομμάτια σε μηχανές και αποθήκες) και μη (π.χ. πληροφορίες) συστατικά ενός συστήματος [67]. Επιπρόσθετα οι θέσεις ενδέχεται να περιέχουν τελείες (tokens), οι οποίες εμφανίζονται μέσω της αλληλεπίδρασης των 2 κόμβων που τις συνθέτουν και μπορούν να μετακινούνται, δημιουργούνται ή εξαφανίζονται. Οι τελείες αποθηκεύονται μέσα στις θέσεις του δικτύου, ενώ ταξιδεύουν μέσω των τόξων κι η ροή τους στο δίκτυο ρυθμίζεται από τις μεταβάσεις που τίθενται σε ετοιμότητα από την παρουσία τους στις κατάλληλες θέσεις. Αντίστοιχα οι μεταβάσεις έχουν την έννοια των γεγονότων που συμβαίνουν στο σύστημα κι η πραγματοποίησή τους μεταβάλλει την κατάσταση του. Γραφικά αντιπροσωπεύονται από τετράγωνα ή μπάρες ( $\square$  ή  $|$ ) κι αποτελούν τα ενεργά στοιχεία του συστήματος. Μια μετάβαση μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ενέργεια, μια διαδικασία, μια επεξεργασία, μια δραστηριότητα, το υπολογιστικό βήμα ενός αλγορίθμου, μια λογική πρόταση ή ένα επεξεργαστή σήματος [68].

Όπως προαναφέρθηκε οι θέσεις και οι μεταβάσεις συνδέονται με χρήση προσανατολισμένων τόξων, τα οποία αναπαριστούν τις φυσικές συνδέσεις μεταξύ τους, ενώ παράλληλα καθορίζουν την προτεραιότητα στην εκτέλεση ανταγωνιζόμενων εργασιών ή τη σειρά με την οποία κάποιες εργασίες θα εκτελεστούν. Ακόμα κάθε τόξο έχει ένα βάρος πολλαπλότητας το οποίο αποτυπώνεται ως ένας θετικός ακέραιος αριθμός (σε περίπτωση που δεν αναγράφεται το βάρος πολλαπλότητας του τόξου είναι ίσο με μονάδα όπως στην Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Παράδειγμα κομματιού δικτύου Petri [79]

#### 4.2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΗΘΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI

Ένα Δίκτυο Petri είναι μια πλειάδα  $\Delta P = (P, T, I, O, m_0)$ , όπου:

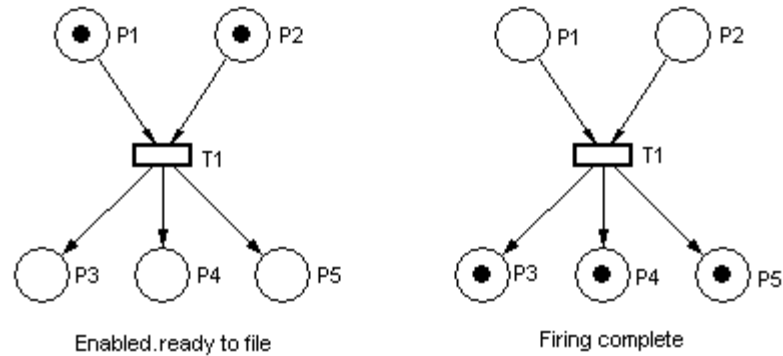
- $P = \{p_1, \dots, p_{np}\}$  είναι ένα πεπερασμένο μη κενό σύνολο μερών-θέσεων.
- $T = \{t_1, \dots, t_{nt}\}$  είναι ένα πεπερασμένο μη κενό σύνολο μεταβάσεων.
- $I: (P \times T) \rightarrow N$  είναι ο πίνακας συμβάντων εισόδου που αντιστοιχεί στο σύνολο των τόξων με κατεύθυνση από θέσεις προς μεταβάσεις.
- $O: (P \times T) \rightarrow N$  —είναι ο πίνακας συμβάντων εξόδου, που αντιστοιχεί στο σύνολο των κατευθυνόμενων τόξων από μεταβάσεις προς θέσεις αντίστοιχα.
- $m_0$  είναι η αρχική σήμανση του  $\Delta P$  (οι αριθμοί τελειών που βρίσκονται σε κάθε θέση).

Ακόμα το  $N$  αποτελεί το σύνολο των μη αρνητικών ακεραίων αριθμών. Η τομή των συνόλων των θέσεων και των μεταβάσεων είναι το κενό σύνολο ( $P \cap T = \emptyset$ ), ενώ η ένωση τους ορίζει το σύνολο  $V$  των κόμβων του δικτύου  $P \cup T = V$ .

#### 4.2.5 ΕΤΟΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ ΜΕΤΑΒΑΣΕΩΝ

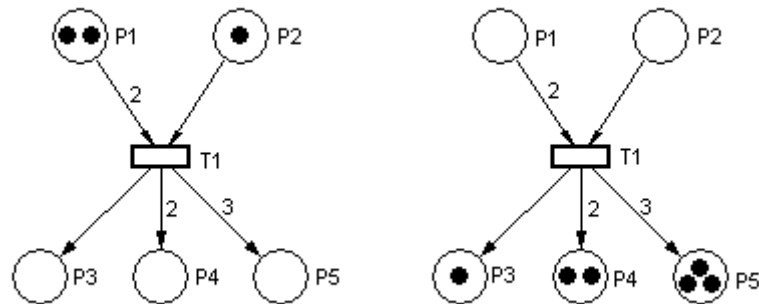
Στα Συνήθη Δίκτυα Petri μια μετάβαση λέμε ότι είναι σε ετοιμότητα όταν όλες οι θέσεις εισόδου της περιέχουν τουλάχιστον μια τελεία. Γενικά, μια μετάβαση τίθεται σε ετοιμότητα όταν όλες οι θέσεις εισόδου περιέχουν αριθμό από τελείες μεγαλύτερο ή ίσο των βαρών των αντίστοιχων τόξων σύνδεσης της μετάβασης με τις θέσεις εισόδου. Σε συνέχεια μια ενεργοποιημένη μετάβαση μπορεί να πυροδοτηθεί ανά πάσα στιγμή. Όταν πυροδοτούνται, τα διακριτικά στις θέσεις εισόδου μετακινούνται σε θέσεις εξόδου, σύμφωνα με τα βάρη τόξου και τις χωρητικότητες θέσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια νέα σήμανση του δικτύου, μια περιγραφή της κατάστασης όλων των θέσεων, όπως ακριβώς αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.2.





Εικόνα 4.2 Παράδειγμα πυροδότησης δικτύου Petri [79]

Βέβαια ενδέχεται τα τόξα να έχουν διαφορετικά βάρη και τότε παρατηρούνται διαφορές στο δίκτυο (Εικόνα 4.3). Όταν ενεργοποιείται μια μετάβαση, παίρνει τις τελείες (tokens) που την ενεργοποίησαν από τα σημεία εισαγωγής. Στη συνέχεια τις διανέμει σε θέσεις εξόδου σύμφωνα με τα βάρη τόξου. Εάν τα βάρη τόξων είναι όλα τα ίδια, φαίνεται ότι τα διακριτικά μετακινούνται κατά τη μετάβαση. Εάν διαφέρουν, ωστόσο, φαίνεται ότι τα διακριτικά ενδέχεται να εξαφανιστούν ή να δημιουργηθούν. Αυτό συμβαίνει στην πραγματικότητα. Σκεφτείτε τη μετάβαση ως αφαίρεση των διακριτικών ενεργοποίησης και παραγωγή διακριτικών εξόδου σύμφωνα με το βάρος τόξου.



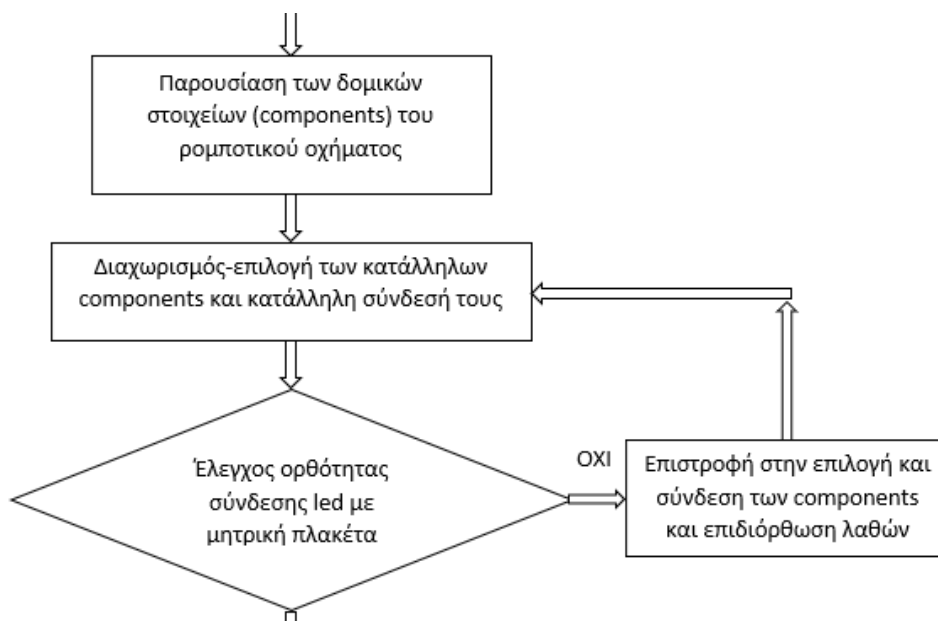
Εικόνα 4.3 Παράδειγμα πυροδότησης δικτύου Petri με διαφορετικά βάρη τόξων [79]

Από την άλλη μια μετάβαση σε ετοιμότητα μπορεί και να μην ενεργοποιείται, όπως για παράδειγμα όταν περισσότερες από μια μεταβάσεις έχουν μια κοινή θέση εισόδου, η οποία περιέχει μια μόνο τελεία. Στην πράξη, το φαινόμενο αυτό είναι σύνηθες σε προβλήματα κατανομής κοινών πόρων σε ένα σύστημα και σε προβλήματα αμοιβαία αποκλεισμένων γεγονότων.

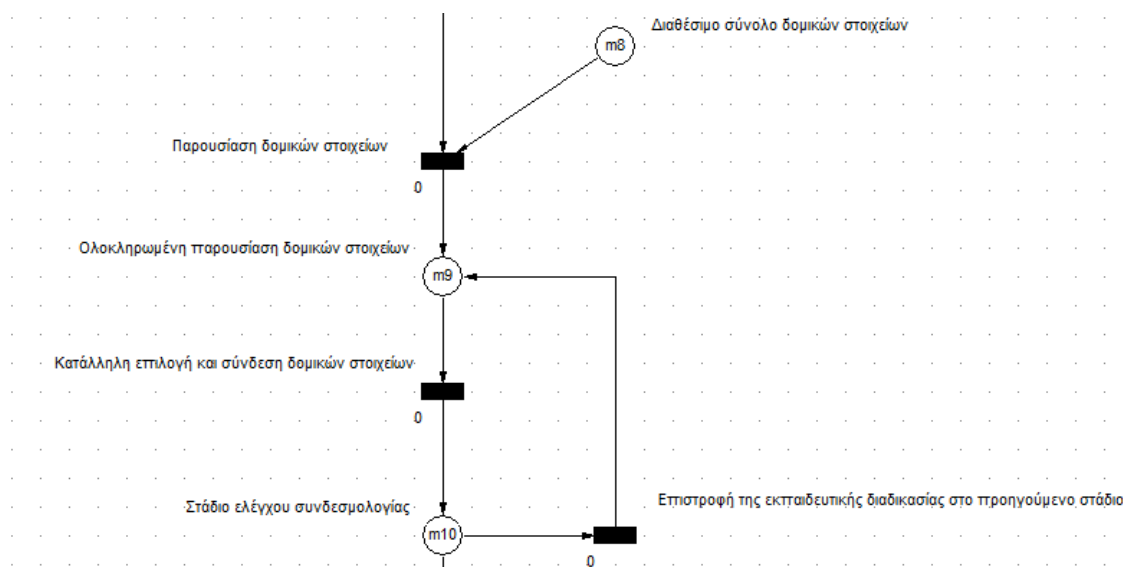
### 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΔΙΚΤΥΑ PETRI

Όπως προαναφέρθηκε για την αναπαράσταση της εκπαιδευτικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν τα δίκτυα Petri, λόγω της ιδιότητας τους ως εργαλείο ανάλυσης και της εύκολης κατανόησης τους από τον αναγνώστη. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη των δικτύων Petri, τα συνήθη δίκτυα Petri, που αποτελούν το βασικό μοντέλο το οποίο αναπαριστά ακολουθίες εκτέλεσης διακριτών γεγονότων, καθώς και τις λογικές συνδέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών μερών του υπό μελέτη συστήματος και τα χρονικά διαγράμματα Petri, που αποτελούν μια από τις επεκτάσεις των συνήθων δικτύων Petri και χρησιμοποιούνται για την ποσοτική ανάλυση αποδοτικότητας και τον έλεγχο αξιοπιστίας συστημάτων στο πέρασμα του χρόνου.

Στη συνέχεια για την δική μας διευκόλυνση η μοντελοποίηση έγινε αρχικά σε απλά διαγράμματα ροής, τα οποία στη συνέχεια μετατράπηκαν σε διαγράμματα Petri. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η παραπάνω προσέγγιση, στην Εικόνα 4.4 αποτυπώνεται ένα μέρος του διαγράμματος ροής του υπό μελέτη παραδείγματος-προβλήματος της εκπαιδευτικής διαδικασίας (θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενες παραγράφους), καθώς και η αντίστοιχη αναλυτικότερη τροποποίηση του σε δίκτυο Petri (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.4 Κομμάτι διαγράμματος ροής προβλήματος εκπαιδευτικής διαδικασίας



Εικόνα 4.5 Κομμάτι δικτύου Petri προβλήματος εκπαιδευτικής διαδικασίας

Συγκεκριμένα στο κομμάτι αυτό περιγράφεται το στάδιο συνδεσμολογίας ενός ρομποτικού οχήματος βάσει των απαιτήσεων του δοθέντος προβλήματος. Παρουσιάζεται, αρχικά το διαθέσιμο σύνολο των δομικών στοιχείων του ρομποτικού οχήματος (το οποίο αποτελεί παθητικό μέρος του συστήματος και αποτυπώνεται στην εικόνα με κύκλο), στη συνέχεια γίνεται η παρουσίασή τους από τον καθηγητή στους συμμετέχοντες στην εκπαιδευτική διαδικασία μαθητές (το οποίο αποτελεί μια ενέργεια και γι αυτό αποτυπώνεται με τετραγωνάκι που υποδηλώνει μετάβαση) και μετά έχουμε την ολοκλήρωση της παρουσίασης (το οποίο αποτελεί μια κατάσταση που έχει περιέλθει το σύστημα και αποτυπώνεται με κυκλάκι που υποδηλώνει μέρος).

Στη συνέχεια ακολουθεί η κατάλληλη επιλογή και σύνδεση των δομικών στοιχείων από τους συμμετέχοντες μαθητές (υποδηλώνει μια ενέργεια και αποτυπώνεται με τετράγωνο) και το στάδιο ελέγχου της συνδεσμολογίας (αποτελεί μια κατάσταση του συστήματος και αποτυπώνεται με κύκλο). Τέλος βλέπουμε ότι σε περίπτωση λανθασμένης σύνδεσης των δομικών στοιχείων οδηγούμαστε στην επιστροφή της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο προηγούμενο στάδιο της (υποδηλώνει την ενέργεια της επιστροφής και αποτυπώνεται στην εικόνα με τετράγωνο), έτσι ώστε να επαναληφθεί έως ότου το αποτέλεσμα να είναι το επιθυμητό.

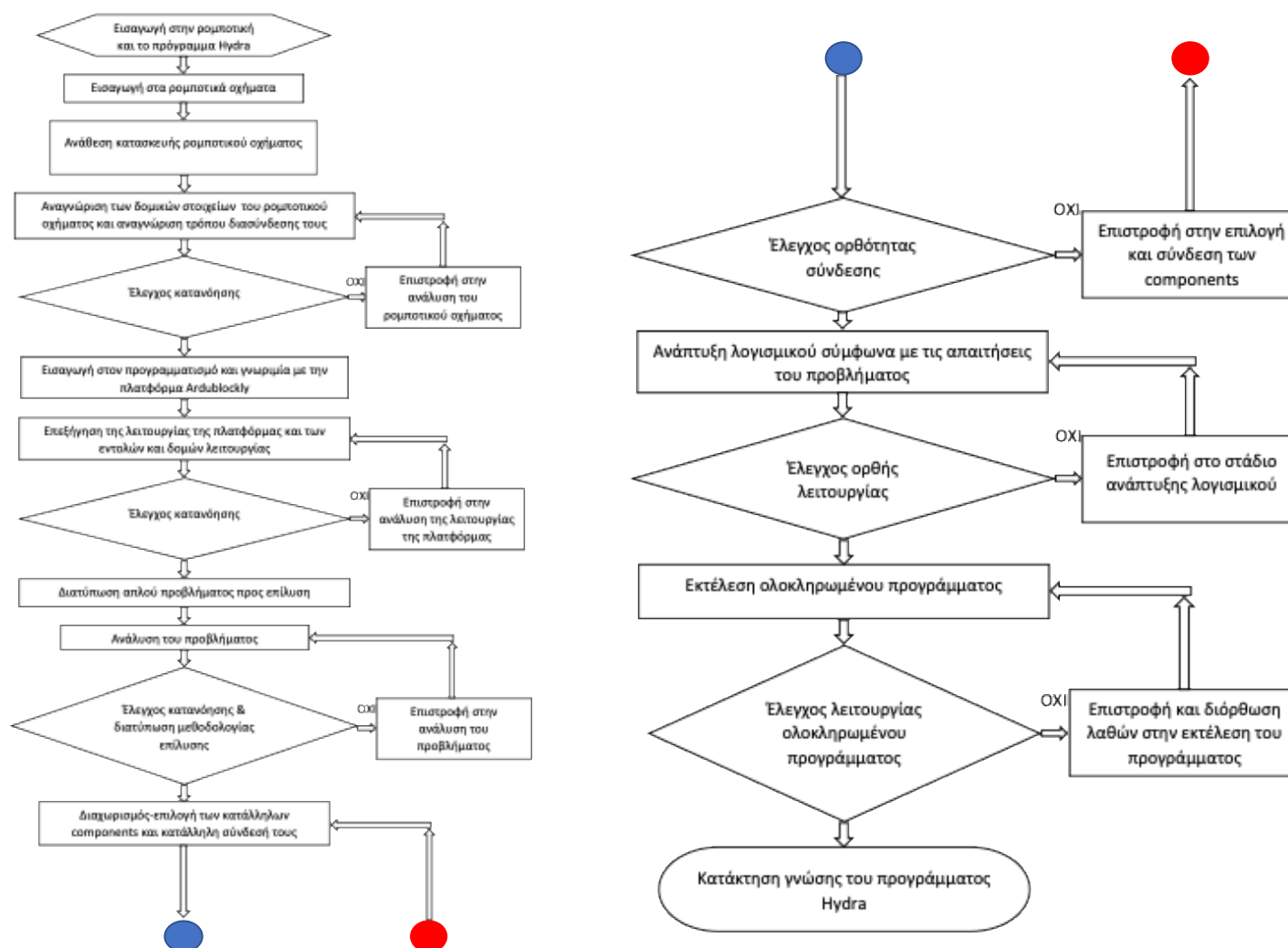
## 4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΗΘΗ ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Για την μοντελοποίηση της εκπαιδευτικής διαδικασίας του προγράμματος Hydra αρχικά επιστρατεύτηκαν τα διαγράμματα ροής, σκοπός των οποίων ήταν η δική μας διευκόλυνση για την μετέπειτα ανάπτυξη των δικτύων Petri. Το περιεχόμενο των δικτύων Petri που δημιουργήθηκαν αποτελεί μια ακόμα πιο λεπτομερής αναπαράσταση του περιεχομένου-ροής της εκπαιδευτικής διαδικασίας που παρουσιάζεται στα διαγράμματα ροής, εξαιτίας της ιδιότητας του ως ένα εξαιρετικό εργαλείο ανάλυσης, αλλά και της σαφήνειας και ευκολίας ανάγνωσης-κατανόησης που αυτά προσφέρουν.

### 4.4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Τα διαγράμματα ροής που κατασκευάστηκαν για του σκοπούς της εκπαιδευτικής διαδικασίας είναι δύο. Το πρώτο διάγραμμα περιγράφει το σύνολο της εκπαιδευτικής διαδικασίας σε διαδοχικά βήματα από την εκκίνησή της έως την εκπλήρωση του τελικού στόχου, ο οποίος δεν είναι άλλος από την κατάκτηση της γνώσης του προγράμματος Hydra και των πολλαπλών γνώσεων και οφελών που αυτό προσδίδει στον συμμετέχοντα. Παράλληλα το δεύτερο διάγραμμα ροής που κατασκευάστηκε απευθύνεται στην πρακτική άσκηση των συμμετεχόντων μέσω της επίλυσης ενός απλού προβλήματος που βασίζεται στις γνώσεις που έχουν αποκομίσει από τα προηγούμενα στάδια της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Σημειώνεται ότι το σχετικό υλικό καλύπτει μια διδακτική ενότητα και όχι μόνο 2 σχετικά μαθήματα. Το πως θα παρουσιαστεί, εξαρτάται από τις δεξιότητες και το επίπεδο των μαθημάτων, καθώς και από τη προσέγγιση του εκπαιδευτικού. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί μια προσέγγιση, που βοηθά τον εκπαιδευτικό να οργανώσει το μάθημα και να παρακολουθήσει τη ροή του με ένα συστηματικό τρόπο, προβαίνοντας σε όλες τις αναγκαίες ενέργειες κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Το σχετικό φυσικό σύστημα, που χρησιμοποιείται, πεγράφεται αναλυτικά στο [71].

Στη Εικόνα 4.6 παρουσιάζεται και αναλύεται το Γενικό Διάγραμμα Ροής της εκπαιδευτικής διαδικασίας για το στάδιο εκμάθησης της πλατφόρμας Hydra. Πρόκειται για μια αναγκαία διαδικασία, πριν οι μαθητές προχωρήσουν στην ανάπτυξη πολύπλοκων και πλήρως λειτουργικών πρωτοτύπων.

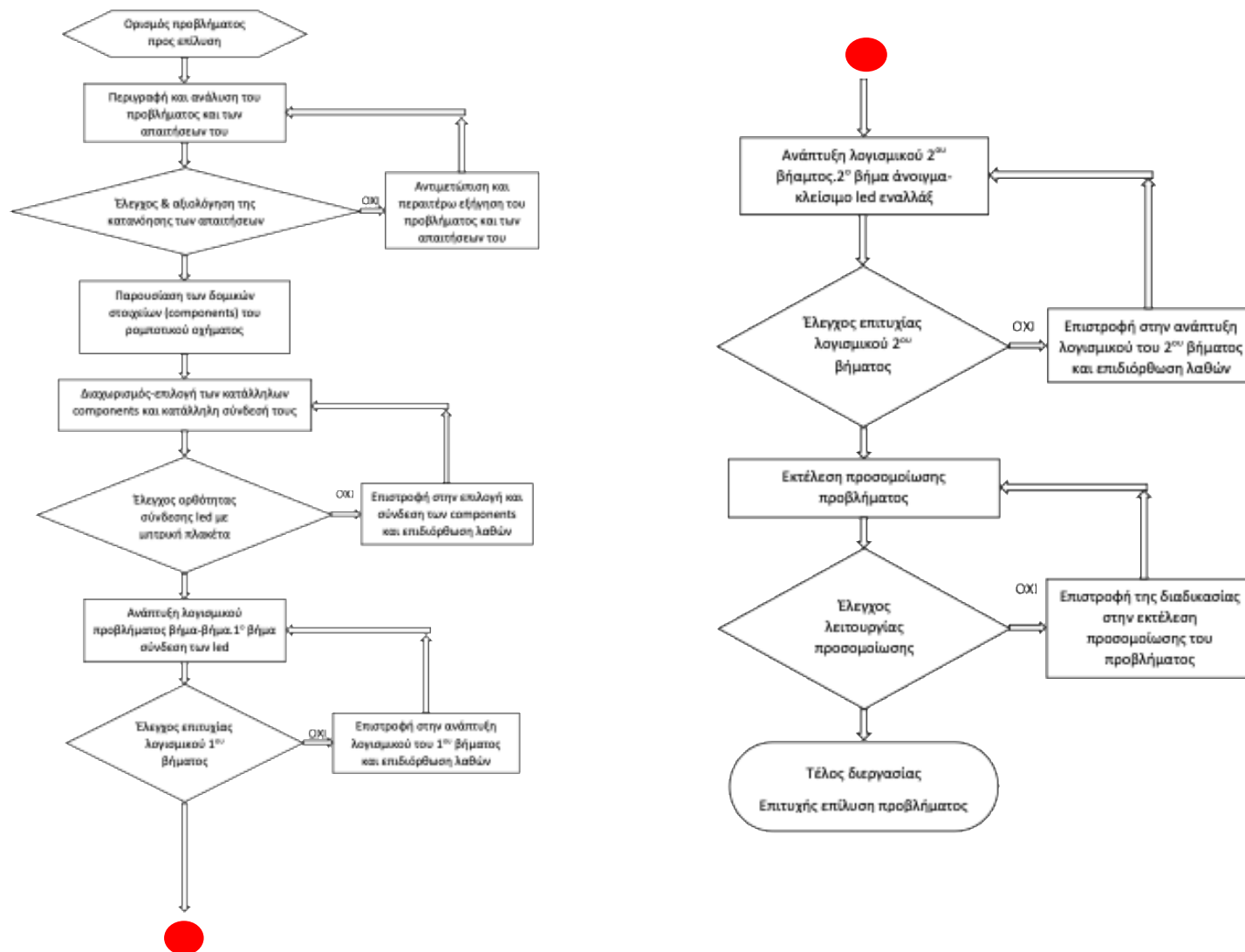


Εικόνα 4.6 Γενικό Διάγραμμα Ροής εκπαιδευτικής διαδικασίας

Το γενικό διάγραμμα ροής περιγράφει το σύνολο της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Στα πρώτα βήματα γίνεται εισαγωγή στη πλατφόρμα Hydra, στη ρομποτική και τα ρομποτικά οχήματα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το project που είναι η κατασκευή ενός ρομποτικού οχήματος, μαζί με τα σχετικά δομικά του στοιχεία (κομμάτια που αποτελείται) και των προβλεπόμενων θυρών σύνδεσης αυτών. Τέλος γίνεται έλεγχος κατανόησης της ανάλυσης του ρομποτικού οχήματος, όπου αν είναι επιτυχής ολοκληρώνεται το κομμάτι του hardware, ενώ σε περίπτωση αποτυχίας η διαδικασία επιστρέφει στο στάδιο της ανάλυσης του ρομποτικού οχήματος.

Στη συνέχεια μετά το πέρας του ελέγχου κατανόησης του hardware οι συμμετέχοντες εισάγονται στον προγραμματισμό και την πλατφόρμα Ardublockly. Ακολουθεί η επεξήγηση της λειτουργίας της πλατφόρμας και των δομών και εντολών λειτουργίας της και αντιστοίχως με το πρώτο μέρος γίνεται έλεγχος κατανόησης, όπου αν είναι επιτυχής ολοκληρώνεται το κομμάτι του software, ενώ σε περίπτωση αποτυχίας η διαδικασία επιστρέφει στο στάδιο της επεξήγησης της λειτουργίας της πλατφόρμας. Μετά το πέρας της γνωριμίας-εκμάθησης των κομματιών του hardware και software, οι συμμετέχοντες καλούνται να επιλύσουν το πρόβλημα που τους δίνεται ακολουθώντας τα βήματα που διδάχθηκαν. Αρχικά γίνεται η ανάλυση του προβλήματος και έπειτα γίνεται ο έλεγχος κατανόησης του και διατυπώνεται η μεθοδολογία επίλυσης. Σε περίπτωση που το πρόβλημα, καθώς και ο τρόπος επίλυσης του δεν έχει γίνει κατανοητός η διαδικασία επιστρέφει στην ανάλυση του προβλήματος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση συνεχίζει στο επόμενο στάδιο.

Στο επόμενο στάδιο οι συμμετέχοντες καλούνται να επιλέξουν τα κατάλληλα κομμάτια σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προβλήματος και να τα συνδέσουν σωστά. Έπειτα γίνεται έλεγχος της ορθότητας των επιλογών και συνδέσεων των component, όπου σε περίπτωση λάθους επιστρέφει η διαδικασία στο κομμάτι της συναρμολόγησης, ενώ αν η διαδικασία είναι επιτυχής συνεχίζεται με το κομμάτι της ανάπτυξης λογισμικού. Στο κομμάτι αυτό οι συμμετέχοντες καλούνται να αναπτύξουν λογισμικό βάσει των απαιτήσεων του προβλήματος, του οποίου η ορθότητα ελέγχεται και σε περίπτωση λάθους επιστρέφεται η διαδικασία στην αρχή της (δηλαδή ανάπτυξη λογισμικού από την αρχή), ενώ σε περίπτωση επιτυχίας ολοκληρώνεται το κομμάτι του software και η διαδικασία προχωράει στο τελευταίο της κομμάτι. Το τελευταίο κομμάτι της εκπαιδευτικής διαδικασίας αντιστοιχεί στην εκτέλεση του ολοκληρωμένου πλέον προγράμματος (λειτουργία hardware και software μαζί), όπου γίνεται έλεγχος της λειτουργίας του και σε περίπτωση σφάλματος η διαδικασία εκτέλεσης του επαναλαμβάνεται, ενώ σε περίπτωση επιτυχίας ολοκληρώνεται η εκπαιδευτική διαδικασία με επιτυχία. Σε συνέχεια του πρώτου διαγράμματος κατασκευάστηκε ένα δεύτερο διάγραμμα ροής ενός απλού προβλήματος (Εικόνα 4.7), το οποίο αποτελεί ενδεικτικό τρόπο επίλυσης για κάθε πιθανό πρόβλημα.



Εικόνα 4.7 Διάγραμμα Ροής Προβλήματος

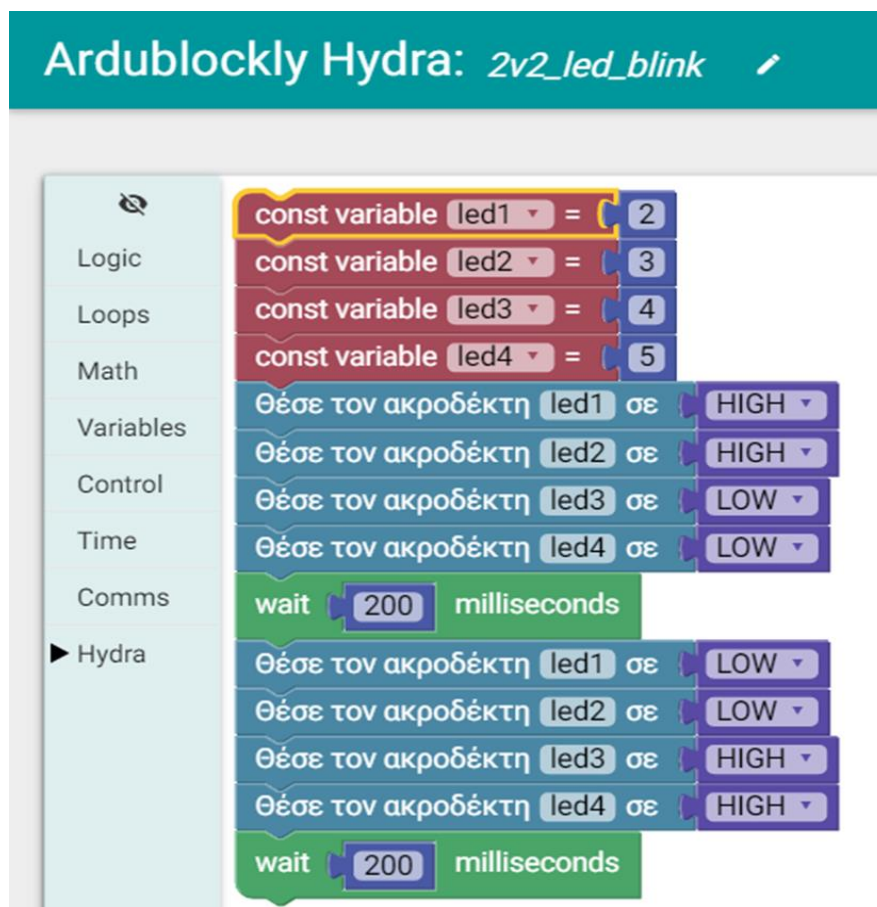
Στο διάγραμμα αποτυπώνονται τα βήματα για την λύση ενός συγκεκριμένου απλού προβλήματος. Το πρόβλημα αναφέρεται στην κατασκευή ενός τμήματος του ρομπότ, όπου τελικός στόχος είναι το άνοιγμα-κλείσιμο των led εναλλάξ κατά την προσομοίωση της διαδικασίας. Αρχικά ορίζεται το πρόβλημα στους συμμετέχοντες και ακολουθεί η ανάλυση του και ο καθορισμός των απαιτήσεων του. Μετά το πέρας της ανάλυσης πραγματοποιείται έλεγχος της κατανόησης του προβλήματος και των απαιτήσεων αυτού, όπου σε περίπτωση λάθους η διαδικασία επιστρέφει στο στάδιο της ανάλυσης, ενώ σε περίπτωση όπου ο έλεγχος στεφθεί με επιτυχία η διαδικασία προχωράει στο κατασκευαστικό της μέρος.

Στο στάδιο της κατασκευής αρχικά γίνεται η παρουσίαση των κομματιών του ρομποτικού οχήματος και έπειτα ο διαχωρισμός και η κατάλληλη επιλογή και σύνδεσή τους. Συγκεκριμένα απαιτείται η επιλογή των κομματιών της κεντρικής πλακέτας και του αρθρώματος 4 led που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έλεγχος της επιλογής-σύνδεσης των κομματιών αυτών, όπου σε περίπτωση λάθους η διαδικασία επιστρέφει στο στάδιο της επιλογής και σύνδεσης, ενώ σε περίπτωση επιτυχίας η επίλυση του προβλήματος προχωράει στο στάδιο ανάπτυξης λογισμικού.

Στο στάδιο αυτό η ανάπτυξη του λογισμικού γίνεται σταδιακά σε 2 βήματα. Στο πρώτο βήμα έχουμε την σύνδεση των led στις κατάλληλες θέσεις. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος της ορθότητας του λογισμικού του πρώτου βήματος, όπου αν διαπιστωθούν λάθη η διαδικασία επιστρέφει στην εκ νέου ανάπτυξη λογισμικού για το πρώτο βήμα και σε περίπτωση επιτυχίας συνεχίζεται με την ανάπτυξη λογισμικού του δεύτερου βήματος. Αντίστοιχα στο δεύτερο βήμα γίνεται η ανάπτυξη λογισμικού για το άνοιγμα-κλείσιμο των led εναλλάξ. Έπειτα εκτελείται έλεγχος της ορθότητας του λογισμικού του δεύτερου βήματος, όπου αν υπάρχει σφάλμα η διαδικασία επιστρέφεται στην ανάπτυξη λογισμικού του δεύτερου βήματος, ενώ αν είναι επιτυχής ολοκληρώνεται το κομμάτι της ανάπτυξης λογισμικού του προβλήματος στην πλατφόρμα Ardublockly (Εικόνα 4.8).

Τέλος έχουμε το στάδιο της προσομοίωσης του προβλήματος, όπου σε περίπτωση λάθους επαναλαμβάνεται η εκτέλεση της προσομοίωσης, ενώ σε περίπτωση επιτυχίας ολοκληρώνεται επιτυχώς η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος.



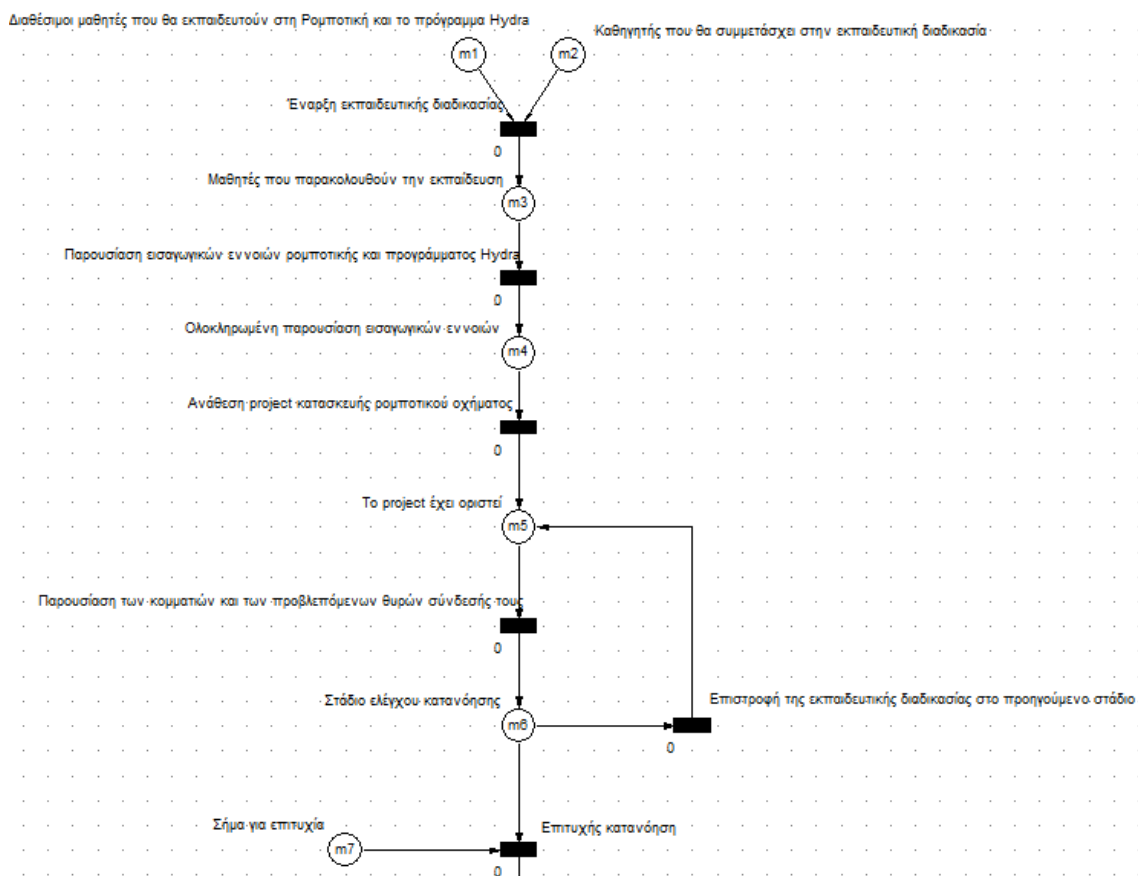


Εικόνα 4.8 Κώδικας λογισμικού προβλήματος

#### 4.4.2 ΣΥΝΗΘΗ ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου αρχικά κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα ροής της εκπαιδευτικής διαδικασίας, ως βοηθητικό εργαλείο για την κατασκευή των δικτύων Petri. Τα συνήθη δίκτυα Petri χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλείο ανάλυσης και προσομοίωσης της εκπαιδευτικής διαδικασίας που περιγράφηκε. Μάλιστα με την χρήση τους γίνεται μια ακόμα πιο λεπτομερής και ενδεδειγμένη περιγραφή-ανάλυση της. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν δύο δίκτυα Petri αντίστοιχα για καθένα από τα διαγράμματα ροής. Έτσι το πρώτο δίκτυο Petri αναφέρεται στο σύνολο του εκπαιδευτικού προγράμματος και το δεύτερο στην διαδικασία επίλυσης ενός συγκεκριμένου προβλήματος.

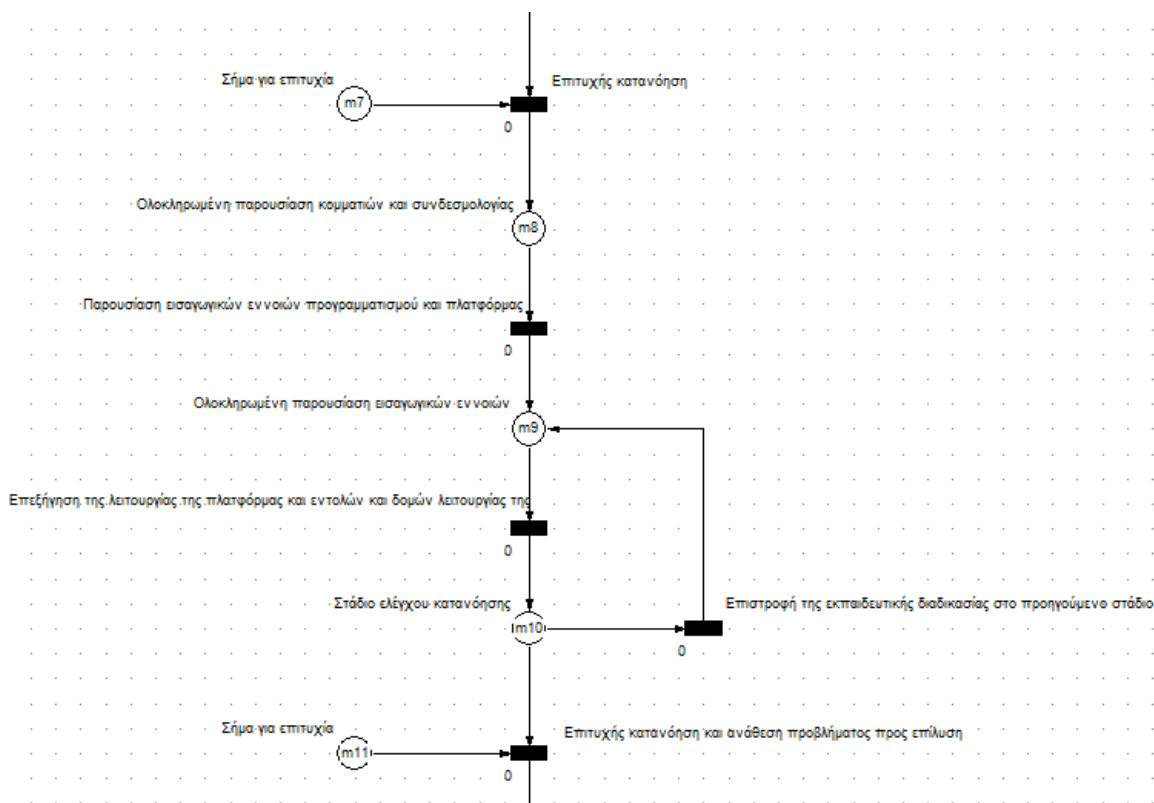
Παρακάτω παρουσιάζεται το πρώτο δίκτυο Petri της συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας, το οποίο αποτελείται από 24 μέρη και 22 μεταβάσεις, είναι χωρίς συγκρούσεις και η εκτέλεση του είναι διαδοχική. Σημειώνεται ότι για χάριν ευκολίας ανάγνωσης τα δίκτυα Petri που δημιουργήθηκαν θα παρουσιαστούν τμηματικά (όλα τα δίκτυα Petri παρατίθενται ολοκληρωμένα στο παράρτημα της εργασίας).



Εικόνα 4.9 Πρώτο τμήμα δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας

Αρχικά πρέπει να επισημάνουμε τα βασικά δομικά στοιχεία των δικτύων Petri, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.7. Οι κύκλοι που αποτυπώνονται στις εικόνες, αποτελούν τα μέρη του δικτύου και περιγράφουν την κατάσταση που βρίσκεται το σύστημα (παθητικά στοιχεία του συστήματος) και τα τετράγωνα αποτελούν τις μεταβάσεις του δικτύου και περιγράφουν τις ενέργειες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα (ενεργητικά στοιχεία του συστήματος).

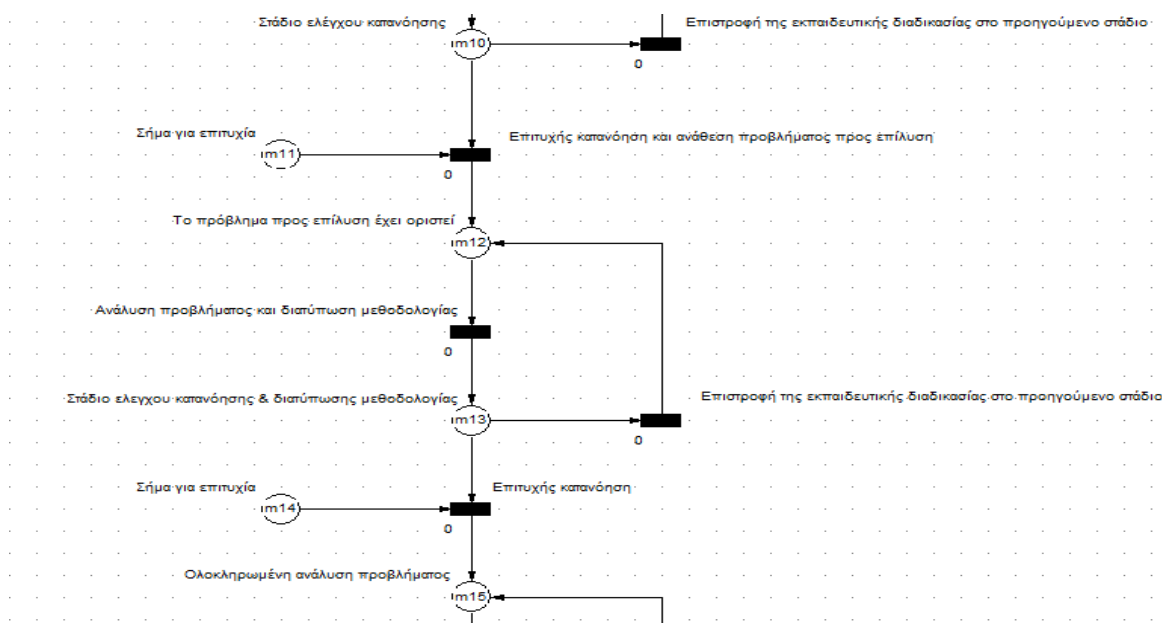
Όπως αποτυπώνεται, στην Εικόνα 4.9, βασική προϋπόθεση για την εκκίνηση της εκπαιδευτικής διαδικασίας αποτελούν οι συμμετέχοντες μαθητές σε αυτήν καθώς και ο αρμόδιος καθηγητής που θα συμμετέχει-επιβλέπει και καθοδηγεί την διαδικασία. Επομένως έπειτα έχουμε την εκκίνηση της εκπαιδευτικής οι μαθητές εισάγονται στις βασικές έννοιες της ρομποτικής και του προγράμματος Hydra και μετά το τέλος αυτών ορίζεται το project που είναι η κατασκευή ενός ρομποτικού οχήματος. Στη συνέχεια γίνεται η παρουσίαση των κομματιών του ρομποτικού οχήματος και των προβλεπόμενων θυρών σύνδεσής, όπου στο στάδιο αυτό διενεργείται έλεγχος κατανόησης τους, όπου είτε είναι επιτυχής και συνεχίζεται η διαδικασία είτε είναι λάθος και η διαδικασία επιστρέφει στο προηγούμενο στάδιο.



Εικόνα 4.10 Δεύτερο τμήμα δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας

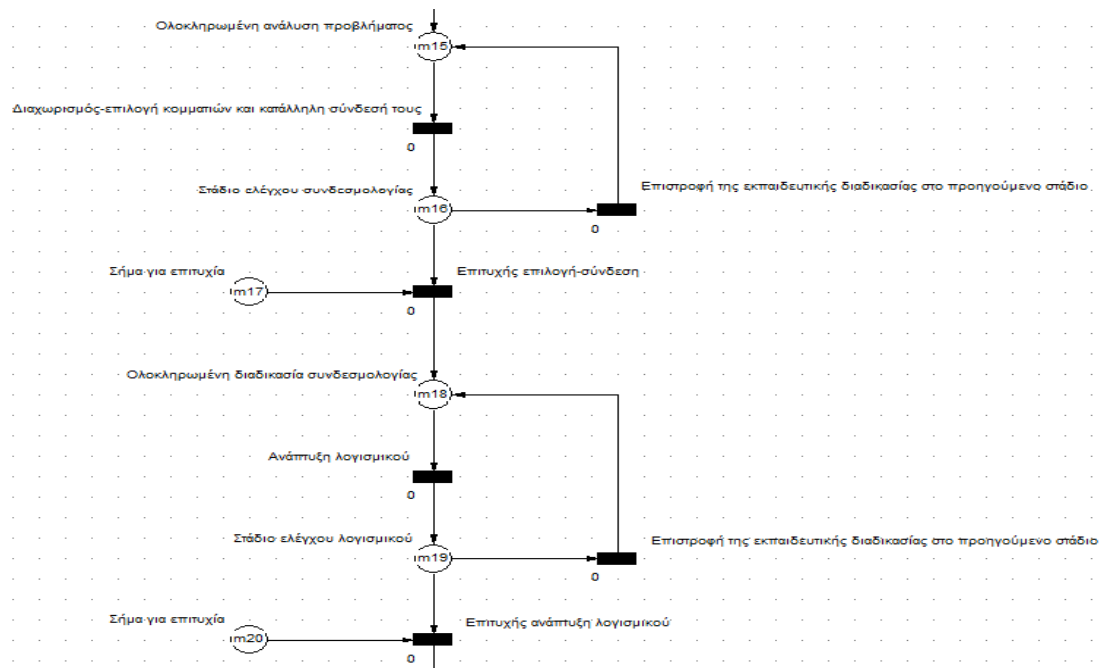
Στο δεύτερο τμήμα του δικτύου (Εικόνα 4.10), έπειτα από την επιτυχία και την ολοκλήρωση της παρουσίασης των κομματιών και της συνδεσμολογίας τους οι μαθητές εισάγονται στις έννοιες του προγραμματισμού και της πλατφόρμας. Στο στάδιο αυτό διενεργείται εκ νέου έλεγχος κατανόησης, όπου η διαδικασία είτε προχωρά είτε επαναλαμβάνεται ανάλογα με τα αποτελέσματα.

Αν διαδικασία στεφθεί με επιτυχία τότε οι μαθητές καλούνται να επιλύσουν ένα πρόβλημα που τους ανατίθεται (Εικόνα 4.11), όπου αρχικά γίνεται η ανάλυση και η διατύπωση της εθοδολογίας και ακολούθως διενεργείται έλεγχος της κατανόησης του, όπου σε περίπτωση επιτυχίας η διαδικασία περνάει στο στάδιο επίλυσης, ενώ αν αποτύχει επιστρέφει στο στάδιο της ανάλυσης του προβλήματος.



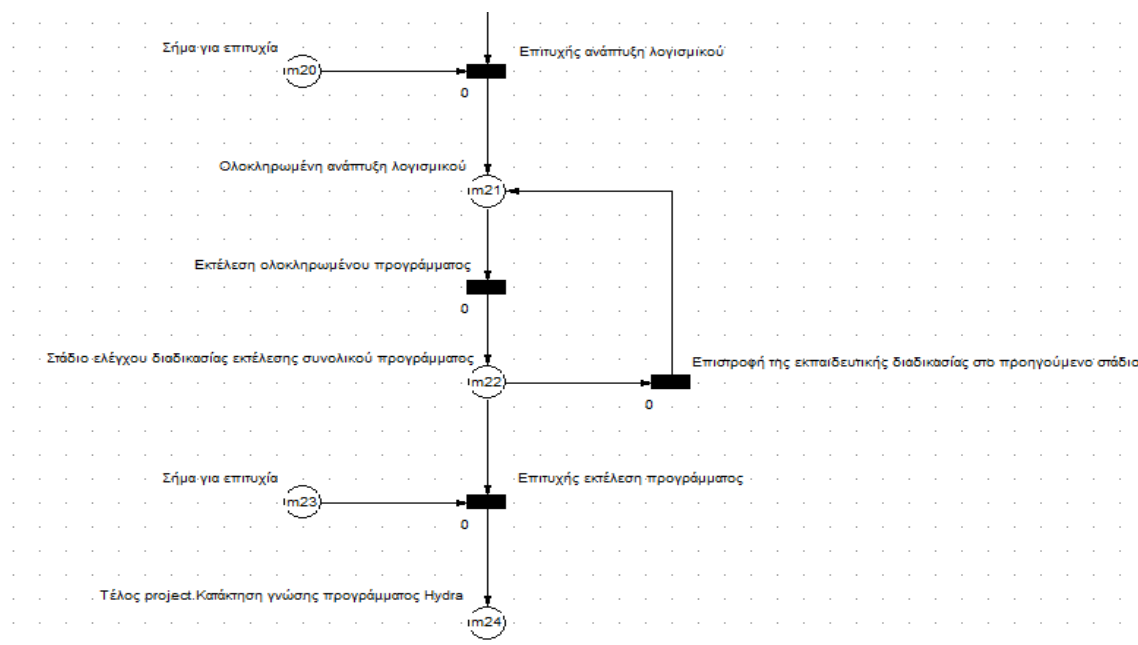
Εικόνα 4.11 Τρίτο τμήμα δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας

Στο στάδιο επίλυσης του προβλήματος αρχικά ο μαθητής καλείται να επιλέξει και να συνδέσει κατάλληλα τα κομμάτια, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Ο καθηγητής διενεργεί έλεγχο της επιλογής-συνδεσμολογίας, όπου είτε η διαδικασία αυτή σε περίπτωση αποτυχίας επαναλαμβάνεται είτε προχωράει στο επόμενο στάδιο της ανάπτυξης λογισμικού, όπου πραγματοποιείται ο αντίστοιχος έλεγχος ορθότητάς του.



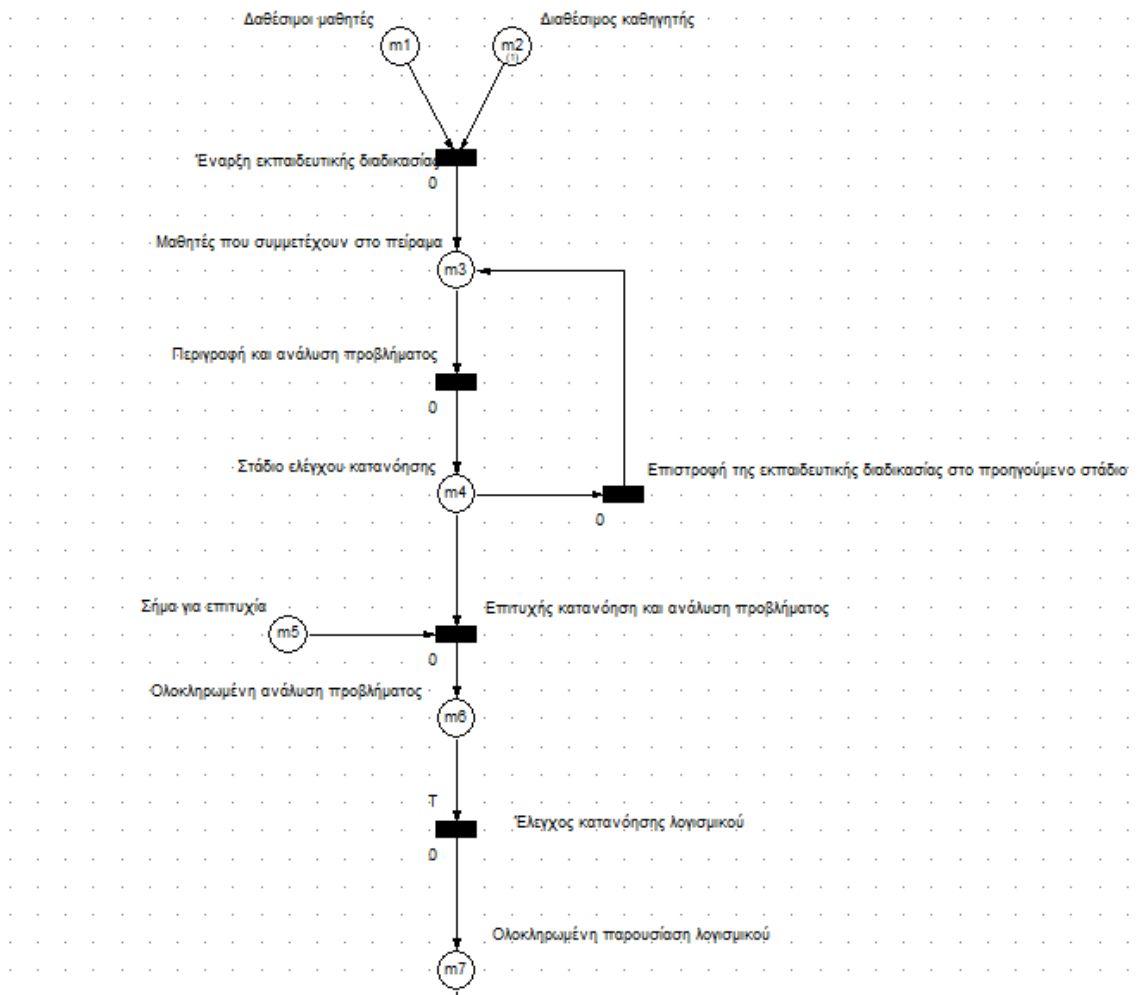
Εικόνα 4.12 Τέταρτο τμήμα δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας

Τέλος όπως αποτυπώνεται στο τελευταίο τμήμα του δικτύου Petri έπειτα από την επιτυχή ανάπτυξη του λογισμικού έχουμε την εκτέλεση του συνολικού προγράμματος, όπου διενεργείται ο τελικός έλεγχος όπου είτε γίνεται επανεκτέλεση του σε περίπτωση σφάλματος είτε ολοκληρώνεται επιτυχώς και οδηγούμαστε στην ολοκλήρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας με την κατάκτηση της γνώσης του προγράμματος Hydra.



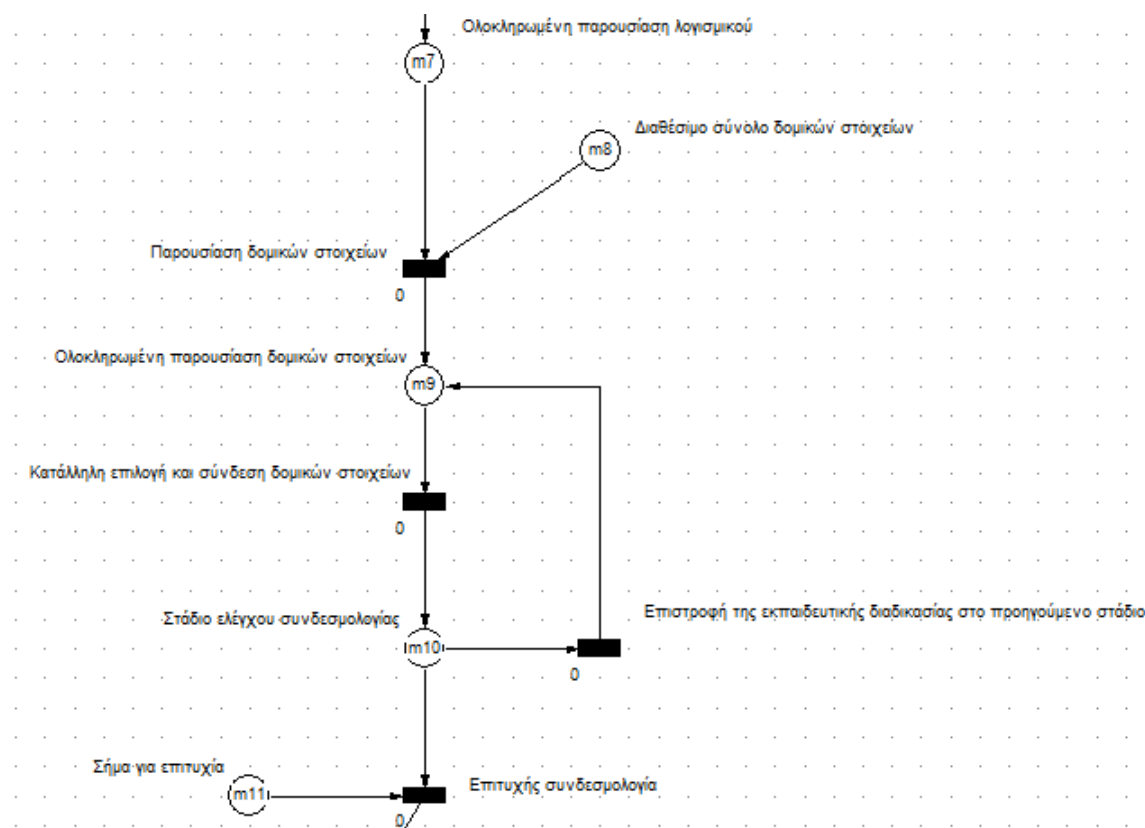
Εικόνα 4.13 Πέμπτο τμήμα δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας

Σε συνέχεια του γενικού δικτύου Petri που παρουσιάστηκε κατασκευάστηκε και το δίκτυο Petri ενός προβλήματος και των διαδοχικών βημάτων επίλυσης του, βάσει του αντίστοιχου διαγράμματος ροής που δημιουργήθηκε. Συγκεκριμένα το πρόβλημα αναφέρεται στην κατασκευή ενός τμήματος του ρομπότ, όπου τελικός στόχος είναι το άνοιγμα-κλείσιμο των led εναλλάξ κατά την προσομοίωση της διαδικασίας, όπως αναφέρεται και παράγραφο 4.4.1, όπου παρουσιάζεται αναλυτικά το αντίστοιχο διάγραμμα ροής. Το δίκτυο Petri αποτελείται από 22 μέρη και 18 μεταβάσεις, είναι χωρίς συγκρούσεις και η εκτέλεση του είναι διαδοχική, όπως και στο δίκτυο του γενικού διαγράμματος.



Εικόνα 4.14 Πρώτο τμήμα δικτύου Petri προβλήματος

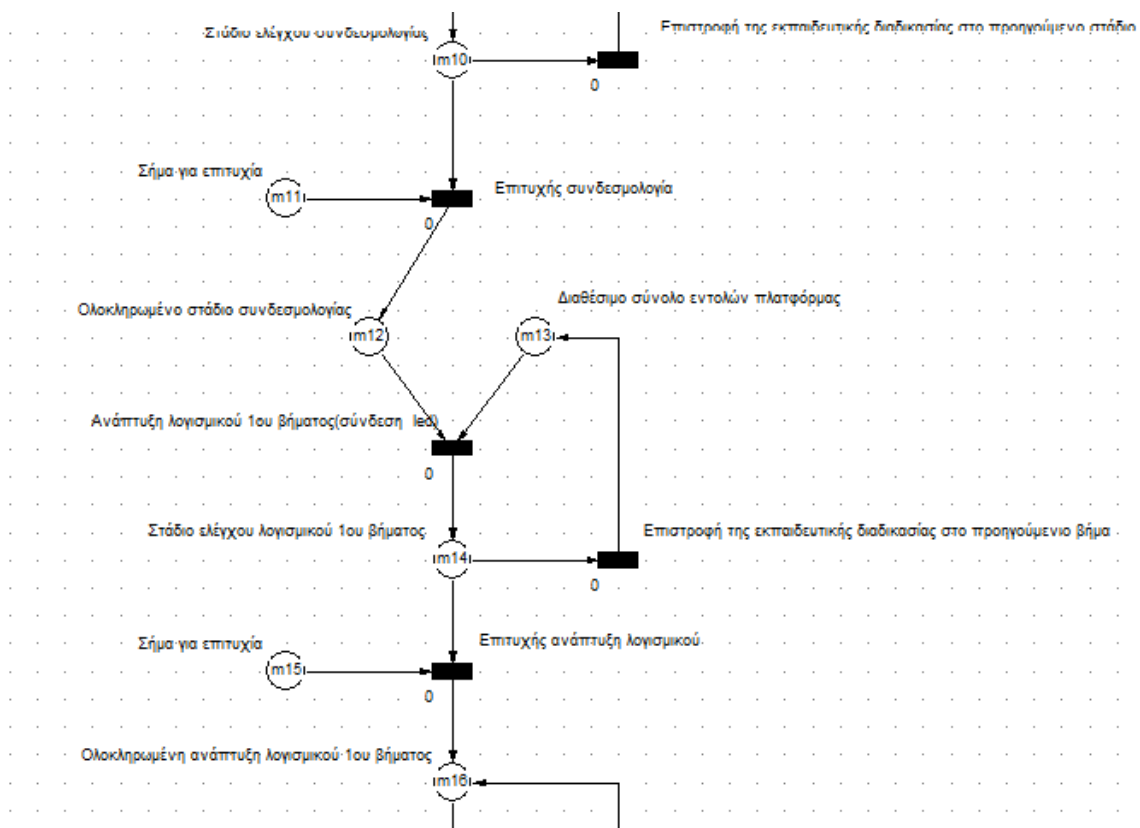
Αρχικά (Εικόνα 4.14), έχουμε την έναρξη της εκπαιδευτικής διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος με την συμμετοχή των μαθητών. Ξεκινώντας την διαδικασία επίλυσης έχουμε την περιγραφή και ανάλυση του προβλήματος, όπου μετά το πέρας τους πραγματοποιείται έλεγχος κατανόησης. Σε περίπτωση που ο έλεγχος δε στεφθεί με επιτυχία η διαδικασία επιστρέφει στην ανάλυση, ενώ αν είναι επιτυχής η διαδικασία προχωράει με τον έλεγχο κατανόησης του λογισμικού και την ολοκλήρωση της παρουσίασης του.



Εικόνα 4.15 Δεύτερο τμήμα δικτύου Petri προβλήματος

Στο δεύτερο τμήμα του δικτύου (Εικόνα 4.15), η διαδικασία εξελίσσεται με το κομμάτι του hardware. Συγκεκριμένα έχουμε την παρουσίαση των διαθέσιμων δομικών στοιχείων, όπου μετά την ολοκλήρωσή της οι συμμετέχοντες καλούνται να επιλέξουν τα κατάλληλα components και να τα συνδέσουν αντίστοιχα. Διενεργείται έλεγχος ορθότητας της συνδεσμολογίας με την διαδικασία να επιστρέφει στην επιλογή και σύνδεση των κομματιών σε περίπτωση έρευνας σφάλματος ειδάλλως να προχωράει στο επόμενο στάδιο.

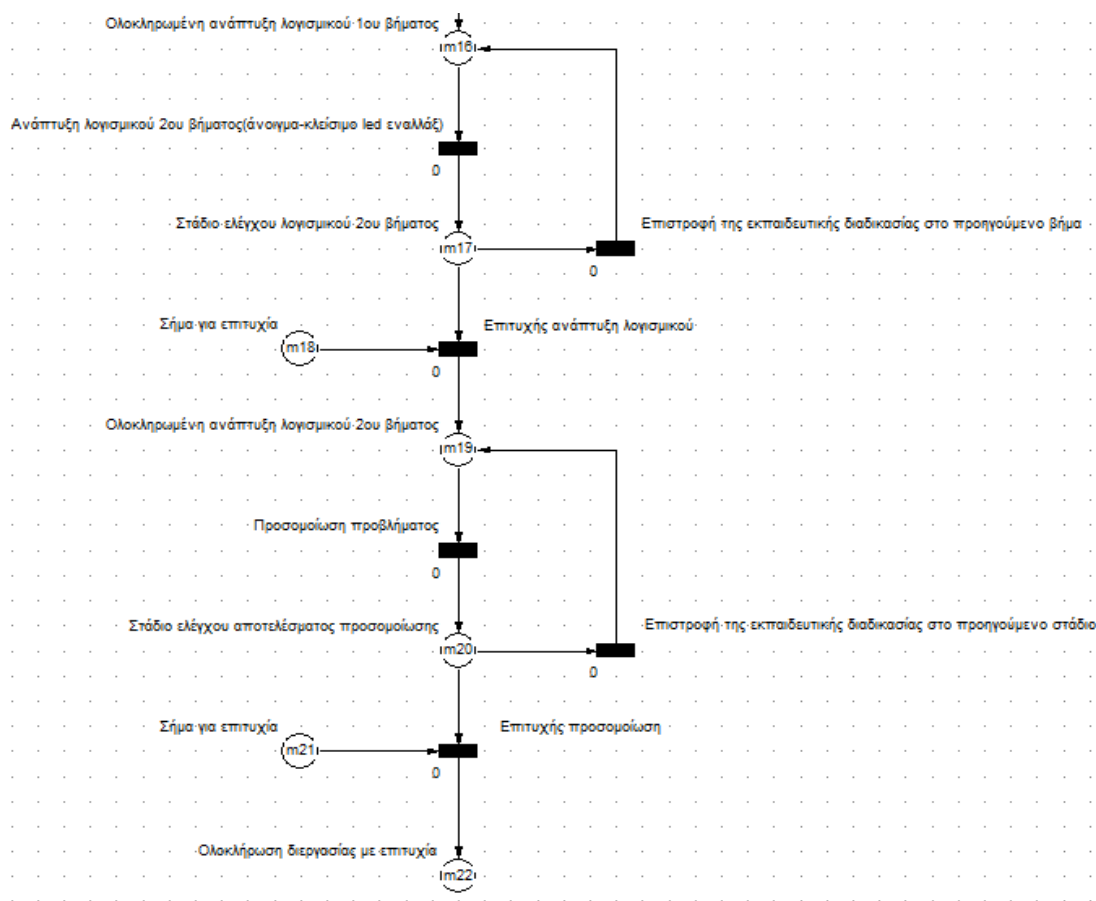
Στο επόμενο στάδιο οι συμμετέχοντες καλούνται να αναπτύξουν κατάλληλο λογισμικό βήμα-βήμα για τις απαιτήσεις του προβλήματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16. Έτσι στο πρώτο βήμα οι μαθητές καλούνται να συνδέσουν τα led με την χρήση των διαθέσιμων εντολών. Με την ολοκλήρωσή τους, ελέγχεται η ορθότητα του λογισμικού, όπου σε περίπτωση αποτυχίας επαναλαμβάνεται και σε περίπτωση επιτυχίας το στάδιο της ανάπτυξης λογισμικού περνάει στο επόμενο βήμα.



Εικόνα 4.16 Τρίτο τμήμα δικτύου Petri προβλήματος

Στο τελευταίο βήμα όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.17, οι συμμετέχοντες μαθητές καλούνται να αναπτύξουν λογισμικό με στόχο το άνοιγμα-κλείσιμο των led εναλλάξ. Στο στάδιο αυτό διενεργείται εκ νέου έλεγχος της ορθότητας του λογισμικού του δεύτερου βήματος που είτε επαναλαμβάνεται σε περίπτωση λάθους, είτε ολοκληρώνεται το κομμάτι του software με την ορθή ανάπτυξη λογισμικού και του τελευταίου βήματος. Τέλος για την ολοκληρωμένη επίλυση του προβλήματος εκτελείτε η προσομοίωση του, όπου είτε επαναλαμβάνεται σε περίπτωση εντοπισμού κάποιου προβληματος, είτε σε περίπτωση επιτυχίας η συνολική διεργασία έρχεται στο πέρας της.





Εικόνα 4.17 Τέταρτο τμήμα δικτύου Petri προβλήματος

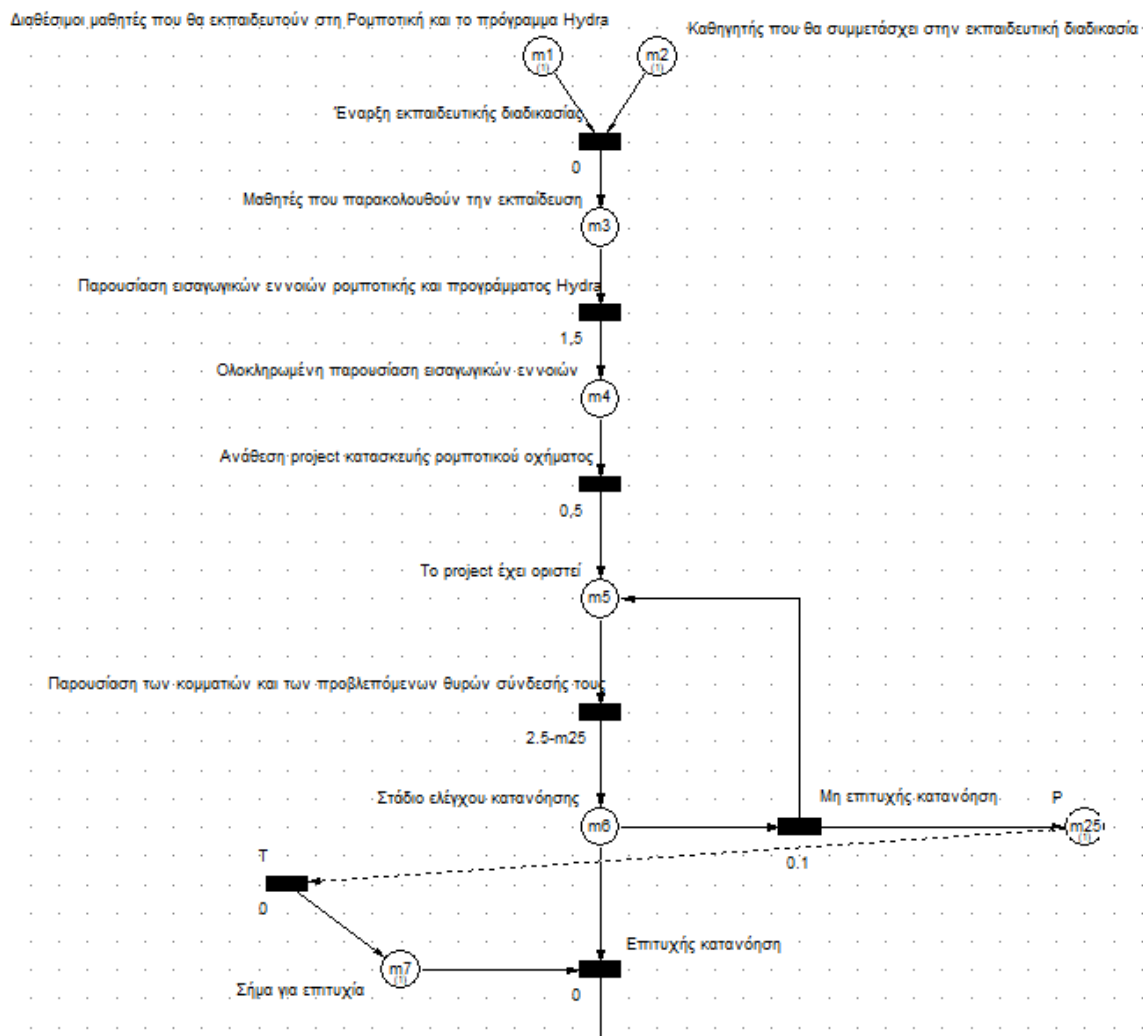
#### 4.4.3 ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα χρονικά δίκτυα Petri της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Τα χρονικά δίκτυα προέρχονται από τα συνήθη δίκτυα Petri που αναλύθηκαν στην προηγούμενα ενότητα, με ορισμένες μετατροπές για λόγους προσαρμοστικότητας, στις διαδικασίες της εκπαιδευτικής πλατφόρμας όπως αυτή σχεδιάστηκε. Βασικός στόχος των χρονικών αυτών δικτύων είναι η παρακολούθηση της εξέλιξης του κατασκευασμένου συστήματος μέσα στο χρονικό πλαίσιο που θα θέσουμε και η ρεαλιστικότερη προσομοίωση του. Με τη προσθήκη του χρόνου ο εκπαιδευτής έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί σωστότερα τη διαδικασία, καθώς λαμβάνει υπόψιν εκτός της λογικής συνέχειας, την ύπαρξη των χρονικών περιορισμών που υπάρχουν κατά την εκπαιδευτική διαδικασία.

Αρχικά παρουσιάζεται το γενικό χρονικό διάγραμμα της διαδικασίας, όπως αυτό προέκυψε βάσει των χρόνων διάρκειας που ανατέθηκαν για την ολοκλήρωση κάθε διεργασίας μέχρι την επίτευξη του τελικού στόχου. Συγκεκριμένα η συνολική διάρκεια του εκπαιδευτικού προγράμματος κάτω από ιδανικές συνθήκες (χωρίς την ανάγκη να επαναληφθεί κάποια διαδικασία) ορίστηκε στις 3 διδακτικές ώρες και αποτελείται από 30

μέρη και 28 μεταβάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για ενδεικτικό χρόνο, που έχει επιλεγεί λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές ανάγκες μιας τάξης αλλά και παράλληλα προσπαθώντας να γίνει χρήση μιας ρεαλιστικής προσέγγισης, προκειμένου να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την προτεινόμενη μεθοδολογία.

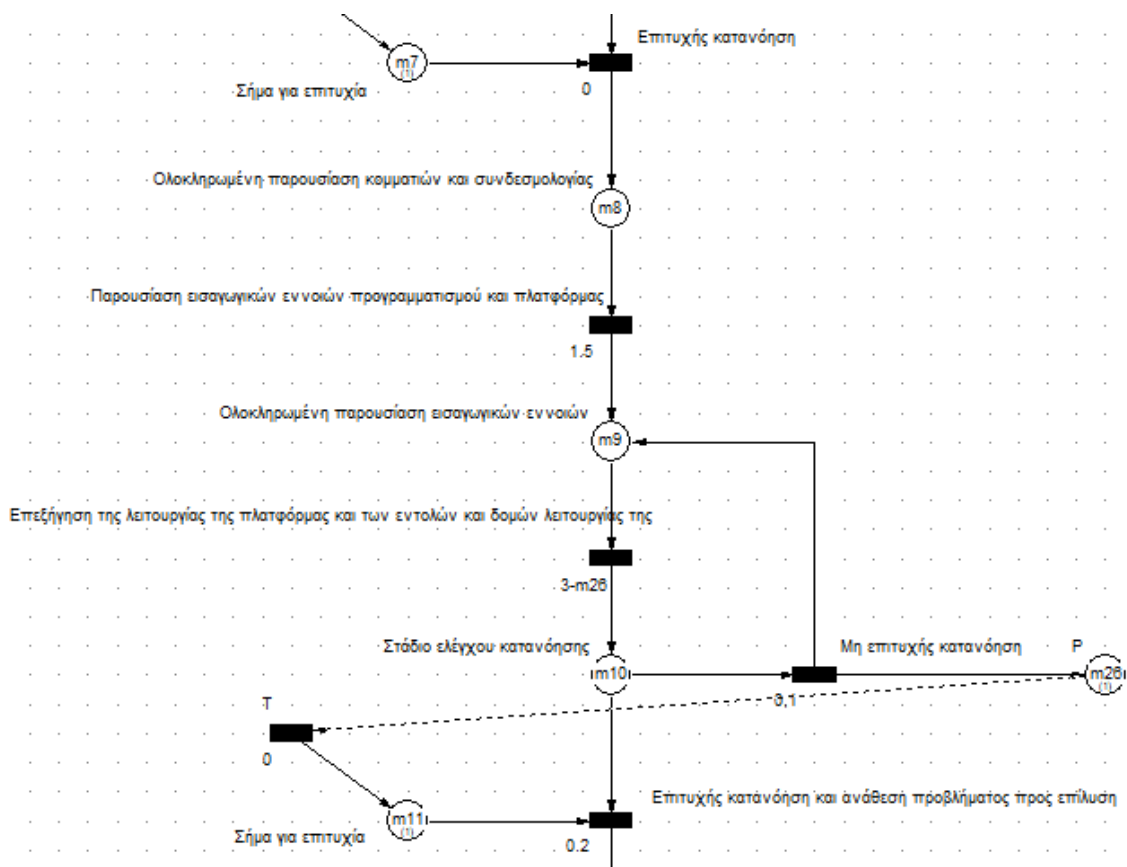
Η αντιστοιχία των χρόνων που αναγράφονται στο διάγραμμα με την πραγματικότητα είναι  $1 \text{ λεπτό} = 0,1 \text{ δευτερόλεπτα χρόνου διαγράμματος}$ .



Εικόνα 4.18 Πρώτο τμήμα χρονικού δικτύου Petri γενικού διαγράμματος

Αρχικά πρέπει να διευκρινήσουμε ότι ο χρόνος διάρκειας κάθε διαδικασίας αποτυπώνεται μόνο στις μεταβάσεις του συστήματος που αποτελούν και τα ενεργητικά του μέρη. Έτσι ξεκινώντας την εκπαιδευτική διαδικασία (Εικόνα 4.18) έχουμε την παρουσίαση των εισαγωγικών εννοιών από τον καθηγητή που διαρκεί 15 λεπτά ( $1,5 \text{ δευτερόλεπτα} = 15 \text{ λεπτά}$ ) και την ανάθεση του project που διαρκεί αντίστοιχα 5 λεπτά ( $0,5 \text{ δευτερόλεπτα} = 5 \text{ λεπτά}$ ). Έπειτα γίνεται η παρουσίαση των κομματιών και των προβλεπόμενων θυρών σύνδεσής τους, γεγονός που διαρκεί 25 λεπτά. Σε περίπτωση που

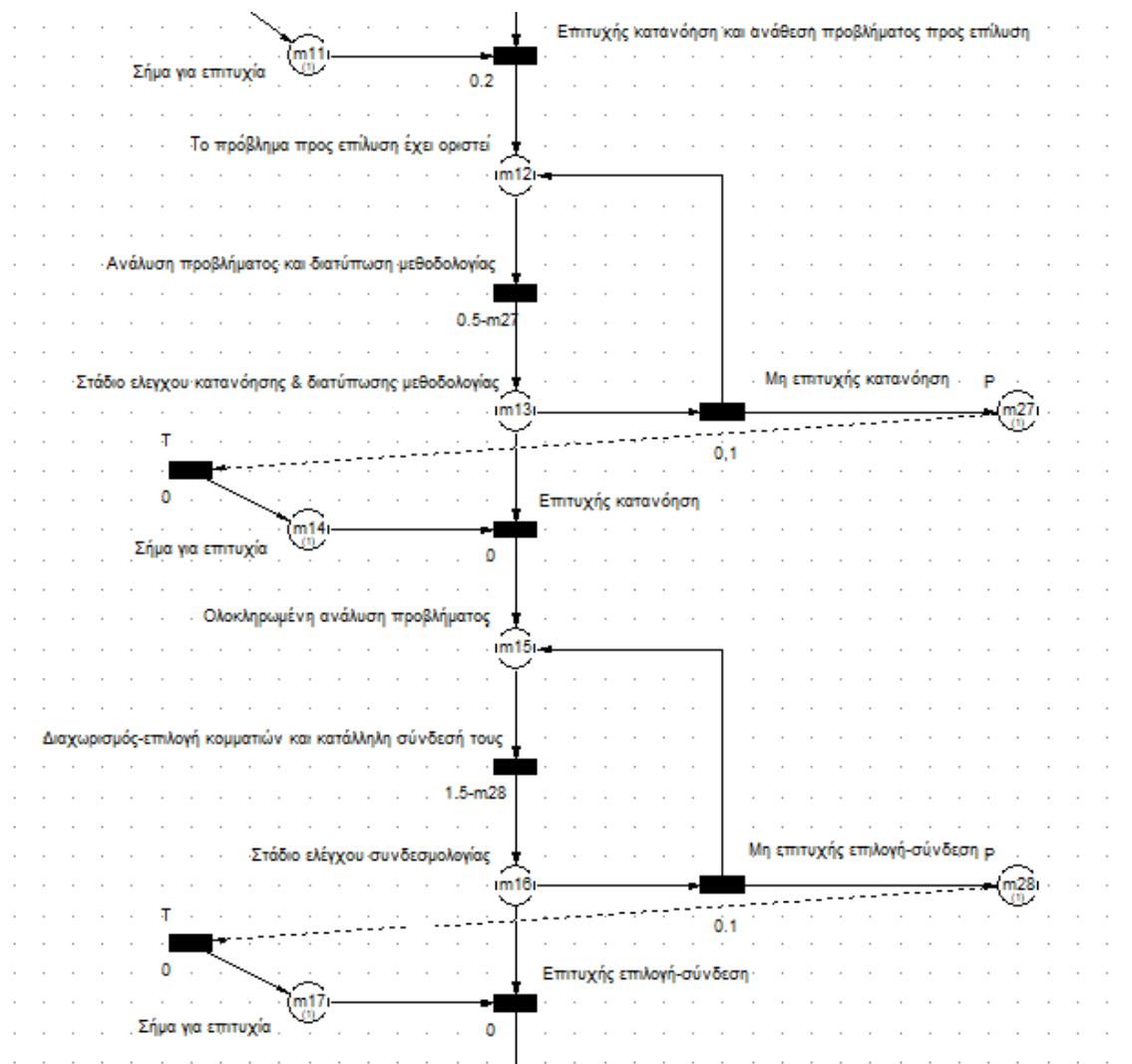
η διαδικασία παρουσίασης των κομματιών και των θυρών δεν είναι επιτυχής, ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m25), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο των 25 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (2,5-m25) και στη συνέχεια οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου (ονομαζόμενου test arrow). Σε περίπτωση όπου ο έλεγχος στεφθεί με επιτυχία τότε η διαδικασία συνεχίζει απρόσκοπτα χωρίς την επανάληψη κάποιας διαδικασίας και ολοκληρώνοντας το κομμάτι της παρουσίασης του hardware.



Εικόνα 4.19 Δεύτερο τμήμα χρονικού δικτύου Petri γενικού διαγράμματος

Στη συνέχεια όπως αποτυπώνεται στο δεύτερο τμήμα του χρονικού δικτύου (Εικόνα 4.19) έχουμε την παρουσίαση των εισαγωγικών εννοιών προγραμματισμού και πλατφόρμας που διαρκεί 15 λεπτά. Ακολουθεί η επεξήγηση της λειτουργίας της πλατφόρμας και των εντολών και δομών λειτουργίας της, διαδικασία συνολικής διάρκειας 30 λεπτών. Σε περίπτωση που ο έλεγχος δεν είναι επιτυχής τότε ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m26), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 30 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (3-m26) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου (ονομαζόμενου test arrow). Αντίστοιχα σε περίπτωση επιτυχίας τότε δεν έχουμε

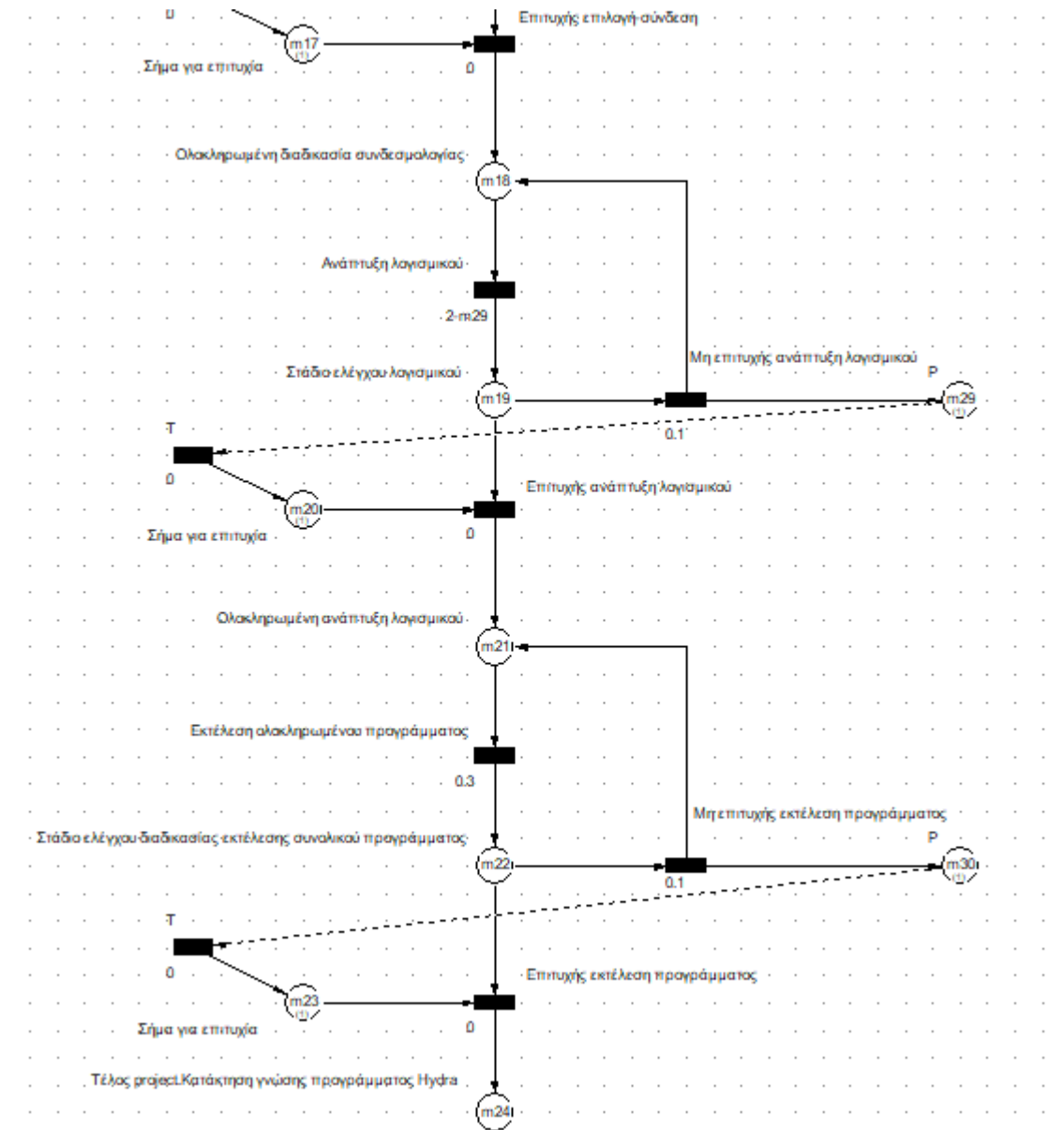
καμιά επανάληψη και η διαδικασία οδηγείται στο επόμενο στάδιο ολοκληρώνοντας το κομμάτι παρουσίασης του software.



Εικόνα 4.20 Τρίτο τμήμα χρονικού δικτύου Petri γενικού διαγράμματος

Στη συνέχεια έπειτα από την επιτυχή ολοκλήρωση όλων των εισαγωγικών εννοιών, η διαδικασία συνεχίζεται με την επίλυση του προβλήματος (Εικόνα 4.20). Αρχικά έχουμε την ανάθεση του προβλήματος που διαρκεί 2 λεπτά. Στο επόμενο στάδιο γίνεται η ανάλυση του και η διατύπωση της μεθοδολογίας που διαρκεί 5 λεπτά και ύστερα διενεργείται έλεγχος. Στην περίπτωση που ο έλεγχος δε στεφθεί με επιτυχία τότε ενεργοποιείται η μεταβλητή P ( $m27$ ), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 5 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση ( $5 - m27$ ) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου. Στην περίπτωση επιτυχίας τότε δεν έχουμε καμιά επανάληψη και η διαδικασία συνεχίζεται με την επιλογή και σύνδεση των κομματιών που δίνεται ο χρόνος των 15 λεπτών. Εδώ αντίστοιχα σε περίπτωση που ο έλεγχος δε στεφθεί με

επιτυχία τότε ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m27), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 15 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (1,5-m27) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, ενώ σε περίπτωση επιτυχίας τότε δεν έχουμε καμιά επανάληψη και η διαδικασία συνεχίζεται.



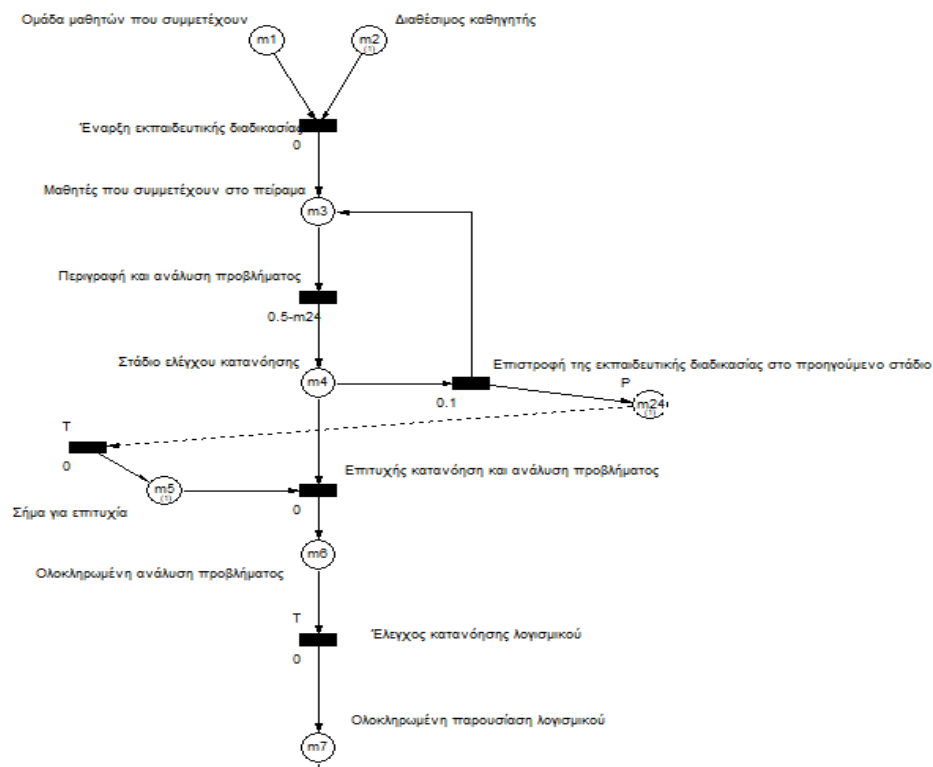
Εικόνα 4.21 Τέταρτο τμήμα χρονικού δικτύου Petri γενικού διαγράμματος

Στο τελευταίο τμήμα του γενικού χρονικού δικτύου (Εικόνα 4.21) μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης, η διαδικασία συνεχίζεται στο κομμάτι ανάπτυξης λογισμικού όπου δίνεται χρόνος 20 λεπτών για την ολοκλήρωση του. Στη συνέχεια διενεργείται έλεγχος, όπου είτε υπάρχει σφάλμα και ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m28), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο

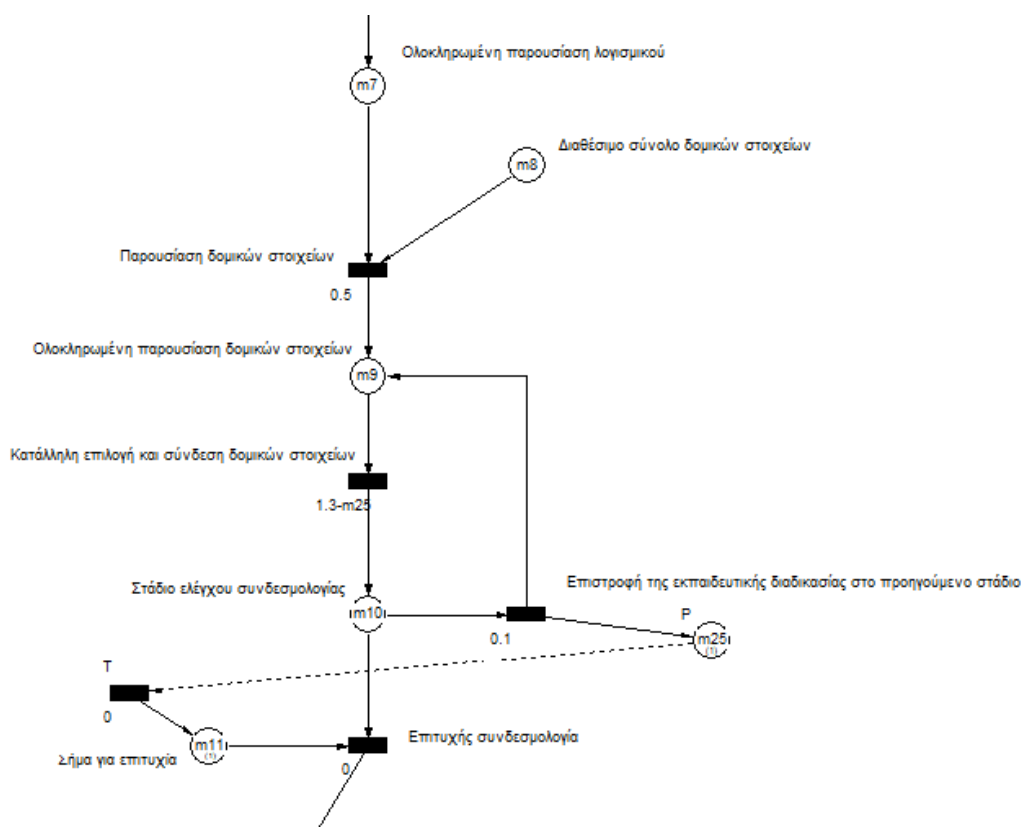
λιγότερο του αρχικού των 20 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (2-m28). Στη συνέχεια οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, είτε είναι επιτυχής εξαρχής και οδηγούμαστε στο τελικό στάδιο της εκτέλεσης του ολοκληρωμένου προγράμματος. Η διάρκεια του σταδίου αυτού ανέρχεται στα 3 λεπτά, όπου σε περίπτωση που προκύψει σφάλμα ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m29) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μια φορά, αλλά η χρονική διάρκεια του είναι η ίδια καθώς τόσο χρόνο απαιτεί η εκτέλεσή του και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, ενώ σε περίπτωση επιτυχίας ολοκληρώνεται η διαδικασία εξοικίωσης με τη πλατφόρμα Hydra.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το χρονικό διάγραμμα της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος ανάπτυξης ενός τμήματος μιας έντροχης ρομποτικής πλατφόρμας με βασικές ικανότητες αυτονομίας, όπως αυτό προέκυψε βάσει των χρόνων διάρκειας που ανατέθηκαν για την ολοκλήρωση κάθε διεργασίας μέχρι την επίτευξη του τελικού στόχου. Συγκεκριμένα η συνολική διάρκεια του εκπαιδευτικού προγράμματος κάτω από ιδανικές συνθήκες (χωρίς την ανάγκη να επαναληφθεί κάποια διαδικασία) ορίστηκε στη 1 διδακτική ώρα και αποτελείται από 27 μέρη και 23 μεταβάσεις. Η αντιστοιχία των χρόνων που αναγράφονται στο διάγραμμα με την πραγματικότητα είναι  $1 \text{ λεπτό} = 0,1 \text{ δευτερόλεπτα}$  χρόνου διαγράμματος, όπως και στο χρονικό δίκτυο του γενικού διαγράμματος.

Στο πρώτο αυτό τμήμα του χρονικού δικτύου του προβλήματος (Εικόνα 4.22) έχουμε την εκκίνηση της εκπαιδευτικής διαδικασίας με την περιγραφή και ανάλυση του προβλήματος σε χρόνο διάρκειας 5 λεπτών. Στη συνέχεια στην περίπτωση που ο έλεγχος που γίνεται δε στεφθεί με επιτυχία τότε ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m24), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 5 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (5-m24) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου. Στην περίπτωση επιτυχίας τότε δεν έχουμε καμιά επανάληψη και η διαδικασία συνεχίζεται με την ολοκλήρωση της ανάλυσης-κατανόησης του προβλήματος και του λογισμικού.

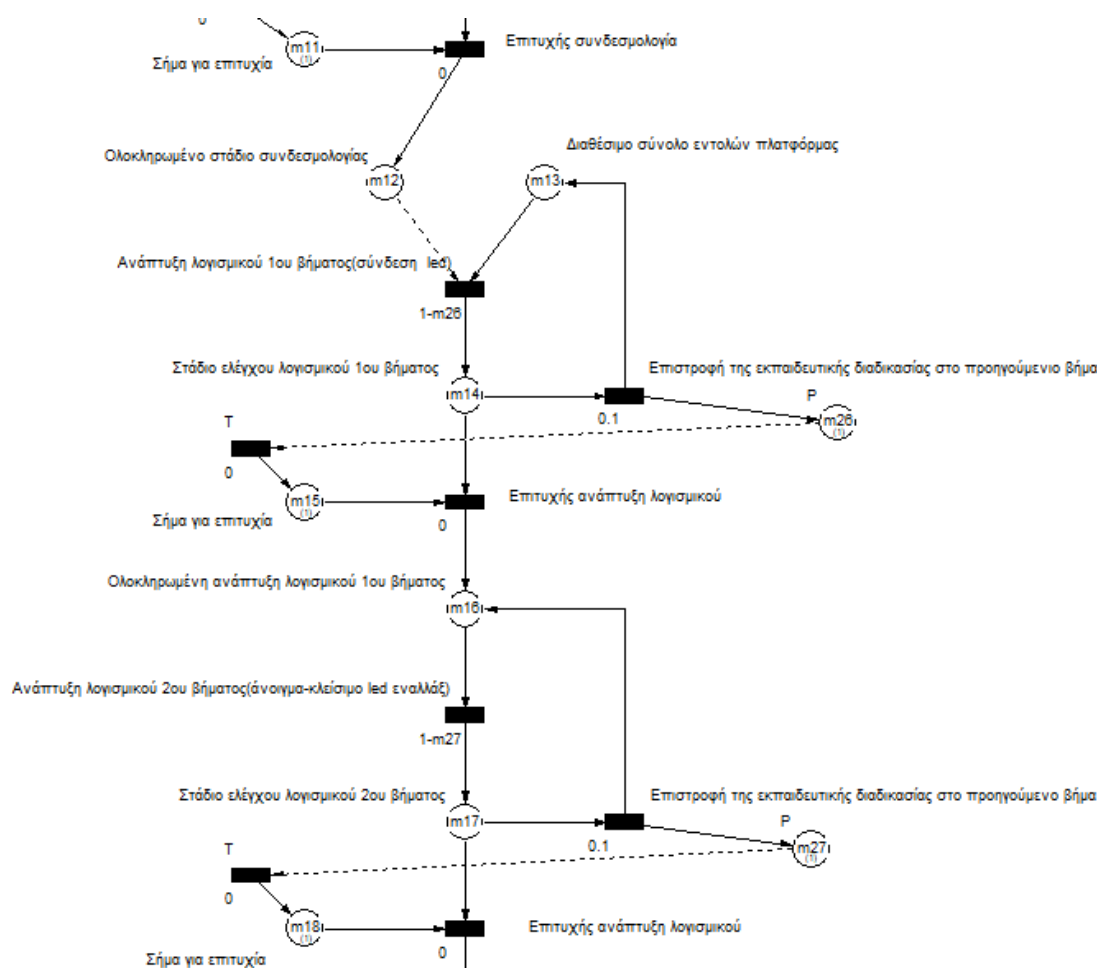


Εικόνα 4.22 Πρώτο τμήμα χρονικού δικτύου Petri προβλήματος



Εικόνα 4.23 Δεύτερο τμήμα χρονικού δικτύου Petri προβλήματος

Στη συνέχεια η διαδικασία περνάει στο κομμάτι του hardware. Συγκεκριμένα γίνεται η παρουσίαση των διαθέσιμων δομικών στοιχείων σε χρόνο διάρκειας 5 λεπτών και έπειτα οι συμμετέχοντες καλούνται να επιλέξουν και να συνδέσουν κατάλληλα τα δομικά στοιχεία μέσα σε χρόνο 13 λεπτών. Ακολουθεί ο έλεγχος, όπου είτε υπάρχει σφάλμα και ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m25), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 13 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (1.3-m25) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, είτε είναι επιτυχής εξαρχής και ολοκληρώνεται παράλληλα το κομμάτι του hardware.



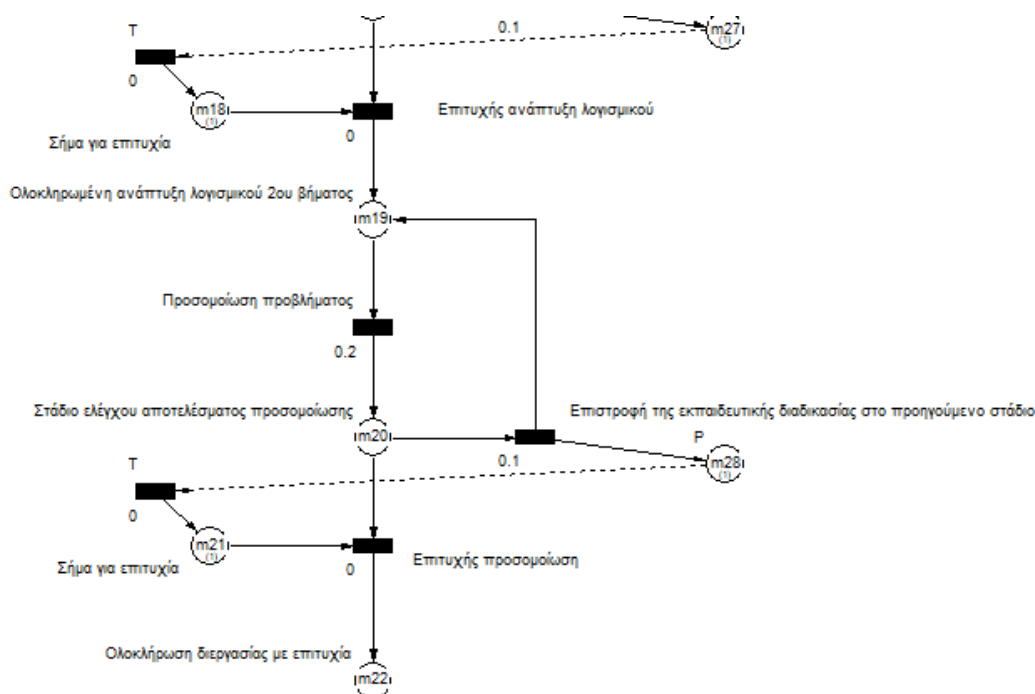
Εικόνα 4.24 Τρίτο τμήμα χρονικού δικτύου Petri προβλήματος

Στη συνέχεια, η διαδικασία οδηγείται στο στάδιο ανάπτυξης λογισμικού του προβλήματος (Εικόνα 4.24) σε βήματα (τα βήματα εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος που έχουμε). Έτσι για την ανάπτυξη λογισμικού πρώτου βήματος για την σύνδεση των led δίνεται χρόνος 10 λεπτών, όπου σε περίπτωση που ο έλεγχος που διενεργείται για την ορθότητα του δε στεφθεί με επιτυχία τότε ενεργοποιείται η



μεταβλητή P (m26), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 10 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (10-m26) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, είτε στέφεται με επιτυχία και η διαδικασία οδηγείται στην ανάπτυξη λογισμικού για το άνοιγμα-κλείσιμο των led εναλλάξ με χρόνο διάρκειας 10 λεπτών.

Αντίστοιχα διενεργείται έλεγχος της ορθότητας του όπως στο πρώτο βήμα όπου είτε υπάρχει σφάλμα και ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m27), μέσω της οποίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται μία φορά, αλλά σε χρόνο λιγότερο του αρχικού των 10 λεπτών που είχαν χρειαστεί στη πρώτη φάση (10-m27) και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, είτε στέφεται με επιτυχία και η διαδικασία οδηγείται στην ολοκλήρωση της ανάπτυξης λογισμικού.



Εικόνα 4.25 Τέταρτο τμήμα χρονικού δικτύου Petri προβλήματος

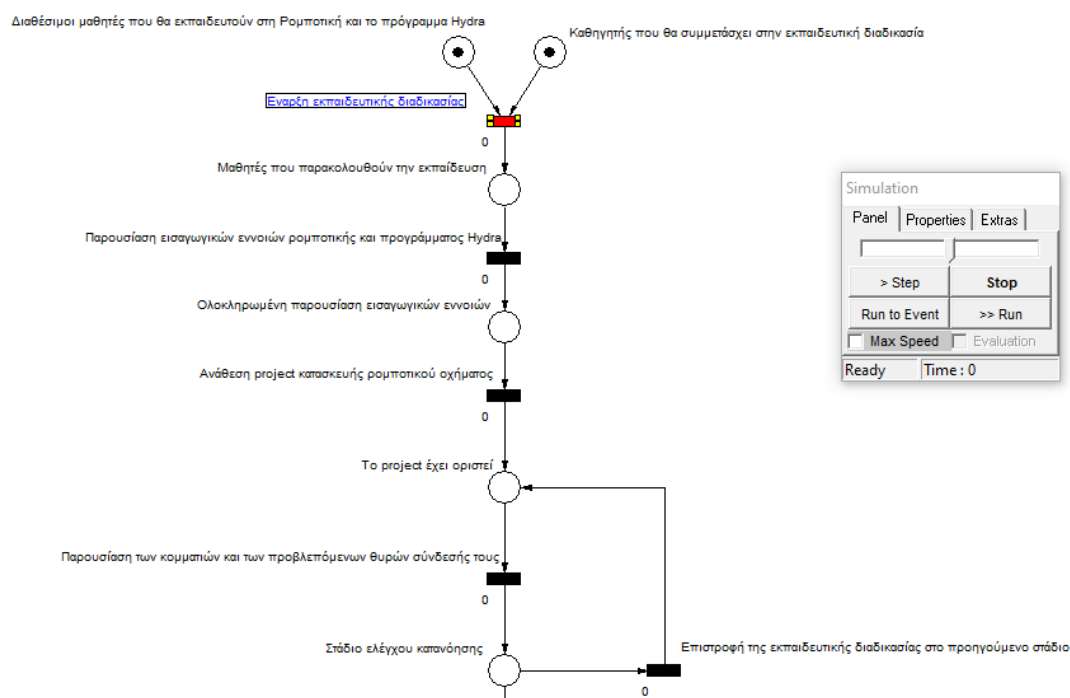
Στο τελευταίο κομμάτι του χρονικού δικτύου Petri (Εικόνα 4.25) έχουμε την προσομοίωση του προβλήματος. Η διάρκεια του σταδίου αυτού ανέρχεται στα 2 λεπτά, όπου σε περίπτωση που προκύψει σφάλμα ενεργοποιείται η μεταβλητή P (m28) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μια φορά, αλλά η χρονική διάρκεια του είναι η ίδια καθώς τόσο χρόνο απαιτεί η εκτέλεσή του και έπειτα οδηγείται αυτόματα σε επιτυχία μέσω της χρήσης του διακεκομμένου τόξου, ενώ σε περίπτωση επιτυχίας ολοκληρώνεται επιτυχώς η επίλυση του προβλήματος.

## 4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI

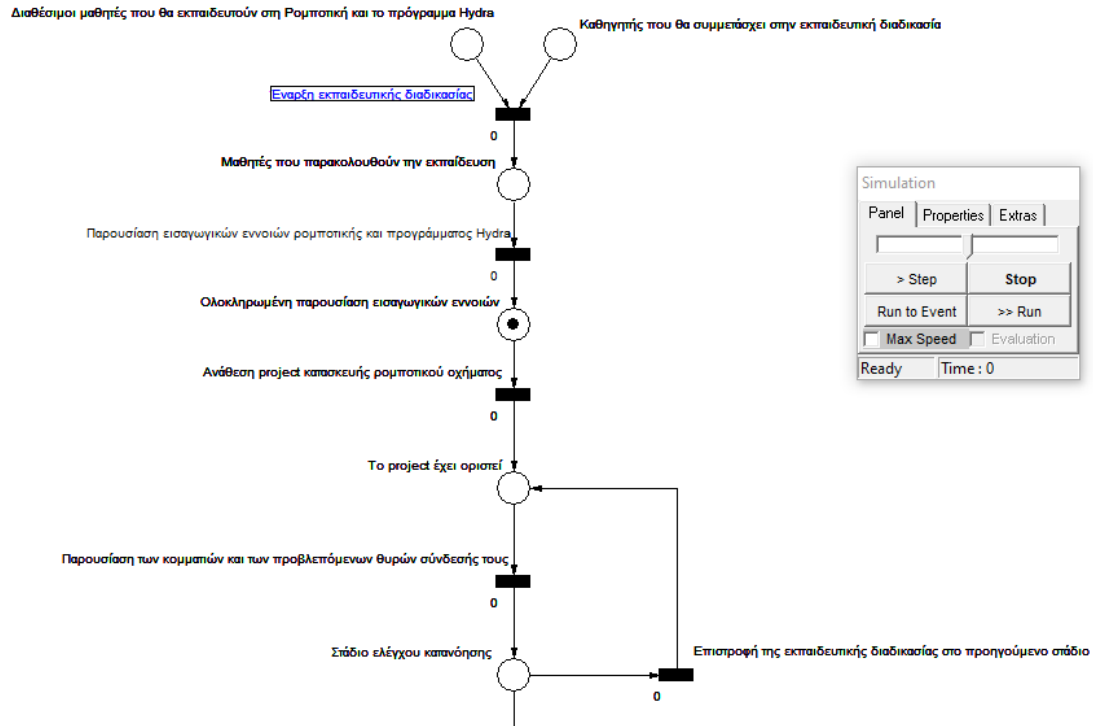
Τα δίκτυα Petri πέραν από ένα γραφικό εργαλείο στη μοντελοποίηση και αξιολόγηση απόδοσης πραγματικών συστημάτων δίνουν την δυνατότητα δυναμικής ανάλυσης των συστημάτων. Με την χρήση επομένως των δικτύων που δημιουργήθηκαν και αναλύθηκαν έγινε η προσομοίωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας μέσω της πυροδότησης των λεγόμενων tokens (τελειών). Επιπρόσθετα μέσω της διαδικασίας πυροδότησης των tokens και της προσομοίωσης των δικτύων που δημιουργήθηκαν επιβεβαιώνεται η ορθότητα των δικτύων και η σωστή λειτουργία τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δίκτυα Petri που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία προσομοίωσής τους. Σημειώνεται ότι για χάριν ευαναγνωσιμότητας και της μη υπάρχουσας δυνατότητας δυναμικής αναπαράστασης τους τα δίκτυα παρουσιάζονται αποσπασματικά σε διάφορες φάσεις της προσομοίωσής τους.

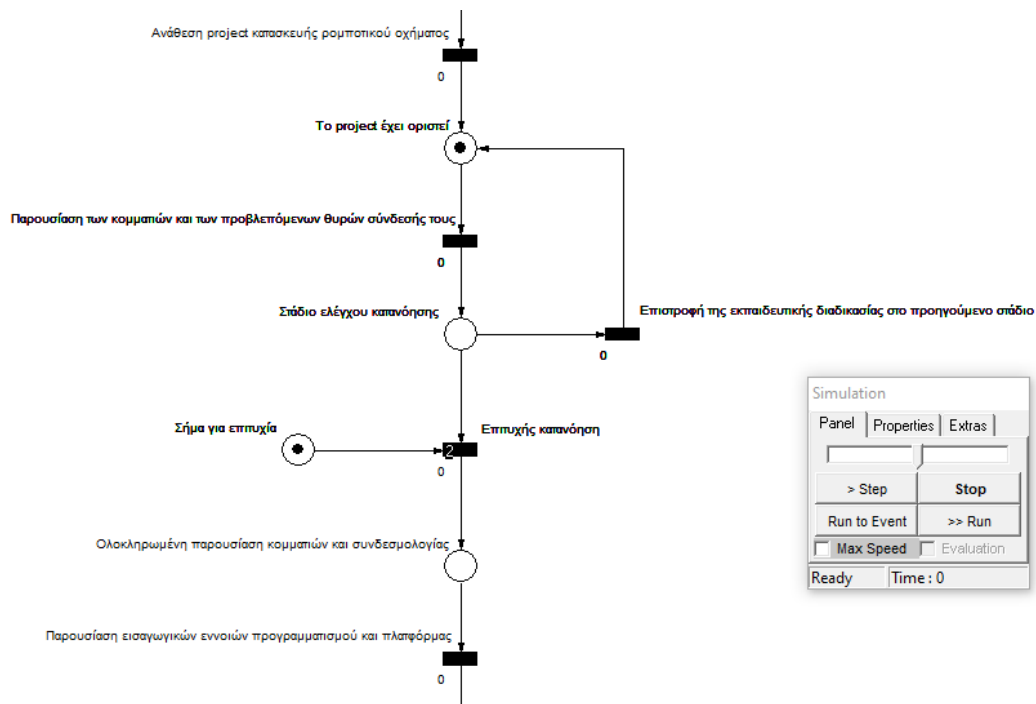
Αρχικά παρουσιάζεται το συνήθες δίκτυο Petri της συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας σε διάφορες φάσεις κατά την διάρκεια προσομοίωσής του που έγινε βήμα-βήμα μέχρι την ολοκλήρωσή της.



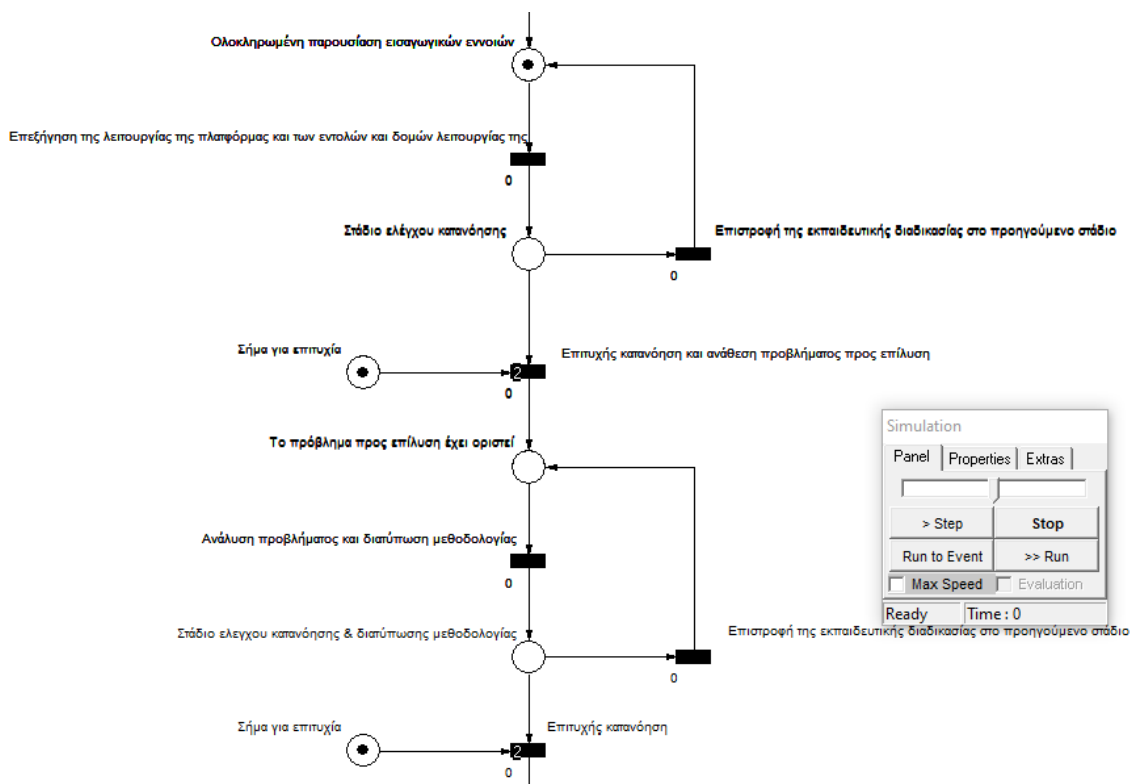
Εικόνα 4.26 Πρώτο τμήμα:εκκίνηση διαδικασίας προσομοίωσης δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας.



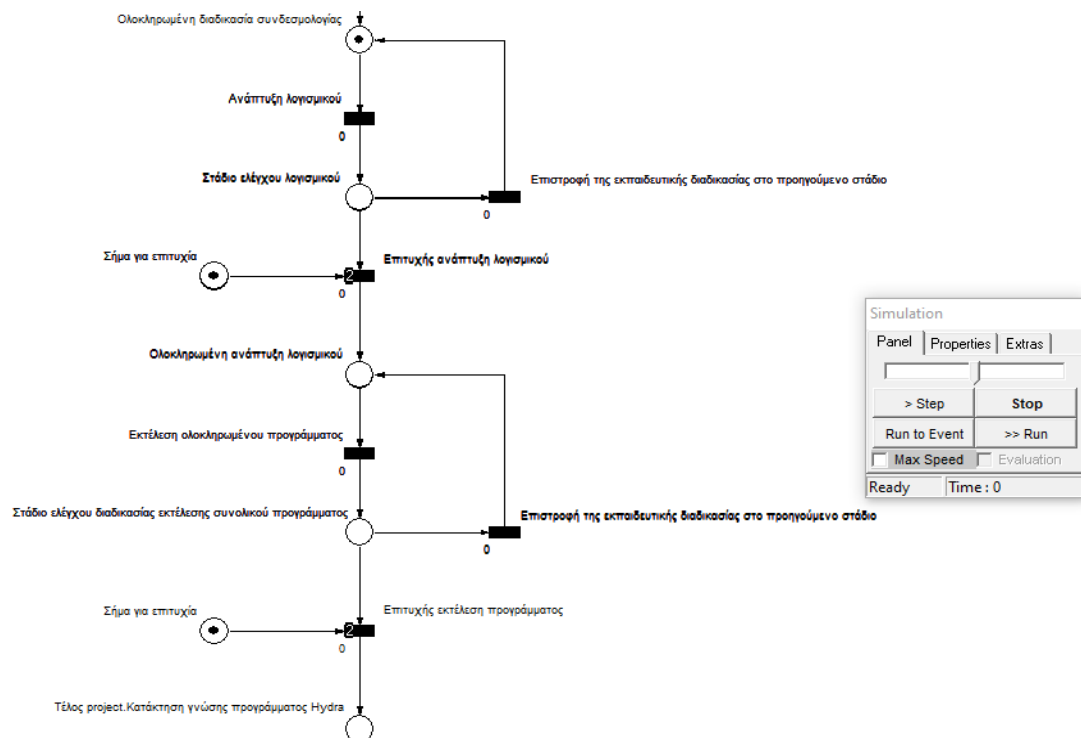
Εικόνα 4.27 Δεύτερο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την παρουσίαση των εισαγωγικών εννοιών.



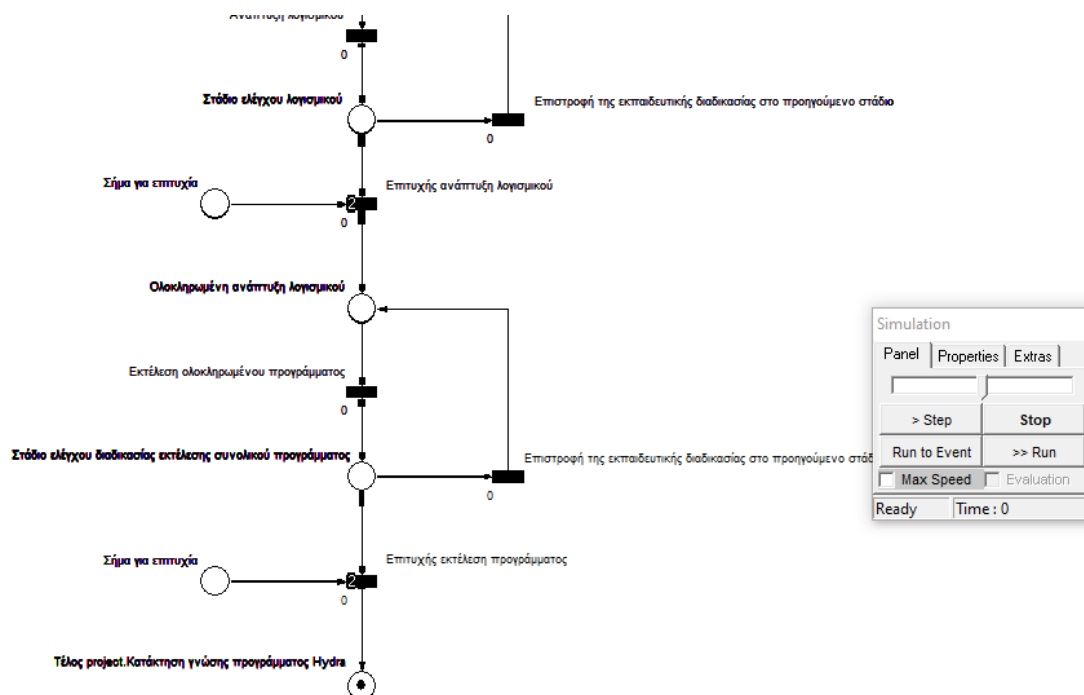
Εικόνα 4.28 Τρίτο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από τον ορισμό του project.



Εικόνα 4.29 Τέταρτο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την παρουσίαση των εισαγωγικών εννοιών πλατφόρμας.

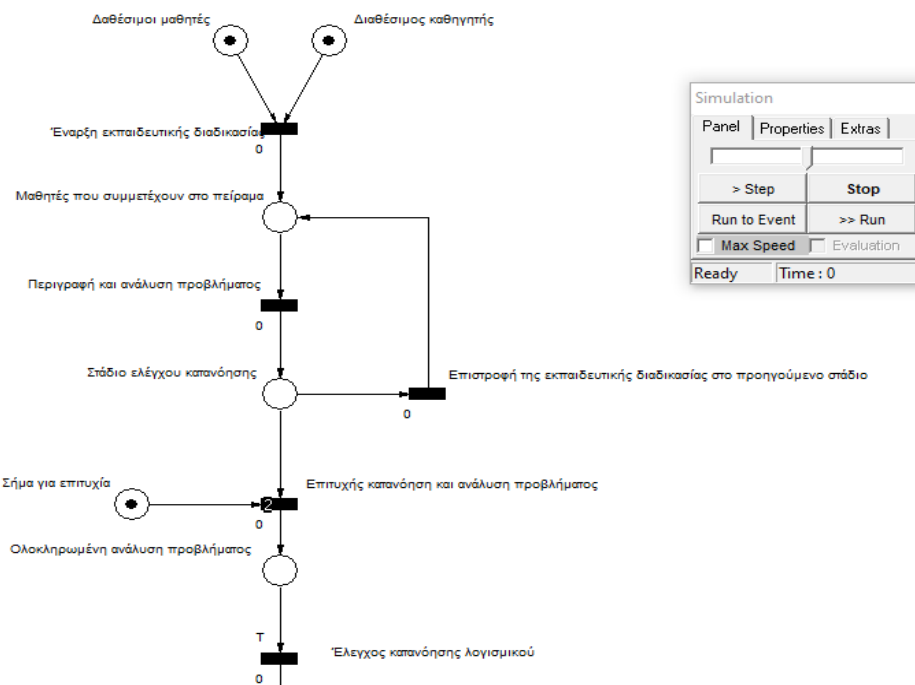


Εικόνα 4.30 Πέμπτο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκλήρωση της συνδεσμολογίας του προβλήματος.

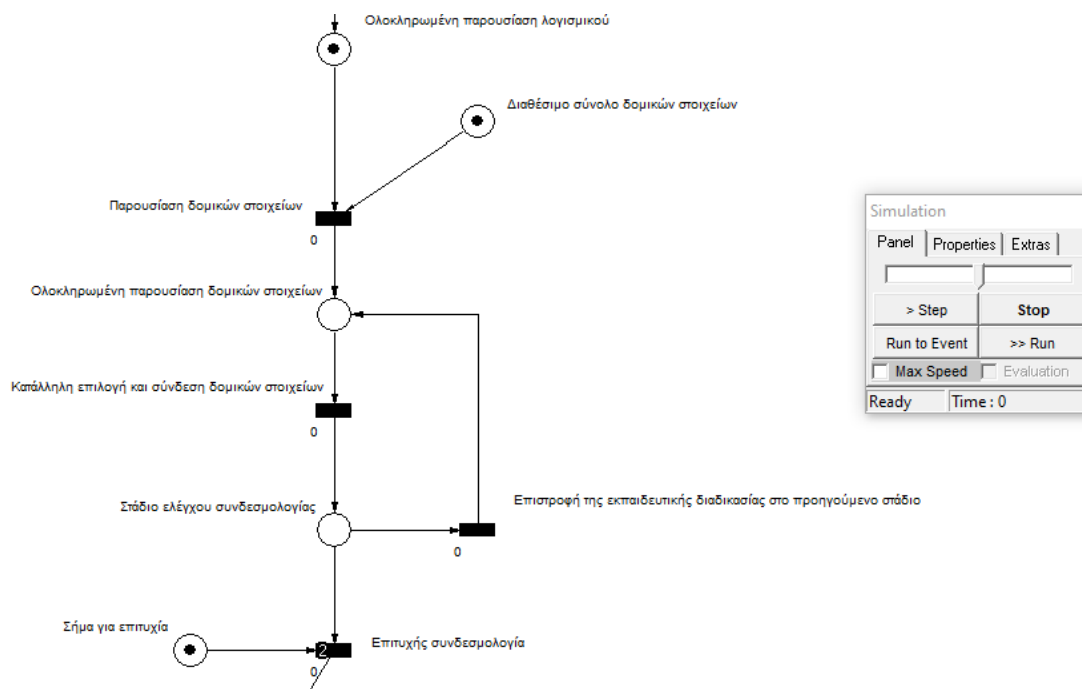


Εικόνα 4.31 Έκτο τμήμα:αποτόπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκλήρωση της.

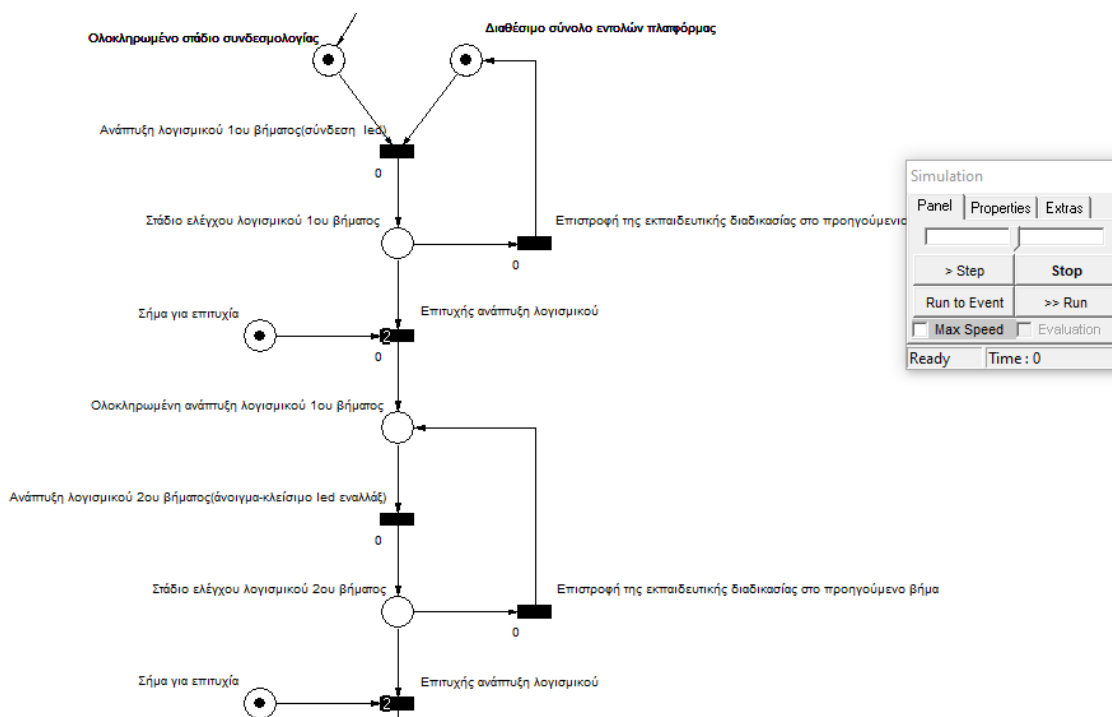
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνήθες δίκτυο Petri του προβλήματος σε διάφορες φάσεις κατά την διάρκεια προσομοίωσης του μέχρι την ολοκλήρωση του.



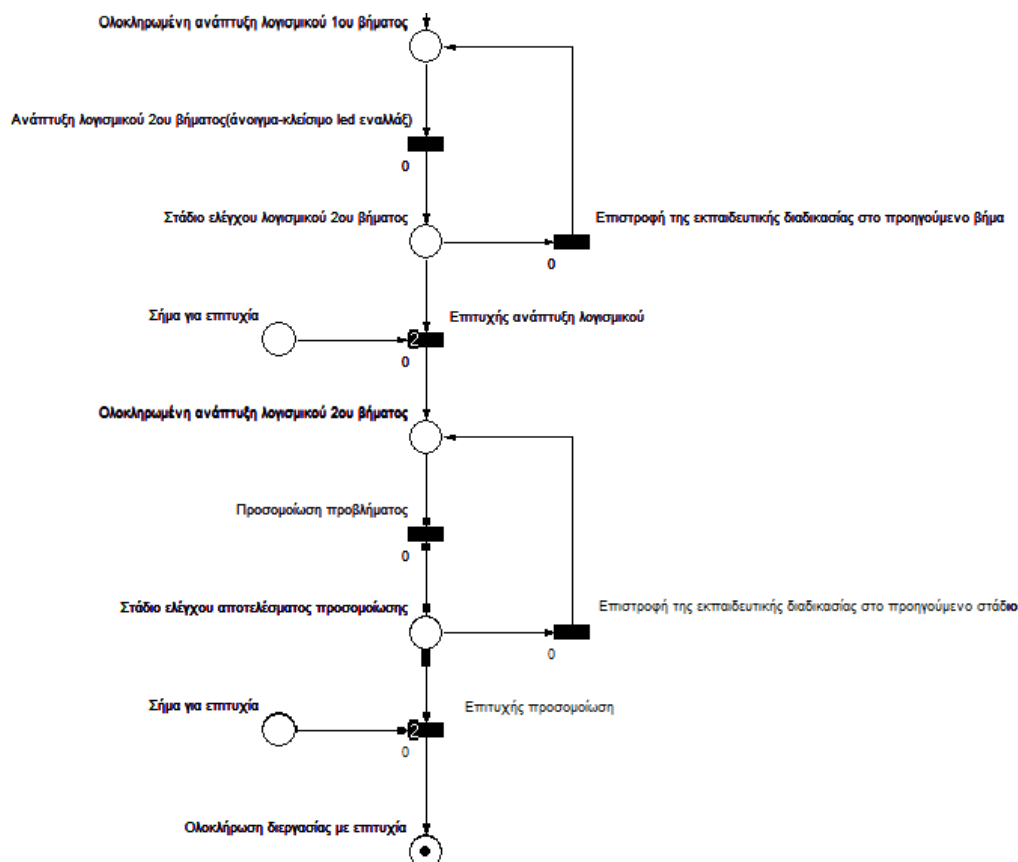
Εικόνα 4.32 Πρώτο τμήμα:εκκίνηση διαδικασίας προσομοίωσης δικτύου Petri προβλήματος.



Εικόνα 4.33 Δεύτερο τμήμα: αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκληρωμένη παρουσίαση του λογισμικού.



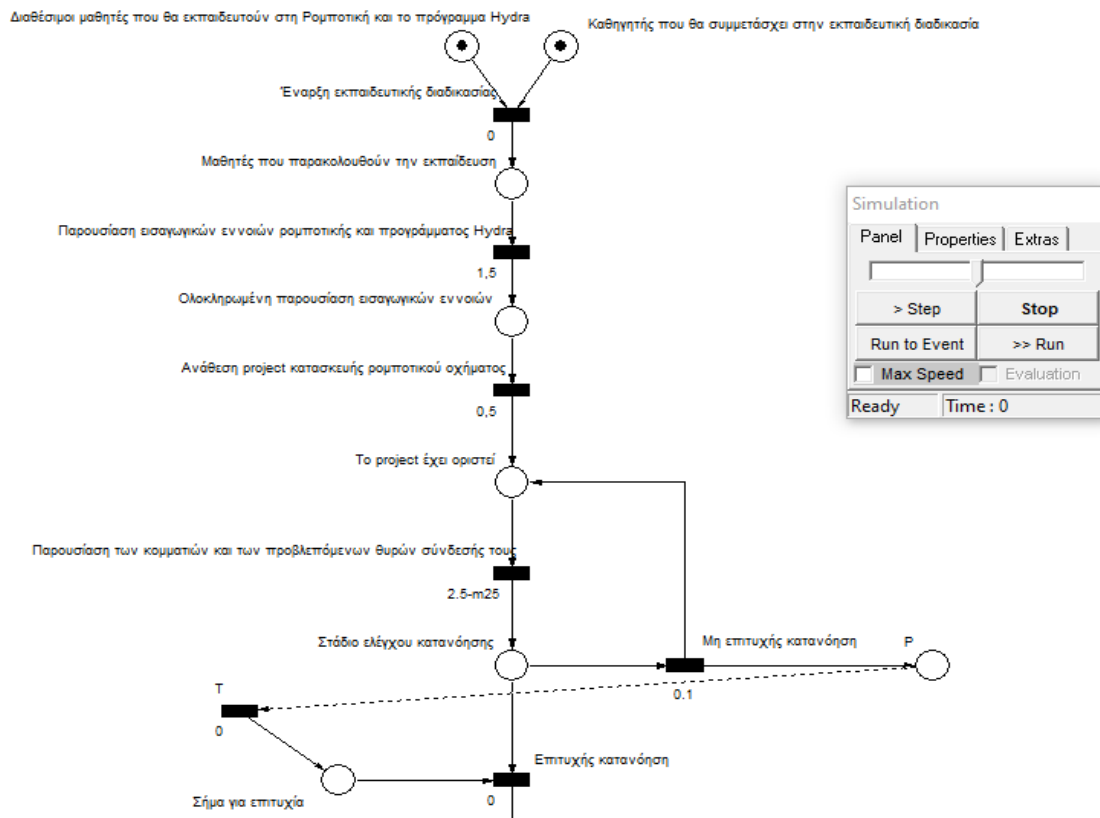
Εικόνα 4.34 Τρίτο τμήμα: αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκλήρωση της συνδεσμολογίας.



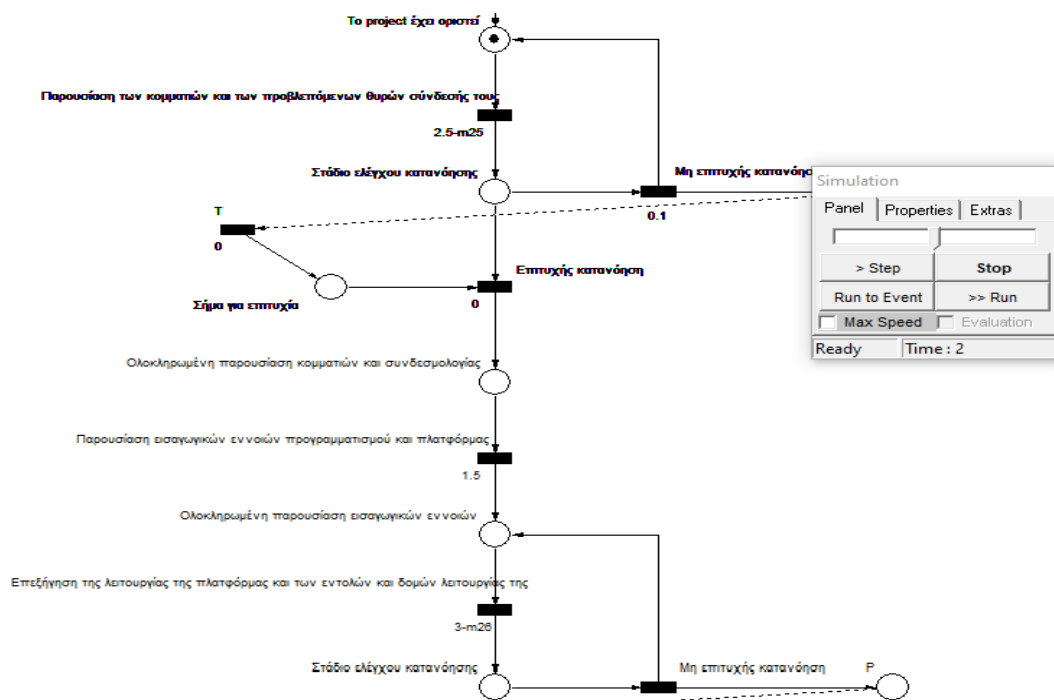
Εικόνα 4.35 Τέταρτο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκλήρωσή της.

Στη συνέχεια γίνεται η παρουσίαση των χρονικών δικτύων Petri σε διάφορες φάσεις κατά την διάρκεια της προσομοίωσης τους. Σημειώνεται ότι στα χρονικά δίκτυα Petri που δημιουργήθηκαν μπορούν να εξεταστούν πολλά πιθανά σενάρια (μέσω μικρών τροποποιήσεων), αναλόγως πάντα με πόσες φορές και ποιες εκ των διαδικασιών θα πρέπει να επαναληφθούν μέχρι την επίτευξη του τελικού στόχου. Συγκεκριμένα μπορούμε να ρυθμίσουμε τον αριθμό επανάληψης οποιαδήποτε διαδικασίας, μεταβάλλοντας τον αριθμό χωριτικότητας tokens της μεταβλητής P ή να αλλάξουμε το χρονικό όριο που δίνεται για την επίτευξη κάποιου σταδίου, επιλέγοντας και διορθώνοντας απλά τον χρόνο που αναγράφεται δίπλα στη μετάβαση σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας. Σημειώνεται ότι κατά την προσομοίωση των χρονικών δικτύων αναγράφεται στο κουτάκι της προσομοίωσης ο χρόνος που έχει χρειαστεί μέχρι το σημείο που βρισκόμαστε.

Παρακάτω παρουσιάζεται το χρονικό δίκτυο Petri της συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας σε διάφορες φάσεις κατά την διάρκεια προσομοίωσης του βήμα-βήμα μέχρι την ολοκλήρωσή της. Ακόμα επισημαίνεται ότι στο σενάριο αυτό εξετάζεται η περίπτωση που όλες οι διαδικασίες επαναλαμβάνονται 1 φορά.

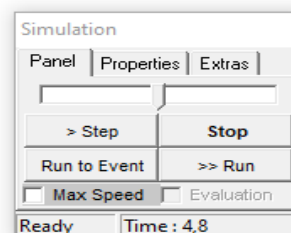
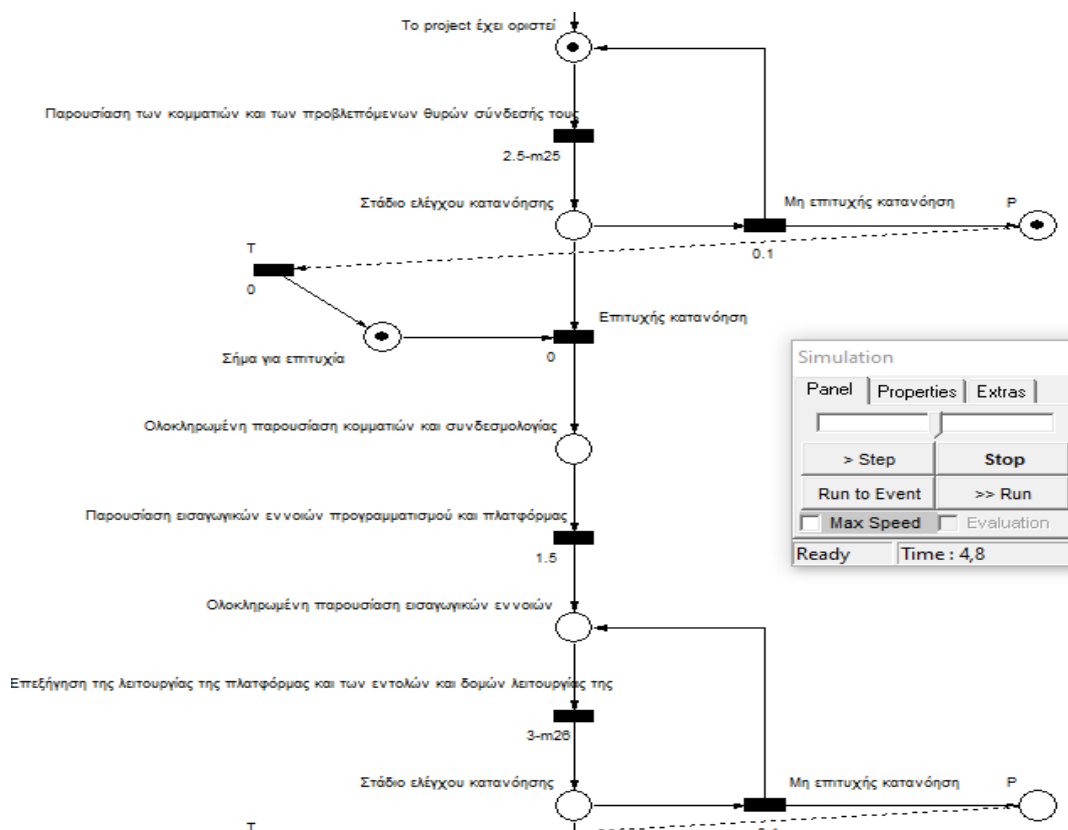


Εικόνα 4.36 Πρώτο τμήμα:εκκίνηση διαδικασίας προσομοίωσης χρονικού δικτύου Petri συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας.

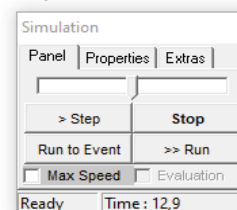
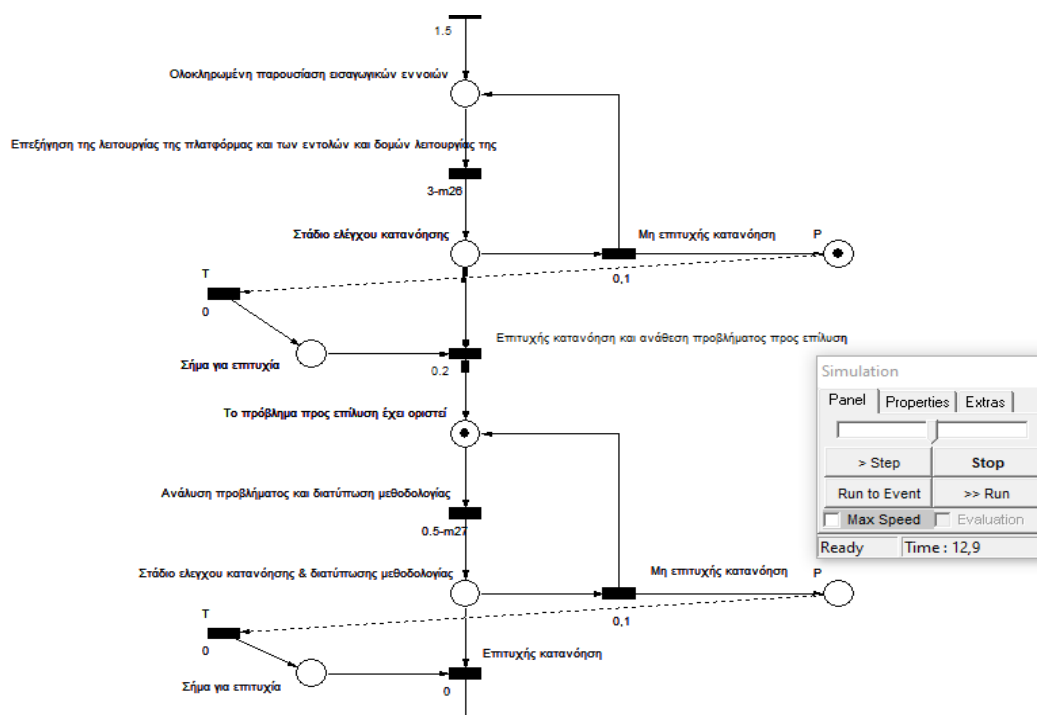




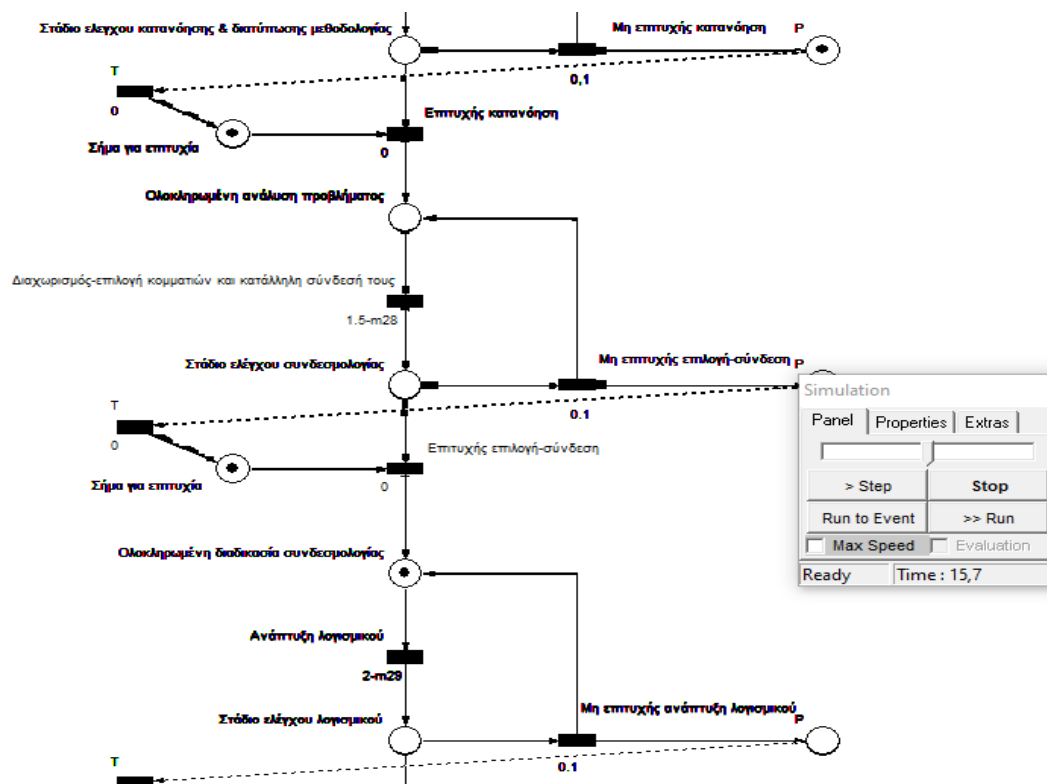
Εικόνα 4.37 Δεύτερο τμήμα: αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκληρωμένη παρουσίαση του λογισμικού.



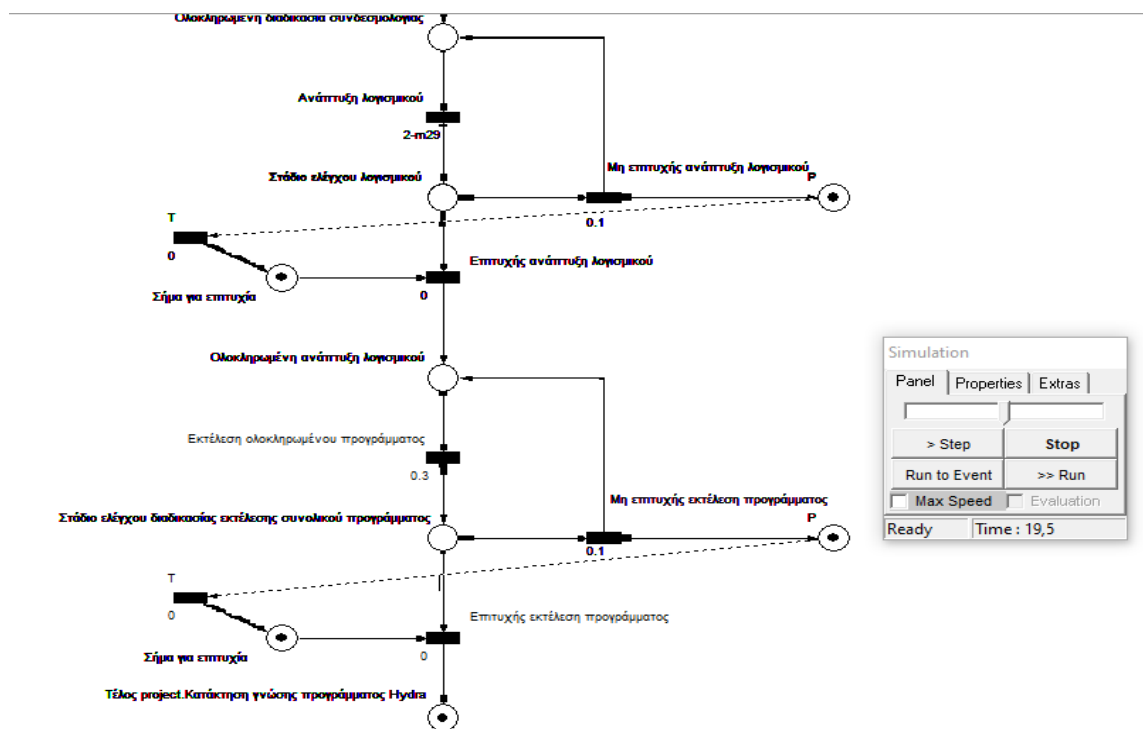
Εικόνα 4.38 Τρίτο τμήμα: αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την μη επιτυχή κατανόηση και την επιστροφή στο στάδιο της παρουσίασης των κομματιών και των θυρών σύνδεσης.



Στάδιο εξέλιξης καταπόνησης & διαπίστωσης υπερβολικής	Μη επιτυχής καταπόνηση	P
---	------------------------	---



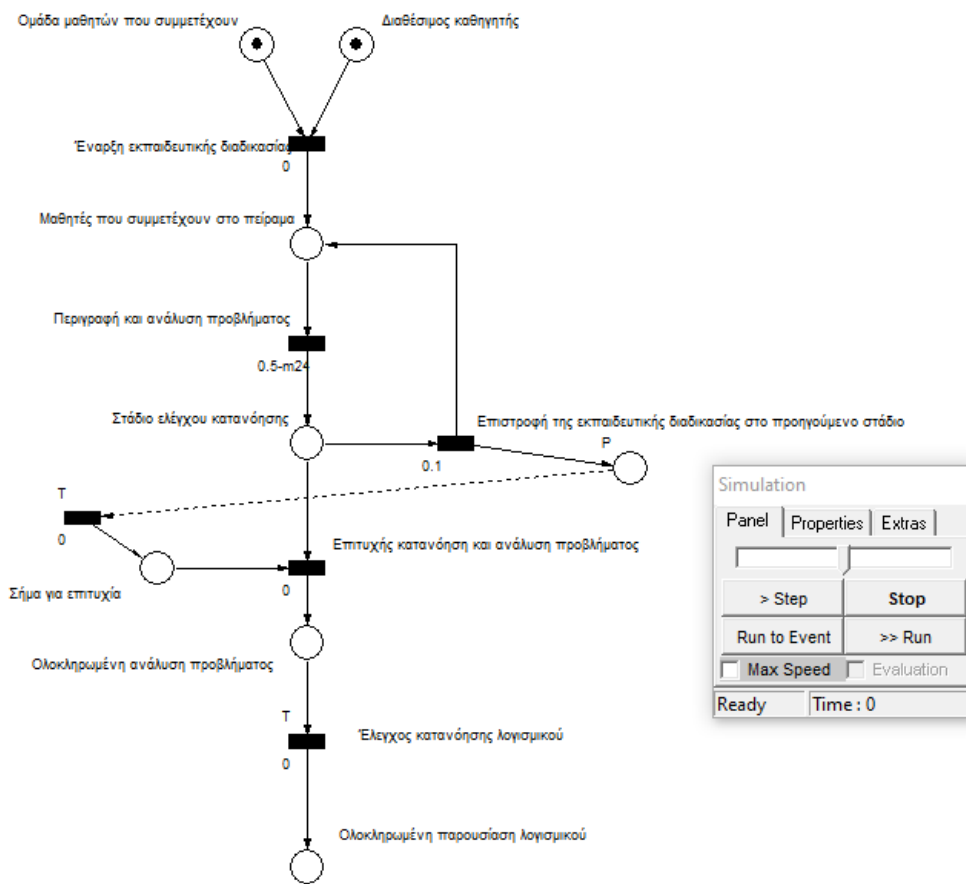
Εικόνα 4.40 Πέμπτο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκληρωμένη διαδικασία συνδεσμολογίας.



Εικόνα 4.41 Έκτο τμήμα:αποτύπωση διαδικασίας έπειτα από την ολοκλήρωση της.

Κατά την ολοκλήρωση της συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας (Εικόνα 4.41) στο κουτάκι της προσομοίωσης αναγράφεται ο συνολικός χρόνος διάρκειας της ο οποίος είναι 19,5 δευτερόλεπτα. Επομένως βάσει της αντιστοιχίας που έχουμε αναφέρει ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας με την επανάληψη κάθε διαδικασίας 1 φορά ανέρχεται στα 195 λεπτά. Σημειώνεται ότι ο χρόνος επανάληψης κάθε διαδικασίας είναι τυχαίος και λιγότερος του αρχικού χρόνου που είχε οριστεί για την διαδικασία. Βέβαια αξίζει να επισημανθεί ότι υπάρχουν πολλοί ακόμα παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τα χρονικά πλαίσια.

Τέλος παρουσιάζεται το χρονικό δίκτυο Petri του προβλήματος σε διάφορες φάσεις κατά την διάρκεια προσομοίωσης του βήμα-βήμα μέχρι την ολοκλήρωση του. Ακόμα επισημαίνεται ότι και στο σενάριο αυτό εξετάζεται η περίπτωση που όλες οι διαδικασίες επαναλαμβάνονται 1 φορά.



Εικόνα 4.42 Πρώτο τμήμα:εκκίνηση διαδικασίας προσομοίωσης χρονικού δικτύου Petri προβλήματος.

Ολοκληρωμένο στάδιο συνδεολογίας

Ανάπτυξη λογισμικού 1ου βήματος (σύνδεση led)

1-m26

Στάδιο ελέγχου λογισμικού 1ου βήματος

Επιστροφή της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο προηγούμενο βήμα

0.1

P

T

0

Σήμα για επιτυχία

Επιτυχής ανάπτυξη λογισμικού

0

Ολοκληρωμένη ανάπτυξη λογισμικού 1ου βήματος

Ανάπτυξη λογισμικού 2ου βήματος (άνοιγμα-κλείσιμο led εναλλάξ)

1-m27

Στάδιο ελέγχου λογισμικού 2ου βήματος

Επιστροφή της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο προηγούμενο βήμα

0.1

P

T

0

Σήμα για επιτυχία

Επιτυχής ανάπτυξη λογισμικού

0

Simulation

Panel | Properties | Extras |

> Step

Stop

Run to Event

>> Run

Max Speed

Evaluation

Ready

Time : 4

85



συμμετεχόντων. Παράλληλα μπορεί να αναπροσαρμόσει τα χρονικά όρια κάθε σταδίου ανάλογα την ηλικία, τις δεξιότητες και το γνωστικό επίπεδο των συμμετεχόντων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ/ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια ανάπτυξης του ψηφιακού διδύμου για την παρακολούθηση και ανάπτυξη εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων με τη βοήθεια της εκπαιδευτικής πλατφόρμας STEM Hydra. Πρόκειται για μια εκπαιδευτική πλατφόρμα STEM που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη πολλών δραστηριοτήτων με έμφαση στην εκπαιδευτική ρομποτικής. Αποτελείται από κατάλληλα διαμορφωμένο υλικό και λογισμικό που μπορεί να μπορεί να αξιοποιηθεί στη διδασκαλία εννοιών πληροφορικής και απλών αυτοματισμών.

Συγκεκριμένα έχοντας διαθέσιμα όλα τα δομικά στοιχεία, καθώς και το κατάλληλο διαμορφωμένο λογισμικό της εκπαιδευτικής πλατφόρμας έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης της εκπαιδευτικής διαδικασίας αρχικώς μέσω διαγραμμάτων ροής. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα Petri, εξαιτίας τόσο της χρήσης τους ως γραφικό εργαλείο στη μοντελοποίηση και αξιολόγηση απόδοσης πραγματικών συστημάτων όσο και της δυνατότητας ζωντανής αναπαράστασης – προσομοίωσης του προς εξέταση συστήματος. Αναλυτικότερα μοντελοποιήθηκαν τα συνήθη και τα χρονικά δίκτυα Petri της συνολικής εκπαιδευτικής διαδικασίας, καθώς και ενός ενδεικτικού παραδείγματος – προβλήματος της, με σκοπό την ανάλυση και βελτιστοποίηση της. Παράλληλα αναπτύχθηκαν και προσομοιώθηκαν διάφορα πιθανά σενάρια, μέσω των δικτύων Petri οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση χαρακτηρίζεται από την ευελιξία των δικτύων που δημιουργήθηκαν, τα οποία με μικρές παρεμβάσεις – τροποποιήσεις δύναται να εξετάσουν οποιοδήποτε πιθανό σενάριο ζητηθεί. Μέσω της χρήσης των διαγραμμάτων αυτών ο εκπαιδευτής έχει την δυνατότητα να αξιολογήσει τόσο τη διαδικασία όσο και τους συμμετέχοντες και παράλληλα να προβεί σε οποιαδήποτε τροποποίηση ανάλογως των απαιτήσεων.

---

## 5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η προσπάθεια δημιουργίας του ψηφιακού διδύμου της εκπαιδευτικής διαδικασίας στέφθηκε με επιτυχία, παρ'όλα αυτά μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση, καθώς πρόκειται για μια νέα τεχνολογία που δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως ιδιαίτερα στον τομέα της εκπαίδευσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θα μπορούσε να δοκιμαστεί σε πραγματικό περιβάλλον (σχολείο), έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην εκπαιδευτική διαδικασία, έχοντας όμως την ανάδραση από τους συμμετέχοντες. Παράλληλα αξίζει να μελετηθεί ο τρόπος που η προτεινόμενη προσέγγιση, μπορεί να γίνει περισσότερο χρηστική, με την ενσωμάτωση της σε εκπαιδευτικά εργαλεία που να βοηθούν τόσο τον εκπαιδευτή όσο και τον εκπαιδευόμενο κατά τη διάρκεια της μαθησιακής διαδικασίας. Για την παραπάνω προσέγγιση μπορεί να μελετηθεί και η χρήση σύγχρονων εργαλείων όπως η επαυξημένη πραγματικότητα ή/και κατάλληλες διαδραστικές εφαρμογές.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hernandez LA, Hernandez S. Application of digital 3D models on urban planning and highway desing. *Trans Built Environ* 1997;30:391-402
- [2] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2019
- [3] Hribernik KA, Rabe L, Thoben KD, Schumacher J. The product avatar as a productinstance-centric information management concept. *Int J Prod Lifecycle Manag* 2006;1:367–79
- [4] Shafto M, Conroy M, Doyle R, Glaessgen E, Kemp C, LeMoigne J, et al. DRAFT modeling, simulation, information technology & processing roadmap - technology area 11. National Aeronautics and Space Administration; 2010.
- [5] Gartner’s Top. 10 strategic technology trends for 2017. 2019<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>.
- [6] Gartner’s Top. 10 strategic technology trends for 2018. 2019<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2018>.
- [7] Gartner’s Top. 10 strategic technology trends for 2019. 2019
- [8] Matinez V, Ouyang A, Neely A, Burstall C, Bisessar D. Service business model innovation: the digital twin. Cambridge Service Alliance 2018.
- [9] Tao F, Zhand M. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. San Diego: 2019.
- [10] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals* 2017; p.141-144.
- [11] Zheng Y, Yang S, Cheng H. An application framework of digital twin and its case study. *J Ambient Intell Humaniz Comput* 2019;10:1141–53.
- [12] Grieves M, Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen FJ, Flumerfelt S, Alves A, editors. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, Cham; 2017. p. 85–113.
- [13] Schluse M, Rossmann J. From simulation to experimentable digital twins. *IEEE Int Symp Syst Eng* 2016:1–6.
- [14] Madni A, Madni C, Lucero S. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems* 2019;7:7.
- [15] Sharif Ullah AMM. Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0. *Adv Eng Informatics* 2019;39:1–13.

- 
- [16] Stark R, Freseman C, Lindow K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Ann Manuf Technol* 2019;68:129–32.
- [17] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Ann Manuf Technol* 2017;66:141–4.
- [18] Tao F, Liu W, Liu J, Liu X, Liu Q, Qu T, et al. Digital twin and its potential application exploration. *Comput Integr Manuf Syst* 2018;24(1):1–18.
- [19] Tao F, Zhang M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access* 2017;5:20418–27.
- [20] Shafto M, Conroy M, Doyle R, Glaessgen E, Kemp C, LeMoigne J, et al. DRAFT modeling, simulation, information technology & processing roadmap - technology area 11. National Aeronautics and Space Administration; 2010.
- [21] Hochhalter JD, Leser WP, Newman JA, Glaessgen EH, Gupta VK, Yamakov V, et al. Coupling damage-sensing particles to the digital twin concept. 2014. p. 10.
- [22] Rosen R, Von Wichert G, Lo G, Bettenhausen KD. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine M. Liu, et al. Journal of Manufacturing Systems xxx (xxxx) xxx–xxx 14* 2015;28:567–72. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>.
- [23] Schluse M, Rossmann J. From simulation to experimentable digital twins. *IEEE Int Symp Syst Eng* 2016:1–6.
- [24] Brenner B, Hummel V. Digital twin as enabler for an innovative digital shopfloor management system in the ESB logistics learning factory at Reutlingen - university. *Procedia Manuf* 2017;9:198–205. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.039>.
- [25] Söderberg R, Wärmefjord K, Carlson JS, Lindkvist L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Ann Manuf Technol* 2017;66:137–40. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>.
- [26] Grieves M, Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen FJ, Flumerfelt S, Alves A, editors. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, Cham; 2017. p. 85–113.
- [27] Bruynseels K, de Sio FS, van den Hoven J. Digital Twins in health care: ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Front Genet* 2018;9:1–11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>.
- [28] Schluse M, Priggemeyer M, Atorf L, Rossmann J. Experimentable digital twinsstreamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0. *IEEE Trans Ind Informatics* 2018;14:1722–31. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2804917>.

- 
- [29] Leng J, Zhang H, Yan D, Liu Q, Chen X, Zhang D. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *J Ambient Intell Humaniz Comput* 2019;10:1155–66. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0881-5>.
- [30] Luo W, Hu T, Zhang C, Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *J Ambient Intell Humaniz Comput* 2019;10:1129–40. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0946-5>.
- [31] He Y, Guo J, Zheng X. From surveillance to digital twin: challenges and recent advances of signal processing for industrial internet of things. *IEEE Sig Proc Mag* 2018;35:120–9. <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2842228>.
- [32] Nikolakis N, Alexopoulos K, Xanthakis E, Chrysosolouris G. The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor. *Int J Comput Integr Manuf* 2019;32:1–12. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1529430>.
- [33] Wang J, Ye L, Gao RX, Li C, Zhang L. Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing. *Int J Prod Res* 2019;57:3920–34. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552032>.
- [34] Kaewunruen S, Rungskunroch P, Welsh J. A digital-twin evaluation of Net Zero Energy Building for existing buildings. *Sustain* 2018;11:1–22. <https://doi.org/10.3390/su11010159>.
- [35] Kaewunruen S, Xu N. Digital twin for sustainability evaluation of railway station buildings. *Front Built Environ* 2018;4:1–10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00077>.
- [36] Kaewunruen S, Lian Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *J Clean Prod* 2019;228:1537–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.156>.
- [37] Xu Y, Sun Y, Liu X, Zheng Y. A digital-twin-Assisted fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Access* 2019;7:19990–9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2890566>.
- [38] Liu J, Zhou H, Liu X, Tian G, Wu M, Cao L, et al. Dynamic evaluation method of machining process planning based on digital twin. *IEEE Access* 2019;7:19312–23. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893309>.
- [39] Madni A, Madni C, Lucero S. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems* 2019;7:7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>.
- [40] Liu Q, Liu B, Wang G, Zhang C. A comparative study on digital twin models. *AIP Conf Proc* 2019;2073. <https://doi.org/10.1063/1.5090745>.

- 
- [41] Fotland G, Haskins C, Rølvåg T. Trade study to select best alternative for cable and pulley simulation for cranes on offshore vessels. *Syst Eng* 2019;1–12. <https://doi.org/10.1002/sys.21503>. [42] Wang P, Yang M, Peng Y, Zhu J, Ju R, Yin Q. Sensor control in anti-submarine warfare—a digital twin and random finite sets based approach. *Entropy* 2019;21:767. <https://doi.org/10.3390/e21080767>.
- [43] Wilton TJ. What is a Digital Twin. *Lifewire*: 2019.
- [44] M. Bajaj, B. Cole, D. Zwemer, Architecture to geometry-integrating system models with mechanical design, in: *AIAA SPACE 2016*, 2016, p. 5470.
- [45] Y. Bazilevs, X. Deng, A. Korobenko, F. Lanza di Scalea, M.D. Todd, S.G. Taylor, Isogeometric fatigue damage prediction in large-scale composite structures driven by dynamic sensor data, *J. Appl. Mech.* 82 (9) (2015).
- [46] E. Glaessgen, D. Stargel, The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles, in: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*, 2012, p. 1818.
- [47] B. Gockel, A. Tudor, M. Brandyberry, R. Penmetsa, E. Tuegel, Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles, in: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*, 2012, p. 1813.
- [48] K. Reifsnider, P. Majumdar, Multiphysics stimulated simulation digital twin methods for fleet management, in: *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013, p. 1578.
- [49] E. Tuegel, The airframe digital twin: some challenges to realization, in: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*, 2012, p. 1812.
- [50] E. Negri, L. Fumagalli, M. Macchi, A review of the roles of digital twin in cpsbased production systems, *Procedia Manuf.* 11 (2017) 939–948.
- [51] G. Grinshpun, T. Cichon, D. Dipika, J. Rossmann, From virtual testbeds to real lightweight robots: Development and deployment of control algorithms for soft robots, with particular reference to, in: *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics, VDE*, 2016, pp. 1.–7.
- [52] Esmaeilian B, Behdad S, Wang B. The evolution and future of manufacturing: a review. *Int J Ind Manuf Syst Eng* 2016;39:79–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>.

- 
- [53] Park KT, Nam YW, Lee HS, Im SJ, Do Noh S, Son JY, et al. Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory. *Int J Comput Integr Manuf* 2019;32:596–614. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599439>.
- [54] Zhu Z, Liu C, Xu X. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality. *Procedia Cirp* 2019;81:898–903. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.223>.
- [55] Zhao H, Liu J, Xiong H, Zhuang C, Miao T, Liu J, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop. *Comput Integr Manuf Syst* 2019;25(6):1432–43. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.06.011>.
- [56] Lee J, Lapira E, Bagheri B, an Kao H. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf Lett* 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>.
- [57] Li L, Li H, Gu F, Ding N, Gu X, Luo G. Multidisciplinary collaborative design modeling technologies for complex mechanical products based on digital twin. M. Liu, et al. *Journal of Manufacturing Systems xxx (xxxx) xxx–xxx* 15 *Comput Integr Manuf Syst* 2019;25(6):1307–19. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.06.001>.
- [58] Liu J, Zhao P, Zhou H, Liu X, Feng F. Digital twin-driven machining process evaluation method. *Comput Integr Manuf Syst* 2019;25(6):1601–10. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.06.027>.
- [59] Samir K, Maffei A, Onori MA. Real-Time asset tracking; a starting point for digital twin implementation in manufacturing. *Procedia Cirp* 2019;81:719–23. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.182>.
- [60] Macchi M, Roda I, Negri E, Fumagalli L. Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management. *IFAC-PapersOnLine* 2018;51:790–5. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.415>.
- [61] Miller S. Predictive Maintenance of Digital Twin. Mathworks: 2019.
- [62] IBM. IBM Knowledge Center – Creating embedded rules. IBM: 2019.
- [63] S. Papert, *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. Basic Books, Inc., 1980
- [64] A. Eguchi and J. Shen, “Student learning experience through cospace educational robotics,” in *Society for Information Technology & Teacher Education International Conference*. Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2012, pp. 19–24.

[65] Xcelgo, “Technical Schools Use Digital Twins in the Classroom, Xcelgo Online Article, <https://xcelgo.com/technical-schools-use-digital-twins-inthe-classroom/>, accessed January 31, 2019.

[64] J.E. Ormrod, Educational Psychology: Developing learners. 8th Edition, Boston, MA: Allyn and Bacon, 2018.

[65] A.M. Madni, C.C. Madni, and D.S. Lucero, “Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering,” MDPI Systems, special issue on “Model-Based Systems Engineering,” Accepted for Publication, March 2019.

[66] Diesel J. and Juhas G., ”What is a Petri Net? Informal Answers for the Informed Reader”, Unifying Petri Nets, Ehrig H., Juhas G., Padberg J. and Rozenberg G., Eds, Springer, pp. 1-27, 2001.

[67] Desrochers A. and Al - Jaar R., Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems -Modeling, Control and Performance Analysis, IEEE Press, 1995.

[68] Levis A., Discrete Event Systems, Διαφάνειες, 2000.

[69] Antti Liljaniemi\* and Heikki Paavilainen, Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers, 2020.

[70] Dr. Azad M. Madni, Exploiting Digital Twin Technology to Teach Engineering Fundamentals and Afford Real-World Learning Opportunities, 2019.

[71] Τσαλμπούρης Γεώργιος, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “ Σχεδιασμός ανάπτυξη και υλοποίηση εκπαιδευτικής πλατφόρμας STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) για τις ανάγκες της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης. ”, Ηράκλειο Κρήτης: Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 2019.

[72] Κακαράς Γεώργιος, Διπλωματική Εργασία “ Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Πρωτότυπης Εκπαιδευτικής Πλατφόρμας STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) ”, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2021

[73] N. Fraser, “Ten things we’ve learned from blockly,” in 2015 IEEE Blocks and Beyond Workshop (Blocks and Beyond), Oct 2015, pp. 49–50.

[74] “Ardublockly’s web page,” <https://ardublockly.embeddedlog.com>, accessed: 2010-01-29

[75] <http://www.thymio.gr/index.php>

[76] <https://www.why.gr/%CF%80%CF%81%CF%8C%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%7-beebot/>

[77] <https://wabisablearning.com/blogs/stem/36-stem-project-based-learning-activities>

[78] <https://stem.edu.gr/lesson/spike-prime/>

---

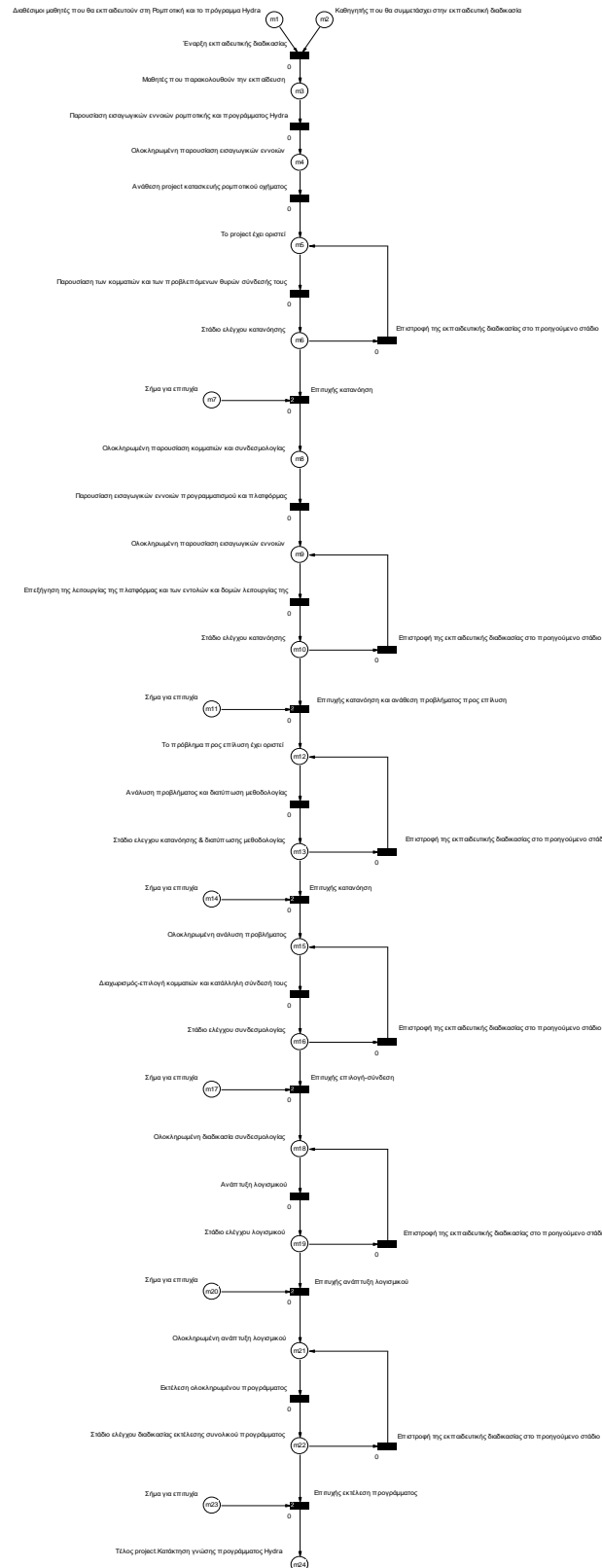
[79] <https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/pnfaq.html>

[80] <http://people.cs.pitt.edu/~chang/231/y16/231sem/semO'Brien.pdf>

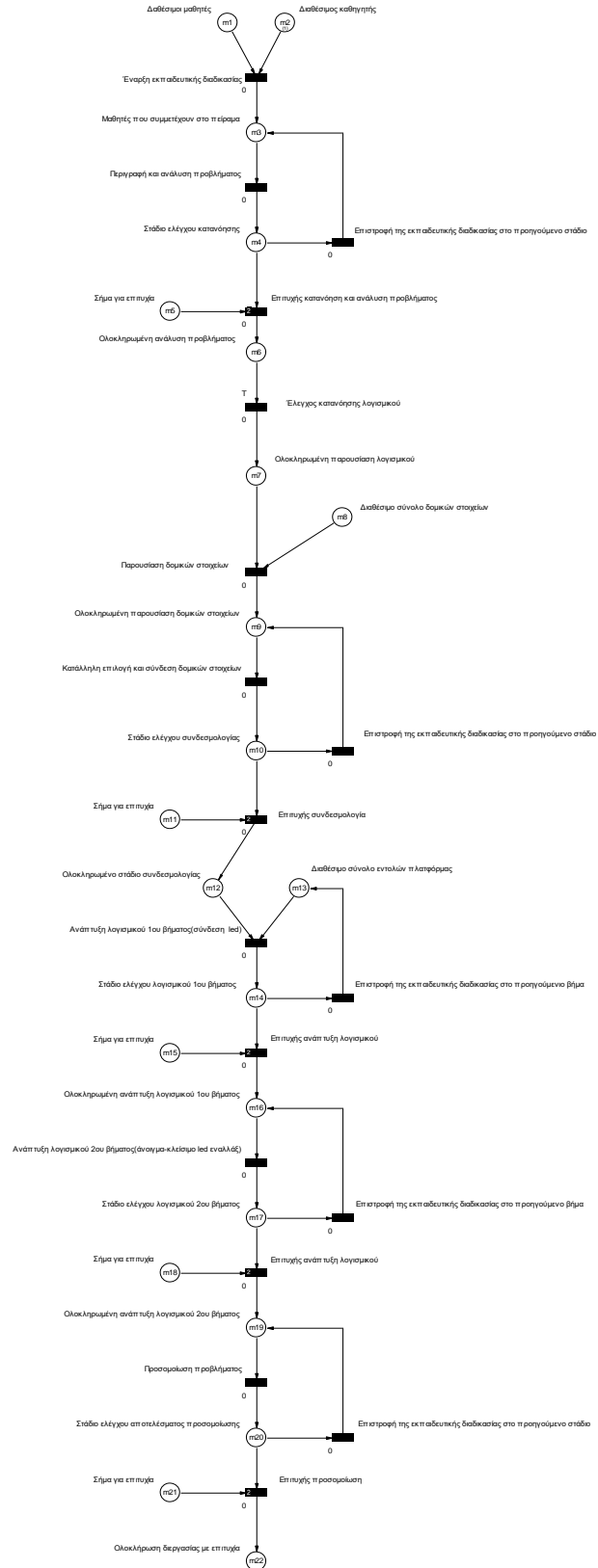
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται ολοκληρωμένα τα συνήθη και τα χρονικά δίκτυα Petri της εκπαιδευτικής διαδικασίας που δημιουργήθηκαν.

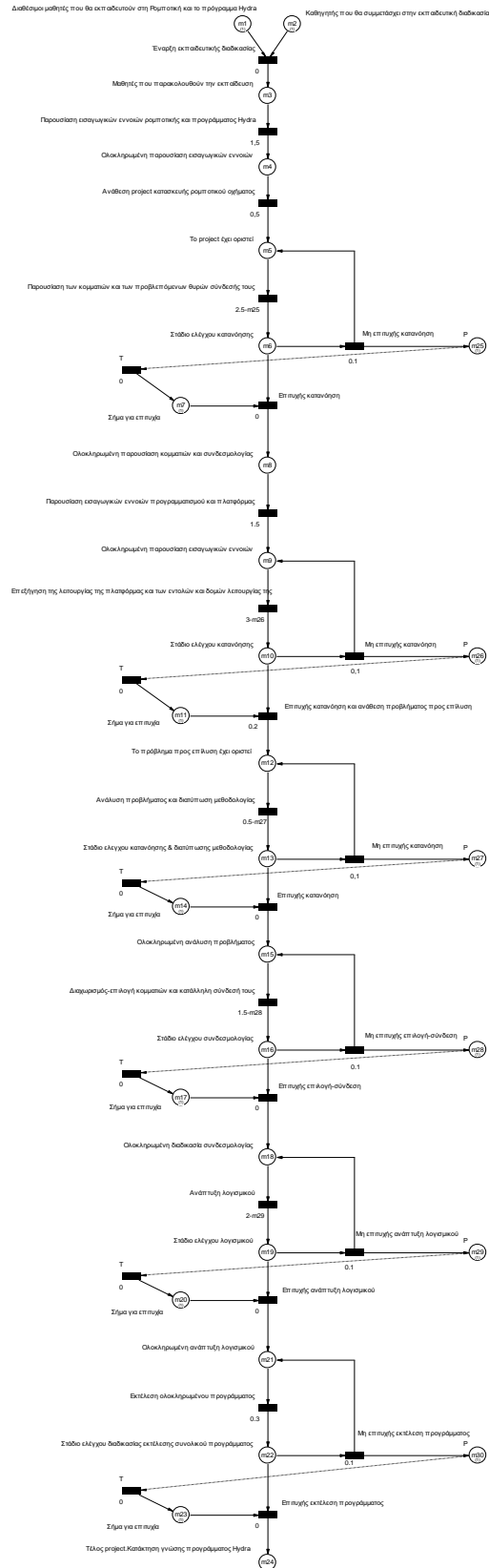




Συνήθες δικτυο Petri εκπαιδευτικής διαδικασίας



Συνήθες δίκτυο Petri προβλήματος εκπαιδευτικής διαδικασίας



Χρονικό δίκτυο Petri εκπαιδευτικής διαδικασίας

